

Lorenz Brenner, Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering, ZHAW
Stefan Rohrer, Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering, ZHAW
Markus Krütli, Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering, ZHAW
Frank Tillenkamp, Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering, ZHAW

Effizienz von Klimakälteanlagen: Praxis und Theorie

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.

In diesem Rahmen wird einerseits die hydraulische Einbindung von bestehenden Kälteanlagen untersucht um häufig auftretende Probleme zu eruieren. In einer Marktbefragung wurde als häufigstes Problem eine mangelhafte regelungstechnische Abstimmung zwischen Erzeuger und Verbraucher angeführt. Weiter genannt wurde eine mangelhafte Wartung, die Fehldimensionierung von Komponenten sowie eine mangelhafte Inbetriebnahme.

Andererseits wird ein exergetisches Effizienzbewertungsverfahren für Klimakälteanlagen mit Kaltwassersätzen entwickelt. Durch die Verfolgung der hochwertigen Energie im Gesamtsystem können Verluste lokalisiert und deren Grössenordnung bestimmt werden, was die Grundlage für Optimierungen liefert. Eine erste Anwendung des Systems konnte anhand Feldmessdaten durchgeführt werden.

The energy strategy of the federal government makes higher demands on the energy efficiency of refrigeration systems. In order to combat rising energy consumption, an action plan was developed as part of the SFOE-programme "EnergieSchweiz", which includes projects to create tools as well as informational documents for the various players in the industry and to implement them in the market.

On one hand, the hydraulic integration of existing refrigeration systems is being investigated in order to identify frequently occurring problems. In a market survey, the most frequent problem cited was inadequate control system coordination between the producer and consumer. Other problems mentioned were insufficient maintenance of the system, incorrect dimensioning of components and poor initial operation of the system.

On the other hand, an exergetic efficiency assessment procedure for vapour compression refrigeration plants with cold water distribution is being developed. By tracking the high-quality energy in the overall system, losses can be localized and their magnitude can be determined, providing the basis for optimization. A first application of the system has been carried out on the basis of field measurements.

Einleitung

Zwei Projekte, welche am Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering an der ZHAW (ZHAW-IEFE) in Winterthur bearbeitet werden, haben das Ziel, die Effizienz von Klimakälteanlagen zu untersuchen und zu verbessern. Dabei soll die Effizienz des Gesamtsystems im Vordergrund stehen.

Im Rahmen einer Marktbefragung, wurde die hydraulischen Einbindung von bestehenden Kälteanlagen untersucht, um häufig auftretende Problemstellungen in der Praxis zu eruieren. Dadurch sollen Schwerpunkte erkannt werden, damit eine Lösung für die schwerwiegendsten Probleme systematisch weiterverfolgt werden kann.

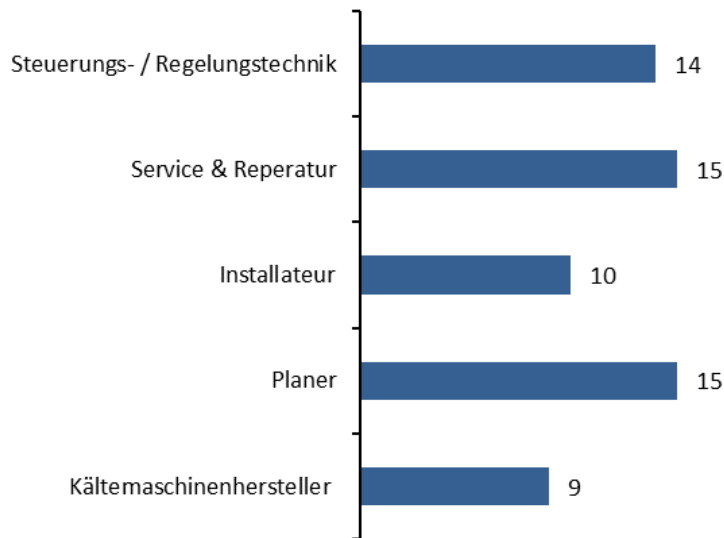
In einem weiteren Projekt wird ein Tool entwickelt, welches eine einheitliche Effizienzbewertung von Klimakälteanlagen sicherstellen soll. Mithilfe des Tools soll es möglich sein, die Effizienz jedes einzelnen Teilsystems einer Klimakälteanlage (z.B. Kältemaschine, Rückkühlung, Kühlstellen, etc.) zu bewerten. Dadurch wird eine ganzheitliche Beurteilung der Anlage sichergestellt und zudem können die auftretenden Problem scharf abgegrenzt werden. Das neue Tool soll auch als konsistentes Bewertungskriterium für eine Effizienzbeurteilung von Klimakälteanlagen dienen. Hierfür soll die Vergleichbarkeit unter verschiedenen Anlagen sichergestellt werden und die Ergebnisse des Tools von Personen ohne Fachkenntnisse interpretiert werden können, damit es verbreitet eingesetzt werden kann.

Häufig auftretende Problemstellungen bei der hydraulischen Einbindung von Kältemaschinen

Eine Untersuchung der ZHAW [1] zeigt auf, dass bei der hydraulischen Integration von Kältemaschinen oftmals Probleme bestehen. Dies lässt die Vermutung zu, dass die Performance einer Kältemaschine verbessert werden kann, wenn diese korrekt ins hydraulische Netz eingebunden wird. Um die bestehenden Probleme in der Praxis systematisch zu erheben wurde eine Marktbefragung unter Akteuren der Kältebranche durchgeführt. Ziel des Projekts war eine Kategorisierung von verschiedenen Problemen, welche bei der hydraulischen Einbindung von Kältemaschinen auftreten können. Primär sollen Schwerpunkte in dieser sehr breit gestreuten Thematik gefunden werden. Dafür wurden die Meinungen von verschiedenen Branchenvertretern ausgewertet und die wichtigsten Problemstellungen identifiziert. Insgesamt wurden 26 Personen befragt, wobei die Vertretung der verschiedenen Fachgebiete in der Umfrage in Bild 1 dargestellt wird¹.

Durch die Studie konnten die am häufigsten auftretenden Mängel bei der hydraulischen Einbindung von Kältemaschinen eruiert werden. Daraus wurden mögliche Massnahmen zur Reduktion der erkannten Probleme abgeleitet.

¹ Die Mehrheit der befragten Personen konnten mehreren Fachgebieten zugeteilt werden, was zu Doppelzuweisungen in den Fachgebieten führt.



*Bild 1: Anzahl befragter Personen eines bestimmten Fachgebiets
(Mehrfachzuteilung in verschiedene Fachgebiete möglich)*

Die aufgedeckten Probleme und Mängel in der Praxis sind vielseitig, wobei jedoch, durch eine relative Gewichtung, klare Schwerpunkte erkannt werden. Bild 2 zeigt die Priorisierung der Themen, welche durch die Umfrageteilnehmer vorgenommen wurde. Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, dass der Fokus der Teilnehmer auf Themen liegt, welche das Zusammenspiel der einzelnen Systemkomponenten betrifft. Insbesondere Themen in Zusammenhang mit der Steuer- / Regelstrategie der hydraulischen Anlage werden stark gewichtet.

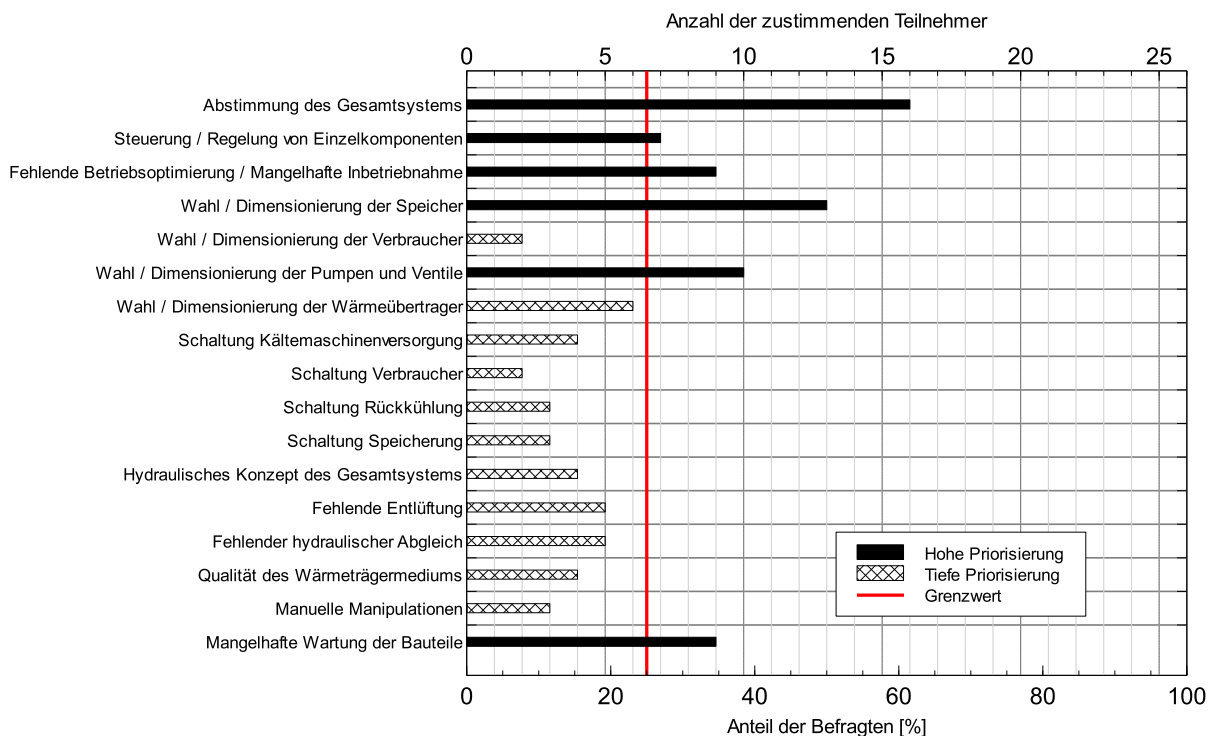


Bild 2: Priorisierung der Themen durch die Umfrageteilnehmer, unterteilt in hohe und tiefe Priorisierung, bezogen auf den Grenzwert (mehr als sechs zustimmende Teilnehmer).

Abstimmung des Gesamtsystems

Als häufigstes Problem wurde eine mangelhafte regelungstechnische Abstimmung zwischen Erzeuger und Verbraucher angeführt. Damit zusammenhängend wurden häufig unzureichende Führungsgrössen für die Maschinensteuerung erwähnt. So werden zum Beispiel Leistungserhöhungen durch das übergeordnete Gesamtsystem gefordert, welche auf Grund der Trägheit der Maschinen nicht umgesetzt werden können. Einzelne Anmerkungen deuten darauf hin, dass hydraulische Konzepte teilweise zu kompliziert geplant werden und daher steuerungs- / regelungstechnisch nicht korrekt umgesetzt werden können.

Die eindeutige Identifizierung der Fehlerquelle ist jedoch oft problematisch, da teilweise konzeptionelle Mängel in der Dimensionierung von Bauteilen mit Hilfe einer Anpassung in der Steuerung / Regelung korrigiert werden. Dies ist oft mit weniger Aufwand verbunden, kann aber unter Umständen die vorhandenen Probleme nicht komplett kompensieren, was eine eindeutige Zuweisung der Fehlerquelle oft schwierig gestaltet. Dies kann mitunter ein Grund sein, weshalb das Augenmerk vieler Teilnehmer stark auf dem Thema der Steuerung / Regelung liegt.

Die Ursache dieser Probleme können oft auf mangelndes fachübergreifendes Know-how zurückgeführt werden. Zudem wird gemäss den Umfrageteilnehmern die fachübergreifende Zusammenarbeit vernachlässigt. Dies legt nahe, die Kommunikation zwischen Planungsinstanz und Steuerungs- / Regelungstechniker zu intensivieren. Durch die Förderung von fachübergreifendem Wissen kann dies erleichtert werden. Unterstützend sollten klar definierte Abläufe erarbeitet werden, welche die Anforderungen an die Schnittstellen sowie die Zuständigkeiten genau definieren.

Betriebsoptimierung und Inbetriebnahme

Ein weiterer Schwerpunkt sind Probleme bei der Inbetriebnahme und / oder der Betriebsoptimierung. Durch eine mangelhafte Inbetriebnahme und / oder fehlende Betriebsoptimierung werden Probleme im Betrieb der Anlage nicht erkannt - können also auch nicht behoben werden. Dies bedeutet, dass Fehler und Mängel, die z.B. durch mangelhafte Abstimmung zwischen Erzeuger und Verbraucher verursacht werden, durch eine korrekte Inbetriebnahme und eine gründliche Betriebsoptimierung früh erkannt und vermieden werden könnten. Jedoch ist eine Betriebsoptimierung oder eine gründliche Inbetriebnahme immer mit Kosten verbunden. Zudem setzt eine versierte Betriebsoptimierung, welche nicht bloss die Effizienz der Maschine beurteilt, sondern auch Ursachen und geeignete Massnahmen definiert, ein tiefes und umfassendes Fachwissen voraus und ist mit grossem Aufwand verbunden.

Bei den Betreibern und Investoren fehlt jedoch das Bewusstsein, dass Betriebsoptimierungen für einen möglichst effizienten Betrieb nötig sind. Investitionen für Betriebsoptimierungen werden daher oft hinterfragt. Weiter erschwerend ist, dass Einsparungen im Voraus nur schwer beziffert werden können. Dadurch ist die Argumentationen für Investitionen in Betriebsoptimierungen oft schwierig, da diese mit einem finanziellen Risiko verbunden sind und ggf. nicht amortisiert werden können. Weiter fehlen finanzielle Anreize für Betriebsoptimierungen, da die Betriebskosten (elektrische Energie) im Vergleich zu den Investitionen in Betriebsoptimierungen sehr gering sind. Die Anreize fehlen zudem gänzlich, wenn der Maschinenbetreiber die

Energiekosten nicht selber trägt². Durch die fehlende Investitionsbereitschaft der Betreiber/Investoren fehlt auch der Anreiz bei Unternehmer und Planer Betriebsoptimierungen vorzusehen. Zudem werden Betriebsoptimierungen in der Offerte ggf. nicht vorgesehen um die Konkurrenzfähigkeit zu wahren.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass die Zuständigkeiten für die Begleitung der Betreiber bei der Bewirtschaftung nicht klar definiert ist. Es wird häufig bemängelt, dass die Betreiber dadurch nicht ausreichend über nötige Massnahmen (Betriebsoptimierung / Wartung) aufgeklärt werden.

Klimakälteanlagen

Neben konkreten Problemen wurde eine Erhebung zu unterschiedlichen Fehlerhäufigkeiten bei verschiedenen Anwendungen vorgenommen. Das Teilnehmerfeld ist sich fast einstimmig einig, dass die Fehlerhaftigkeit bei Klimakälteanwendungen grösser ist, als bei Industrie oder Gewerbeanwendungen.

Die Gründe sind primär in der komplexeren Dimensionierung der Anlagen zu suchen, denn bei Klimakälteanwendungen sind die benötigten Lasten oft schwieriger zu definieren als im Industriegesektor. Als weiterer Grund für die öfter auftretenden Fehler wird das Know-how der beteiligten Akteure im Klimakältebereich erwähnt. Ausschlaggebend ist hierbei vor allem die Erfahrung in der Planung von Kältemaschinen.

Fehler im Klimakomfortbereich sind zudem meist gutmütiger. Benutzer der klimatisierten Räume (z.B. Büroräume) fordern selten, dass das Temperaturniveau strikt gehalten werden muss. Dementsprechend werden Fehler kaum bemerkt und nicht korrigiert.

Schlussfolgerungen aus der Marktbefragung

Die Resultate der Marktbefragung zeigen, dass Probleme oder deren Ursachen nicht erkannt werden und dadurch keine Optimierungen stattfinden. Damit Probleme gar nicht erst entstehen, sollte die Kompetenz im Bereich der Kälteanlagen vertieft werden. Im Fokus muss dabei fachübergreifendes Wissen stehen, welches Schnittstellenkompetenz fördert. Dies könnte mit einem geeigneten Schulungsmodell erreicht werden.

Um Fehler im Betrieb zu erkennen, müsste eine einheitliche Definition des Umfangs sowie der Zuständigkeiten für eine sachkundige Inbetriebnahme und eine gründliche Betriebsoptimierung definiert werden. Wird diese durch alle Akteure konsequent umgesetzt, können dafür nötigen Investitionen argumentiert und eingefordert werden.

Um Probleme und dessen Ursachen besser zu erkennen, ist ein Bewertungssystem sinnvoll, welches nicht nur die Kältemaschine, sondern auch andere Teilsystem in der Kälteverteilung beurteilt. Die Interpretation des Systems müsste zudem durch Laien durchführbar sein. Denn nur wenn auch fachfremde Personen ein Problem erkennen, können diese schnell registriert und behoben werden. Dies hilft insbesondere die Betreiber und auch die Investoren auf den Zustand ihrer Anlagen zu sensibilisieren.

² z.B. wenn die Betriebskosten an Nutzer abgewälzt werden können, was häufig in Klimakälteanwendungen der Fall ist.

Exergie-Ansatz zur Beurteilung der Effizienz von Klimakälteanlagen

Für eine einheitliche Bewertung von Klimakälteanlagen soll ein Effizienzbewertungstool entwickelt werden, welches breit zum Einsatz kommen kann. Dafür muss einerseits die Umsetzung kostengünstig möglich sein und andererseits müssen die Resultate ohne Fachkenntnisse interpretiert werden können. Es sollten keine Fachkräfte erforderlich sein, um feststellen zu können, ob bei einer Anlage Handlungsbedarf besteht und erst nach Indikation durch das Betriebspersonal werden Fachleute zur Optimierung oder Fehlerbehebung herbeigezogen. Gegebenenfalls wird bei der Genauigkeit bewusst ein Kompromiss eingegangen.

Die beschriebenen Erkenntnisse aus den Untersuchungen bezüglich hydraulischer Einbindung der Kälteanlagen haben aufgezeigt, dass eine alleinige Betrachtung der Kältemaschine nicht ausreicht, um die Effizienz der ganzen Anlage zu quantifizieren, da Wechselwirkungen zwischen einzelnen Teilsystemen bestehen. Um den Energiebedarf von kältetechnischen Anlagen zu reduzieren, ist es in einem ersten Schritt unerlässlich, durch Messungen den Betriebszustand zu erfassen und das Optimierungspotential ausfindig zu machen. Um dies zu realisieren, wurde ein Konzept für die Effizienzbewertung auf Basis von normierten Kennzahlen entwickelt [2] und fortlaufend optimiert, welches eine Bewertung einzelner Untersysteme in Klimakälteanlagen zulässt. Es basiert auf einer exergetischen Betrachtungsweise und liefert Resultate, die ohne Fachkenntnisse interpretiert werden können.

Theoretische Grundlagen

Die Arbeitstemperaturen sind ein wichtiges Merkmal des Anlagenzustandes. Mängel äussern sich oft in einer Verschiebung des Temperaturniveaus, verursacht entweder durch Mischung in der Hydraulik, durch schlechte Wärmeübergänge in den Wärmeübertragern oder einer ungünstigen Regelstrategie. Eine Anlage kann aber auch schlicht mit ungünstigen Sollwerten betrieben werden. Bei einer rein energetischen Bewertung, typischerweise mit dem Coefficient of Performance (COP) [3], dem Energy Efficiency Ratio (EER) [4] oder der Jahresarbeitszahl (JAZ), wird das Temperaturniveau nicht direkt mitberücksichtigt. Ein wichtiger Indikator fliesst somit nur untergeordnet in die Effizienzbewertung ein. Dies kann jedoch mit einem Exergieansatz realisiert werden.

Exergieanalysen wurden bereits bei verschiedene Anwendungen in der Gebäudetechnik durchgeführt, z.B. für Wärmepumpen [5], Kältemaschinen [6] und in der Photovoltaik [7]. Exergie ist definiert als der unbeschränkt umwandelbare Anteil der Energie, welche aus einer beliebigen Energieform bei reversibler, d.h. verlustfreier Wechselwirkung mit einer definierten Referenzumgebung gewinnbar ist [8]. In anderen Worten ist die Exergie ein Mass für die Arbeitsfähigkeit der Energie und stellt das Gegenstück zum nicht nutzbaren Anteil, der Anergie, dar. Mechanische Arbeit und elektrische Energie sind per Definition vollständig in andere Energieformen umwandelbar und sind deshalb reine Exergie. Bei der Energie von Stoffströmen und Wärmeenergie ist die Umwandelbarkeit begrenzt. Wärme enthält nur einen gewissen Anteil hochwertige Energie, welche im Idealfall, d.h. in einem reversiblen Carnot-Prozess, vollständig in Arbeit umgewandelt werden kann (2. Hauptsatz der Thermodynamik). Die Exergie ist im Vergleich zur Energie keine konservative Grösse, d.h. in realen irreversiblen Prozessen wird die Energie entwertet bzw. tritt ein Exergieverlust auf. Mit dem Transport von Wärme erfolgt dementsprechend auch ein Transport von Exergie, wobei ein Bedarf an Wärme zwangsläufig auch mit einem Bedarf an Exergie einhergeht. Durch die Bewertung der Exergie wird gegenüber der

rein energetischen Betrachtung ein zusätzlicher Aspekt, die Qualität der Wärme, berücksichtigt. Die Beurteilung wird auf diese Weise strenger. Ein exergetisch günstiges System arbeitet zwangsläufig auch energetisch gut.

Zur Veranschaulichung der Thematik wird die thermische Exergie \dot{E}_{therm} betrachtet, welche wie folgt definiert ist [9]:

$$\dot{E}_{therm} = \dot{Q} \cdot \left(1 - \frac{T_U}{T_i}\right) = \dot{Q} \cdot \eta_c$$

wobei \dot{Q} einen Wärmestrom, T_U die Temperatur der Referenzumgebung und T_i das Temperaturniveau des Wärmestroms darstellt. Der letztere Term entspricht dem Carnot Wirkungsgrad η_c . Die Exergie von Stoffströmen kann prinzipiell gleich beschrieben werden, wobei dann das logarithmische Mittel der ein- und ausgehenden Temperaturen über die Systemgrenze für T_i verwendet werden muss. Bei Exergieanalysen ist die Definition der Referenzumgebung entscheidend, um zuverlässige Auswertungen durchführen zu können. In [10] wurden verschiedene mögliche Varianten überprüft, wobei die aktuell herrschende Umgebungstemperatur als beste Option angesehen wird. Dementsprechend wird dies in der vorliegenden Arbeit adaptiert. Des Weiteren hat der Exergiestrom die Eigenschaft seine Flussrichtung in Bezug zum Wärmestrom in Abhängigkeit des Temperaturniveaus zu ändern. Ist $T_i > T_U$ so wird der Carnot-Faktor positiv und der Exergiestrom hat die gleiche Strömungsrichtung wie der Wärmestrom. Jedoch hat der Exergiestrom die entgegengesetzte Flussrichtung, wenn $T_i < T_U$. Mit anderen Worten fließt die thermische Exergie immer zur Referenzumgebung. Shukuya beschreibt dies als warme und kalte Exergie, in Abhängigkeit ob das Temperaturniveau höher oder tiefer liegt wie die Referenz [11].

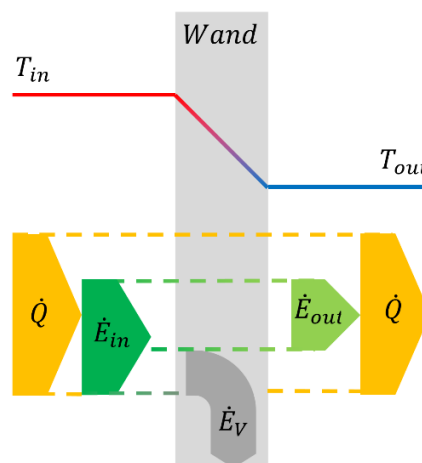


Bild 3: Schematische Darstellung des Wärmetransfers durch eine ebene Wand mit dem Energie- und Exergiestrom sowie dem Temperaturverlauf

In Bild 3 wird der Wärmetransfer durch eine ebene Wand betrachtet, wobei der Energie- und Exergiestrom sowie das Temperaturniveau exemplarisch dargestellt sind. Die Temperaturen T_{in} und T_{out} seien grösser als die Referenztemperatur T_U . Der nutzbare Teil des Wärmestromes, der Exergiestrom \dot{E}_{in} bei Temperaturniveau T_{in} , wird im Verlauf durch die Wand aufgrund des

Temperaturgradienten verringert oder in anderen Worten wird durch die Reduktion des thermodynamischen Potentials Exergie zerstört (\dot{E}_V). Der resultierende ausgehende Exergiestrom \dot{E}_{out} bei Temperaturniveau T_{out} ist somit kleiner und die Arbeitsfähigkeit der Energie ist reduziert. Da Exergie keine Erhaltungsgrösse ist, muss bei deren Bilanzierung der Exergieverlust \dot{E}_V berücksichtigt werden. Dieser lässt sich folglich mit einer stationären Exergiebilanz der zu- und abgeführten Exergie bestimmen:

$$\dot{E}_V = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}$$

Die Quantifizierung dieser Verluste liefert die Grundlage für eine zielgerichtete Effizienzanalyse, da dadurch verschiedene Aspekte der Energienutzung beleuchtet werden. In Klimakälteanlagenanlagen können somit die Exergieströme durch das gesamte System von der eingehenden elektrischen Energie des Kompressors und Nebenaggregate bis hin zur Kühlstelle verfolgt und der Standort sowie die Größenordnung der Verluste in jedem Teilsystem identifiziert werden. Darüber hinaus kann der Energietransport in den Sekundärseiten bewertet werden. Eine geringere Menge an Exergie im Teilsystem der Kälteverteilung resultiert beispielsweise in einem erhöhten Durchfluss um die gewünschte Menge Exergie an die Kühlstellen zu liefern, was zu einem erhöhten Pumpenenergieverbrauch führt. Aus diesem Grund ist der Exergieansatz auch für Systemoptimierungen sinnvoll. Daher werden exergetische Untersuchungen oft auch in Kombination mit Pinch-Analysen für Prozessoptimierungen angewandt [12].

Systemstrukturierung

In der entwickelten exergetischen Effizienzbewertung wird die gesamte Klimakälteanlage in folgende Teilsysteme strukturiert, um eine detaillierte Bewertung zu ermöglichen:

- Rückkühlung (RK)
- Kältemaschine (KM)
- Kältespeicherung und Transport (KST)
- Kühlstellen (KS)

Eine ähnliche Strukturierung findet man in [13] und [14]. Zu dieser Einteilung führten zudem Überlegungen zur Kennzahlenbildung sowie die Erprobung an R&I-Schemen bestehender Anlagen. Zusätzliche Teilsysteme wie Freecooling oder Wärmenutzung sind ebenfalls integrierbar, werden jedoch im vorliegenden Bericht nicht diskutiert. Bild 4 zeigt ein verallgemeinertes Schema einer typischen Klimakälteanlage mit den Teilsystemen sowie den einzelnen Komponenten und Exergieströmen. Es ist anzumerken, dass das Teilsystem RK immer über der Referenztemperatur liegt und die Exergie daher in die gleiche Richtung wie der abgegebene Wärmestrom des Kondensators fliesst (warme Exergie). Das Gegenteil ist der Fall bei den Teilsystemen KST und KS, welche im Normalfall unter der Referenztemperatur liegen (Sommerbetrieb). Die Exergie fliesst entgegengesetzt der aufgenommenen Wärme im Verdampfer (kalte Exergie).

Es kommt oft vor, dass mehrere Kältemaschinen parallel in eine Anlage eingebunden sind. Entsprechend gibt es mehrere KM-Teilsysteme, so dass jede Maschine einzeln bewertet werden kann. Allfällige Beimischschaltungen sowie Umwälzpumpen werden den angrenzenden Teilsystemen RK und KST zugeordnet. Ähnliches gilt für die Kühlstellen, welche ebenfalls individuell bewertet werden und enthalten weder Pumpen noch Beimischungen. Dies ermöglicht die

Bewertung des Temperaturniveaus, bei welchem die Kühlstelle betrieben wird, welche im Inneren des KS-Systems nicht zugänglich wäre. Die Teilsysteme RK und KST kommen in der Regel nur einmal pro Anlage vor und nehmen die Exergien sämtlicher KM-Systeme auf bzw. versorgen sämtliche KS-Systeme.

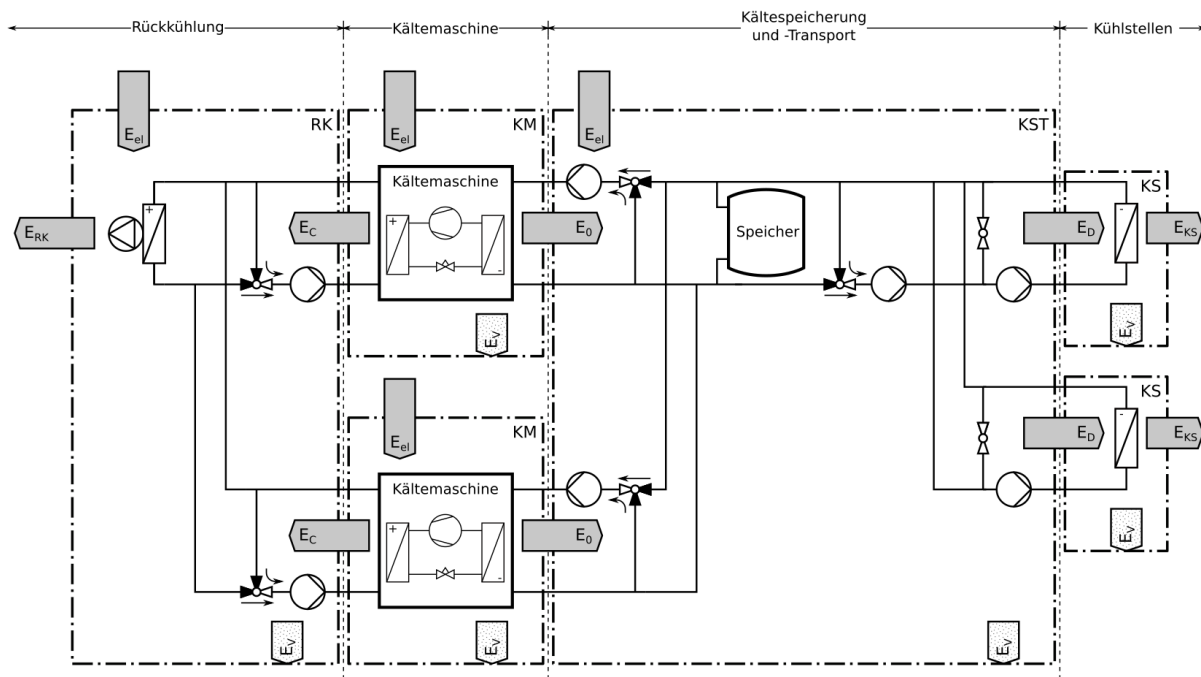


Bild 4: Verallgemeinertes Schema einer typischen Klimakälteanlage und die Aufteilung in Teilsysteme. Die hydraulische Schaltung soll nicht die optimale Einbindung darstellen, sondern die Zuordnung von Nebenaggregaten zu den Teilsystemen veranschaulichen.

Durch das Ziehen von Systemgrenzen ist auch die Feinheit der Bewertung definiert. Beim Festlegen der Systemgrenzen im Schema einer realen Anlage sind gewisse Freiheiten erlaubt, wenn man Teile bewusst aus der Bewertung ausschliessen möchte. Es ist jedoch darauf zu achten, dass alle Exergieströme messtechnisch erfasst sind, welche die Systemgrenze der auszuwertenden Teilsysteme überschreiten. Es muss stets möglich sein, die vollständige Exergiebilanz eines Teilsystems aufzustellen. Weiter ist darauf zu achten, dass sich zwischen zwei Teilsystemen die untereinander Exergie austauschen keine weiteren Komponenten befinden. Beispielsweise müssen Verteilleitungen mit Abgängen, T-Verbindungen, 3-Weg Ventilen etc. vollständig einem Teilsystem zugeordnet sein. Während Verteilleitungen bei energetischen Betrachtungen kaum eine Rolle spielen, können in ihnen exergetische Verluste (etwa durch Mischvorgänge) auftreten, die unbedingt zu erfassen sind.

Kennzahlenbildung

Die Grundlage für einen systematischen Ansatz zur Kennzahlenbildung ist eine Bilanz der Exergieströme über die Systemgrenzen. Diese können danach in geeigneter Weise zueinander in Bezug gesetzt werden, woraus verschiedene Aspekte eines Systems bewertet werden können. Die Kennzahlen basieren auf der Bildung des exergetischen Wirkungsgrades, welcher im Allgemeinen das Verhältnis zwischen exergetischem Nutzen (ausgehender Exergiestrom) zu Aufwand (eingehender Exergiestrom) darstellt und wie folgt definiert ist [9]:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{aus}}{\dot{E}_{ein}} = 1 - \frac{\dot{E}_V}{\dot{E}_{ein}}$$

wobei \dot{E}_{aus} den ausgehenden und \dot{E}_{ein} den eingehenden Exergiestrom über die Systemgrenzen darstellt. Der Wirkungsgrad wird 1, wenn ein reversibler Prozess untersucht wird und 0, wenn die Energie komplett entwertet wird. Der exergetische Wirkungsgrad lässt somit ein relativer Vergleich unterschiedlicher Systeme zu.

Ein absoluter Vergleich der Effizienz ist jedoch schwierig, da sich der exergetische Wirkungsgrad auf das thermodynamische Optimum bezieht. Untersucht man z.B. zwei Kälteanlagen A und B mit den exergetischen Wirkungsgraden $\eta_{ex,A} = 0.3$ und $\eta_{ex,B} = 0.4$, so ist sofort klar, dass Anlage B effizienter als Anlage A ist. Es ist jedoch nicht bekannt, ob die Kälteanlage B im Vergleich zum Stand der Technik weiteres Optimierungspotential aufweist, was mehr Praxisrelevanz hat. Um dieses Problem zu lösen wird die Bildung einer Kennzahl ζ (Exergy Efficiency Ratio) vorgeschlagen, welche wie folgt definiert wird:

$$\zeta = \frac{\eta_{ex}}{\eta_{ex}^*} = \frac{\frac{\dot{E}_{aus}}{\dot{E}_{ein}}}{\frac{\dot{E}_{aus}}{\dot{E}_{ein}^*}} = \frac{\dot{E}_{ein}^*}{\dot{E}_{ein}}$$

wobei η_{ex} den effektiven exergetischen Wirkungsgrad anhand Messungen und η_{ex}^* einen Referenzwirkungsgrad anhand technischen Normen und Standards darstellt. \dot{E}_{ein}^* beschreibt dementsprechend den technisch idealen exergetischen Aufwand im System. Für erste Untersuchungen wurden folgende Normen herbeigezogen:

- SIA 382/1 (Lüftungs- und Klimaanlage - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen) [15]
- VDMA 24247-8 (Energieeffizienz von Klimakälteanlagen. Teil 8: Komponenten - Wärmeübertrager) [16]
- SWKI 2003-3 (Rückkühlung) [17]

Die Effizienzbewertung basiert somit auf dem Verhältnis des effektiven zum technisch idealen Aufwand gemäss Normen, wobei der gleiche Nutzen erzielt werden soll. Die Bewertung eines Teilsystems erfolgt unter der Annahme, dass sich die benachbarten Teilsysteme gleich verhalten und somit die Kennzahl angibt, wie sich das reale System im Vergleich zum Referenzsystem in genau der gleichen Situation verhalten würde.

Zudem soll die Auswertung der Kennzahlen über einen sinnvollen Zeitraum geschehen, da Momentaufnahmen nicht zwingend aussagekräftig sind. Da bei Klimakälteanlagen die Kühllast typischerweise einem Tagesrhythmus folgt, ist es naheliegend die Kennzahlen tageweise auszuwerten. So werden auch zeitlich versetzt auftretende Exergieströme (z.B. in Speichern) korrekt miteinbezogen. Dementsprechend werden die anhand Messdaten berechneten Exergieströme über den vorhandenen Messintervall numerisch integriert und die resultierenden Exergien über den ganzen Tag aufsummiert:

$$\zeta = \frac{\sum_{t=0h}^{24h} E_{ein}^*}{\sum_{t=0h}^{24h} E_{ein}}$$

Durch die Normierung des exergetischen Wirkungsgrades wird die Interpretation der Resultate stark vereinfacht (siehe Bild 5a). Ein Wert von 1 ist mit gutem Engineering erreichbar. Wird die Kennzahl grösser 1 werden die technischen Mindestanforderungen übertroffen und ein Wert kleiner 1 deutet auf Verbesserungspotential hin bzw. die Möglichkeiten der eingesetzten Technologie wird nicht voll ausgeschöpft. Dies liefert die Grundlage, weitere Abstufungen anhand Grenzwerten für die Anlagenbewertung zu definieren, z.B. optimaler, zulässiger und unzureichender Betrieb (siehe Bild 5b).

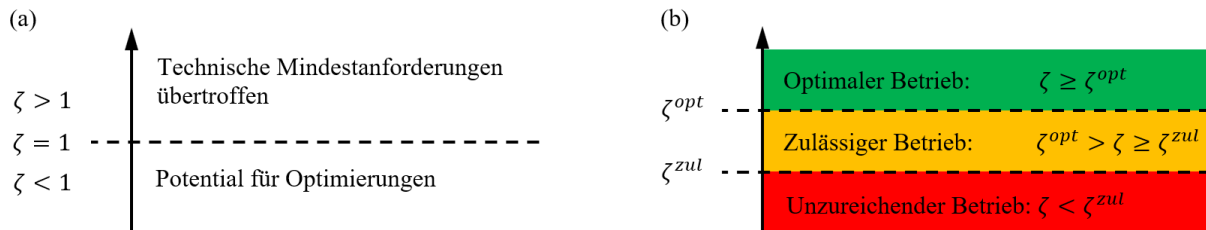


Bild 5: Kennzahl ζ mit (a) einer grundlegenden und (b) einer erweiterten Bewertung mit mehreren Grenzen und Betriebszuständen.

Anwendungsbeispiel

Eine erste Anwendung des Beurteilungssystems mit einer grundlegende Auswertung wurde anhand Messdaten einer Kälteanlage mit Reinraumkonditionierung und Büroklimateisierung durchgeführt. Folgend wird die Berechnung der Kennzahl und deren Auswertung am Beispiel des Teilsystems Rückkühlung (RK) aufgezeigt. Gemäss Bild 6 wird dem Teilsystem RK Exergie über den Verflüssiger, die Umwälzpumpe und den Rückkühlventilator zugeführt.

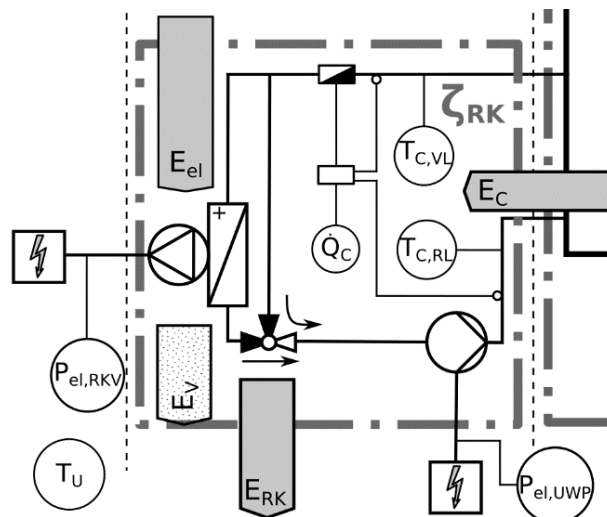


Bild 6: Relevante Messstellen und Exergieströme des Teilsystems Rückkühlung.

Die Kennzahl ζ_{RK} der Rückkühlung wird dementsprechend wie folgt berechnet:

$$\zeta_{RK} = \frac{\sum_{t=0h}^{24h} (E_C^* + E_{el}^*)}{\sum_{t=0h}^{24h} (E_C + E_{el})}$$

Der Exergiebeitrag des Verflüssigers E_C ist:

$$E_C = Q_C \left(1 - \frac{T_U}{T_C} \right)$$

mit der logarithmischen Mitteltemperatur T_C :

$$T_C = \frac{T_{C,VL} - T_{C,RL}}{\ln \left(\frac{T_{C,VL}}{T_{C,RL}} \right)}$$

wobei $T_{C,VL}$ der Vorlauf- und $T_{C,RL}$ der Rücklauf-temperatur des Verflüssigers entspricht. Q_C beschreibt die abgegebene Wärme über den Kondensator. Da elektrische Energie reine Exergie darstellt, entspricht der Exergieeintrag durch die Nebenaggregate der aufgewendeten bzw. gemessenen Arbeit der Umwälzpumpe W_{UWP} und Rückkühlventilator W_{RKV} :

$$E_{el} = W_{UWP} + W_{RKV}$$

Die Referenzexergie des Verflüssigers E_C^* wird berechnet nach:

$$E_C^* = Q_C \left(1 - \frac{T_U}{T_C^*} \right)$$

mit der Referenztemperatur T_C^* gemäss:

$$T_C^* = T_U + \Delta T_{KGA} + \frac{T_{C,VL} - T_{C,RL}}{2}$$

wobei ΔT_{KGA} dem Kühlgrenzabstand in Trockenkühlern, d.h. der Differenz zwischen Wärmeträger-Austrittstemperatur und Luft-Eintrittstemperatur, nach Norm VDMA 24247-8 [16] entspricht (siehe Tab. 1).

	ΔT_{KGA} [K]
anzustreben	≤ 6 K
zulässig	≤ 8 K

Tabelle 1: Kühlgrenzabstände für Trockenkühler nach VDMA 24247-8 [16].

Die Referenzexergie der Nebenaggregate ist definiert mit:

$$E_{el}^* = \left(\frac{1}{f_{el,th,RKV}} + \frac{1}{f_{el,th,UWP}} \right) Q_C$$

wobei $f_{el,th,RKV}$ und $f_{el,th,UWP}$ thermo-elektrische Leistungsfaktoren gemäss SIA 382/1 [15] darstellen (siehe Tab. 2).

	$f_{el,th}$ [-]
Rückkühlventilator	≥ 28
Umwälzpumpe	≥ 85

Tabelle 2: Thermo-elektrische Leistungsfaktoren einzelner Komponenten nach SIA 382/1 [15].

Die Berechnung wurde anhand Messdaten im Zeitraum Ende April bis Ende Juni durchgeführt und ist in Bild 7 dargestellt.

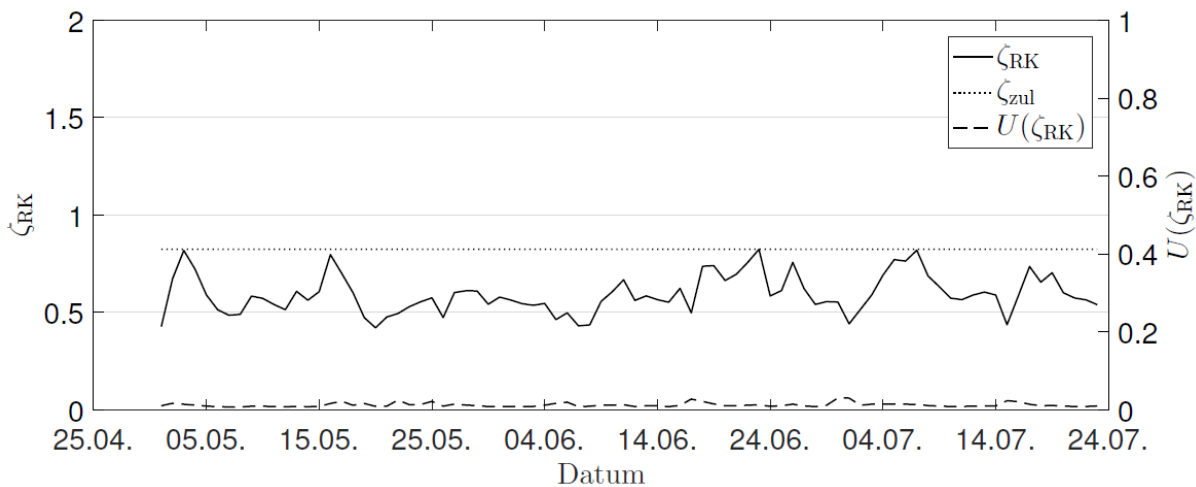


Bild 7: Exergetische Beurteilung des Teilsystems Rückkühlung mit der Kennzahl ζ_{RK} und ζ_{zul} .

Die Kennzahl streut stark jedoch mit einer konstanten Breite über den gesamten Zeitraum. Sie bleibt stets deutlich unter dem Wert 1, was auf eine erhöhte Rückkühltemperatur zurückzuführen ist. Mögliche Gründe sind eine aktive Hochhaltung durch Beimischung, Rezirkulation der Luft bei den Wärmetauschern oder Verschmutzung derselben. Die gepunktete Linie beschreibt den Verlauf von ζ_{zul} , den minimal zulässigen Wert der Kennzahl ζ_{RK} . Die Berechnung erfolgte identisch dem beschriebenen Vorgehen, jedoch unter Verwendung des zulässigen Kühlgrabenabstandes gemäss Norm (siehe Tab. 1). Das Rückkühlsystem arbeitet demnach immer unterhalb der zulässigen Grenze und müsste dementsprechend dringend auf mögliche Mängel hin untersucht werden.

Die gestrichelte Linie in Bild 7 beschreibt die Messunsicherheit U der Kennzahl ζ_{RK} . Sie ist stets < 0.03 , was zu einem maximalen relativen Fehler von 6.8% führt. Mit einem durchschnittlichen relativen Fehler von rund 2% ist die Auswertung ausreichend genau für eine Aussage.

Stand der Arbeiten

Die erste Erprobung des Beurteilungssystems hat gezeigt, dass nicht alle Referenzwerte über Normen bestimmt werden können (z.B. Referenzwert für das Teilsystem der Kältemaschine im Teillastbetrieb). Um die fehlenden Grössen zu erhalten, muss auf thermodynamische Modelle oder repräsentative Feldmessungen von gut laufenden Anlagen zurückgegriffen werden, was

aktuell Stand der Arbeit ist. Zudem setzt die Kennzahlenbildung mit dem exergetischen Ansatz eine grössere Anzahl an Messtellen voraus, als bei einer rein energetischen Betrachtung. Da bei der untersuchten Anlage nicht alle nötigen Messgrössen vorhanden waren, konnten dementsprechend nicht alle vorgesehenen Auswertungen durchgeführt werden. Dies zeigt, dass nicht alle bestehenden Anlagen genügend gut instrumentiert sind, um das Konzept wie beschrieben anzuwenden. Dies lässt die Fragestellung aufkommen, inwiefern sich bestehende Klimakälteanlagen zur Anwendung des Beurteilungssystems eignen. In einem laufenden BFE-Projekt soll daher eine Bestandsaufnahme der Instrumentierung bestehender Anlagen durchgeführt werden. Ziel ist eine Beurteilung, ob sich eine Nachinstrumentierung der Anlagen zur Bildung von Referenzwerten und Anwendung der exergetischen Effizienzbewertung lohnt.

Es wurden 57 Unternehmen kontaktiert und die Teilnahmebereitschaft abgeklärt. Insgesamt 24 Anlagen konnten dadurch bezüglich Instrumentierung begutachtet werden (teils mehrere Anlagen von einem Unternehmen). Dabei wurden sämtliche vorhandenen Messgeräte katalogisiert und eruiert, welche Messinstrumente für eine Auswertung fehlen. Die Begutachtung ergab eine grosse Diskrepanz bei der Instrumentierung und der Datenspeicherung. Während einige Anlagen beinahe komplett instrumentiert sind und alle Messwerte aufgezeichnet werden, fehlen bei anderen selbst grundlegende Messinstrumente wie Wärmezähler für die Kälteleistung. Es zeigt sich jedoch, dass Anlagen existieren, bei denen eine exergetische Bewertung gemäss dem ausgearbeiteten Konzept ohne Nachinstrumentierung möglich ist.

Weiteres Vorgehen

In einem weiteren Schritt wird eine Abschätzung vorgenommen, um den Kostenaufwand der Nachrüstung jeder Anlage zu eruiieren, damit die eine exergetische Beurteilung gemäss Konzept möglich ist. Aus diesen Erkenntnissen lässt sich anschliessend ableiten, ob es finanziell sinnvoll ist bestehende Anlagen für das Beurteilungssystem und die Bildung von Referenzwerten in Betracht zu ziehen.

Gleichzeitig wird die am besten instrumentierte Klimakälteanlage, welche alle nötigen Messgrössen aufzeichnet, auf Basis vorhandener Datensätze & Messdaten nach dem bestehenden Beurteilungssystem ausgewertet (Proof of Concept). Dadurch sollen allfällige Probleme im Vorgehen erkannt und falls möglich erste Referenzwerte gebildet werden.

Quellen

- [1] St. Rohrer, C. Hablützel, F. Tillenkamp, M. Schneider, Einsparpotential bei der hydraulischen Einbindung von Kältemaschinen. Bundesamt für Energie BFE, 2018
- [2] M. Krütli, C. Hablützel, F. Tillenkamp: Systeme für die Beurteilung der Energieeffizienz von Klimakälteanlagen, IEF Energy Papers, 2016, Vol. 2.
- [3] G. Pottker, P. Hrnjak: Experimental investigation of the effect of condenser subcooling in R134a and 300 R1234yf air-conditioning systems with and without internal heat exchanger, International Journal of Refrigeration, 2015, Vol. 50, 104-113.

- [4] H. Fritschi, F. Tillenkamp, R. Löhner, M. Brügger: Efficiency increase in carbon dioxide refrigeration technology with parallel compression, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2017, Vol. 12, 171-180.
- [5] L. Gasser, B. Wellig, K. Hilfiker: WEXA: Exergie-Analyse zur Effizienzsteigerung von Luft/Wasser-Wärmepumpen, HSLU, 2008.
- [6] A. Yataganbaba, A. Kilicarslan, I. Kurtbas: Exergy analysis of R1234yf and R1234ze as R134a replacements in a two evaporator vapour compression refrigeration system, *International Journal of Refrigeration*, 2015, Vol. 60, 26-37.
- [7] S. Dubey, S. Solanki, A. Tiwari: Energy and exergy analysis of PV/T air collectors connected in series, *Energy and Buildings*, 2009, Vol. 41, 863-870.
- [8] W. Fratzscher, V. M. Brodjanskij, K. Michalek: *Exergie*, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1986.
- [9] H. D. Baehr, S. Kabelac: *Thermodynamik*, Springer, Berlin Heidelberg, 2012.
- [10] H. Torío, D. Schmidt: Annex 49 final report: Energy Conservation in Buildings and Community Systems (ECBCS) - Low exergy systems for high-performance buildings and communities, Fraunhofer IBP, Stuttgart, 2011.
- [11] M. Shukuya: *Exergy: theory and applications in the built environment*, Springer, London, 2013.
- [12] M. N. Hamsani, T. G. Walmsley, P. Y. Liew, S. R. Wan Alwi: Combined Pinch and exergy numerical analysis for low temperature heat exchanger network, *Energy*, 2018, Vol. 153, 100-112.
- [13] J. M. Harrell, J. A. Mathias: Improving efficiency in a campus chilled water system using exergy analysis, *ASHRAE Transactions*, 2009, Vol. 115, 507–522.
- [14] X. Fang, X. Jin, Z. Du, Y. Wang, W. Shi: Evaluation of the design of chilled water system based on the optimal operation performance of equipments, *Applied Thermal Engineering*, 2017, Vol. 113, 435–448.
- [15] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA: *Lüftungs- und Klimaanlage - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen*, Std. SIA 382/1, 2014.
- [16] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer e.V. VDMA: *Energieeffizienz von Klimakälteanlagen. Teil 8: Komponenten - Wärmeübertrager*, Std. VDMA 24247-8, 2011.
- [17] Schweizerischer Verein von Wärme- und Klimatechnikern: *Richtlinie 2003-3, Rückkühlung*, Std. SWKI 2003-3, 2005.