

# **Abschlussbericht**

über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem AZ: 27352 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

## **Untersuchungen zu einem Online-Verfahren für die kontinuierliche Bewertung der Gesamtenergieeffizienz von gewerblichen Kälteanlagen (EnEff\_Cool)**

Bewilligungsempfänger und Bearbeiter:

Cool Expert Entwicklungs GmbH  
Besenacker 14  
35109 Allendorf/Eder

bearbeitet von

Dipl.-Ing (grad.) Friedhelm Meyer  
Dipl.-Ing. Oliver Gerlach  
Dipl.-Ing. (FH) Christian Kratzert  
Dipl.-Ing. Horst Lübke

Allendorf a.d. Eder, März 2012

Dieser Abschlußbericht kann über folgende Adresse bezogen werden:

Cool Expert Entwicklungs GmbH

Besenacker 14

35109 Allendorf/Eder

Telefon +49 (0) 6452 9290 0

Telefax +49 (0) 6452 9290 290

e-Mail: [info@cool-expert.de](mailto:info@cool-expert.de)

[www.cool-expert.de](http://www.cool-expert.de)

11/95		<b>Projektkennblatt</b> der <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>			
Az	<b>27352</b>	Referat	Fördersumme <b>120.000,00 €</b>		
<b>Antragstitel</b>		<b>Untersuchungen zu einem Online-Verfahrens zur kontinuierlichen Bewertung der Energieeffizienz von gewerblichen Kälteanlagen (Eneff_Cool)</b>			
<b>Stichworte</b>					
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
<b>24 Monate</b>		<b>1.8.2009</b>		<b>3.8.2011</b>	
Projektphase(n)		<b>keine</b>			
Zwischenberichte:		alle 6 Monate Kurzbericht			
<b>Bewilligungsempfänger</b>		<b>Cool Expert Entwicklungs GmbH</b> Besenacker 14 35108 Allendorf a.d.Eder		Tel 06452 9290-0 Fax 06452 9290-290	
				Projektleitung Dipl.-Ing. (grad.) F. Meyer	
				Bearbeiter	
<b>Kooperationspartner</b> -					
<b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b>					
<p>Das Thema Energieeinsparung von Kälteanlagen gewinnt immer mehr an Bedeutung. Das wachsende Umweltbewusstsein und die stark gestiegenen Energiepreise sensibilisieren die Betreiber von Kälteanlagen, die verstärkt nach energieeffizienten Lösungen nachfragen. Zur nachhaltigen, energetischen Bewertung von gewerblichen Kälteanlagen fehlt es jedoch derzeit noch an der erforderlichen Technologie, die es insbesondere dem Betreiber von Kälteanlagen erlaubt, den energetischen Zustand seiner Anlagen ständig im laufenden Betrieb beobachten und einfach bewerten zu können. Es gibt zurzeit noch keine Lösungen, die eine energetische Gesamtbewertung der Energieeffizienz von Kälteanlagen während des laufenden Betriebs erlauben. Ziel des Vorhabens ist es daher, ein praktikables, indirektes Verfahren zu erforschen und zu entwickeln, mit dem im laufenden Betrieb der energetische Zustand einer Kälteanlage kontinuierlich erfasst und als Key Performance Indikator (KPI) angezeigt werden kann. Hierdurch kann ein signifikanter Beitrag zur Verbesserung der Energieeffizienz von Kälteanlagen geleistet werden, indem für den Betreiber frühzeitig überhöhte Energieverbräuche (z.B. durch falsche Reglereinstellung, Kältemittelleckagen, schlecht eingestellte Expansionsventile) gemeldet werden.</p>					
<b>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</b>					
<p>In diesem Vorhaben wurde zum einen ein theoretischer Lösungsansatz verfolgt, mit dem ein neuartiges, indirektes Verfahren für direkt verdampfende Kälteanlagen untersucht wurde, das aus gemessenen Prozessgrößen (Temperaturen, Drücke), Anlagenzuständen und kältetechnischen bzw. thermodynamischen Zusammenhängen (Stoffdaten der Kältemittel,) eine hinreichend genaue Berechnung der Kälteleistung ermöglichen soll. Dies betrifft sowohl theoretische Untersuchungen der kälte- und thermodynamischen Grundlagen als auch experimentelle Untersuchungen an einer kältetechnischen Feldanlage. Bei der Bewertung der Gesamtenergieeffizienz von Anlagen wurde neben aus der Literatur bekannten Ansätzen auf das Einheitsblatt VDMA 24247-Teil 7 mit den Kenngrößen TCOP (Total Coefficient of Performance) als Leistungszahl und TEPF (Total Energy Performance Factor) als Arbeitszahl Bezug genommen, die als Key Performance Indikatoren (KPI) den energetischen Zustand der Anlage beschreiben sollen.</p> <p>Als Basis für eine kontinuierliche energetische Bewertung und ein Energie-Monitoring von Kälteanlagen bedarf es geeigneter Hardware- und Software-Lösungen. Dazu wurden in diesem Vorhaben ausgehend von bereits vorhandenen Lösungen Konzepte entwickelt und gezielt weitere Komponenten und Software-Programme umgesetzt.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt ● An der Bornau 2 ● 49090 Osnabrück ● Tel 0541/9633-0 ● Fax 0541/9633-190					

### ***Ergebnisse und Diskussion***

Es wurden im Wesentlichen folgende Ergebnisse erzielt: Einerseits konnten in dem Vorhaben Grundlagen geschaffen werden, ob und wie die Energieeffizienz im laufenden Anlagenbetrieb (Online-Verfahren) unter technischen und wirtschaftlichen Kriterien mit einer hinreichenden Genauigkeit bewertet werden kann. Dazu wurden ausgehend von Literaturangaben und theoretischen Untersuchungen verschiedene Ansätze untersucht und bewertet. Als Ergebnis konnte festgestellt werden, dass die verfolgte Methodik grundsätzlich für eine Online-Bewertung von Kälteanlagen geeignet ist, aber noch einige technische und wirtschaftliche Hürden für den praktischen Einsatz bestehen. So ist z.B. für die kontinuierliche Auswertung eine hohe Abtastrate der zu erfassenden Prozessgrößen in Sekunden-Auflösung bei den heute eingesetzten Datenloggern nicht üblich, was wiederum eine hohe Rechenleistung und Speicherbedarf für eine kontinuierliche Archivierung erfordert. Eine weitere Hürde ist die erzielbare Genauigkeit des Verfahrens. Nach den Erkenntnissen ist für die in diesem Vorhaben beschriebenen indirekten Messverfahren in Verbindung mit dem üblichen Ein-/Aus-Taktbetrieb im laufenden Anlagenbetrieb von Gewerbekälteanlagen eine Messgenauigkeit unter 20 % nicht zu erwarten.

Ein weiteres Ergebnis wurde erzielt, indem durch intelligente Software-Algorithmen und Auswertungen aussagekräftige Auswertungen über den Anlagenzustand bezüglich energieineffizienter Betriebsweisen und intelligenter Überwachungs- und Diagnosefunktionen erstellt werden können. Damit lassen sich für den Betreiber und das Service-Personal von Kälteanlagen frühzeitig Indikatoren ableiten, ob und wie effizient eine Kälteanlage im laufenden Betrieb arbeitet. Hierzu wurden in dem Vorhaben ausgehend von einem intelligenten Kühlstellenregler relevante Betriebsparameter auf einem Datenlogger aufgezeichnet und anschließend über Software-Auswertungsprogramme aussagekräftige Darstellungen erstellt. So entstanden grafische Darstellungen in Form von sog. Carpet Plots, die in einer komprimierten Form Datenauswertungen über längere Zeiträume ermöglichen und zielgerichtete Hinweise auf Optimierungspotenziale erlauben.

Mit dem Vorhaben konnten somit wertvolle Erfahrungen gesammelt werden, welche grundsätzlichen Möglichkeiten aber auch Grenzen für eine Online-Bewertung der Energieeffizienz von Kälteanlagen bestehen.

### ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Ergebnisse des Vorhabens wurde auf folgender Veranstaltung durch einen Vortrag mit Veröffentlichung im Tagungsband präsentiert: Meyer, F.: Abtauung zum energetisch besten Zeitpunkt, Vortrag bei ZVKKW Supermarkt-Symposium Kälte- und Wärmeerzeugung im Lebensmitteleinzelhandel, Nürnberg, 5./6. April 2011

Des Weiteren wurde auf das Vorhaben bei der Messe Chillventa, Nürnberg, Oktober 2010 hingewiesen, bei dem das Unternehmen Cool Expert Entwicklungs GmbH als Aussteller mit einem Messestand vertreten war.

Zwischen- und Endergebnisse des Vorhabens wurden zudem mehrfach bei internen und externen Seminar- und Workshop-Veranstaltungen präsentiert.

Es ist geplant, weitere Vorträge und Veröffentlichungen nach Abschluss des Vorhabens zu verfassen.

### ***Fazit und Ausblick***

Die in diesem Vorhaben durchgeführten Untersuchungen und erzielten Ergebnisse liefern wichtige Erkenntnisse für den weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf von Online-Verfahren zur Erhöhung der Energieeffizienz von Kälteanlagen im laufenden Betrieb sowie von Energie-Monitoring-Systemen. Es wird erwartet, dass zukünftig Lösungen für die gewerbliche Kältetechnik angeboten werden, die durch das kontinuierliche Energie-Monitoring mit Energieeffizienzbewertung zu einer Energieeinsparung in der Größenordnung von 10-15 % führen. Bei einem jährlichen Verbrauch von 77.000 GWh elektrischen Endenergieverbrauch für kältetechnische Anwendungen in Deutschland kann das kontinuierliche Energie-Monitoring von Kälteanlagen damit einen signifikanten Beitrag zur Umweltschonung leisten.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zusammenfassung</b> .....	<b>8</b>
<b>2 Einleitung</b> .....	<b>9</b>
<b>3 Übersicht zu Energiekenngrößen für Kälteanlagen</b> .....	<b>14</b>
<b>4 Theoretische Ansätze zu Bestimmung der Energieeffizienz</b> .....	<b>18</b>
<b>5 Experimentelle Untersuchungen an einer Feldkälteanlage</b> .....	<b>23</b>
<b>6 Konzeption und Entwicklung von Hard- und Software</b> .....	<b>29</b>
6.1 Hardware.....	30
6.2 Software .....	35
<b>7 Verbreitung der Vorhabensergebnisse</b> .....	<b>43</b>
<b>8 Fazit</b> .....	<b>44</b>
<b>9 Literaturverzeichnis</b> .....	<b>45</b>

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1:</b> Ebenen der Bilanzbetrachtung zur energetischen Bewertung von Energiesystemen, [Beck08].....	14
<b>Abb. 2:</b> Systembild für die Kennzeichnung des Anlagenumfangs eines Kälteanlagen-Gesamtsystems (KAS), nach [Beck08].....	15
<b>Abb. 3:</b> Energieflusses von der Kälte-Erzeugung über die Kälte-Verteilung zur Kälte-Nutzung, [Beck08].....	15
<b>Abb. 5:</b> Abhängigkeit des Liefer- und Gütegrads von Verdichtern [CRH03] .....	20
<b>Abb. 4:</b> Realer und idealer Verdichtungsvorgang im log p,h Diagramm.....	22
<b>Abb. 6:</b> Messkonzept für Testanlage (Kühlzelle mit Kälteaggregate und Kühlstellenregler), [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH].....	23
<b>Abb. 7:</b> Spezifisches Auswerteprogramm zur Messdatenaufbereitung und Messdatendarstellung .....	24
<b>Abb. 8:</b> Temperatur am Verdichteraustritt als Indikator für die Dynamik im üblichen Taktbetrieb einer Gewerbekälteanlage.....	24
<b>Abb. 9:</b> Verlauf der Leistungszahl der Kälteanlage im laufenden Betrieb, berechnet nach Gl. 17 .....	25
<b>Abb. 10:</b> Einfluss des Faktors für den Verdichter-Wirkungsgrad auf die Leistungszahl.....	26
<b>Abb. 11:</b> Einfluß des Faktors der Verdichtereffizienz auf die mittlere Leistungszahl jeweils für stationären Betrieb und häufig taktenden Betrieb .....	26
<b>Abb. 12:</b> Konzeptstudie für zu entwickelndes webbasiertes Portal zur energetischen Analyse und Überwachung von Kälteanlagen und sonstigen technischen Anlagen für spezifische Zielkunden wie z.B. Supermarktbetreiber, [Cool Expert Entwicklungs GmbH] .....	29
<b>Abb. 13:</b> Datenlogger MIC EEC, Basis-Hardware für Datenarchivierung und Energie-Monitoring von Kälteanlagen [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH].....	31
<b>Abb. 14:</b> Datenlogger MIC EEC, Integrationsplattform für Regler, Prozessdaten und Energiezählern für ein webbasiertes Energie-Monitoring [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH].....	31
<b>Abb. 15:</b> Adaptiver, energieeffizienter Kühlstellenregler mit integriertem Alarm- und Störungsmanagement [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH] .....	33
<b>Abb. 16:</b> Beispiel für Anzeige und Auswertung der Energieverbräuche einer Kälteanlage mit einem busbasierten Energiezähler [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH, elektronischer Wirkenergiezähler Fa. Gossen Metrawatt].....	33
<b>Abb. 17:</b> Beispiel für busfähige Komponenten für analoge Eingänge für Temperatur- und Druckerfassung sowie digitale Eingänge [Bildquelle: BTRNetcom GmbH] .....	34
<b>Abb. 18:</b> Beispiel für funkbasierte Einbindung von Temperaturfühlern mit batterieloser EnOcean-Technologie [Bildquelle: Fa. Thermokon Sensortechnik GmbH] .....	34
<b>Abb. 19:</b> Beispiel für Konfigurationsmenue zur Einbindung von busfähigen Komponenten für Energiemessung und Temperatur-/Drucksensoren [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH].....	36
<b>Abb. 20:</b> Beispiel für webbasierte Datenaufzeichnung und –visualisierung von Energieverbräuchen und Druckverläufen der Kälteanlage [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH].....	36
<b>Abb. 21:</b> Beispiel für webbasierte Datenaufzeichnung und Detailanalyse von Anlagenzuständen und Temperaturverläufen für einen Kühl- und Abtauzyklus [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH].....	37
<b>Abb. 22:</b> Beispiel für Datenexport in Tabellenform [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH] .....	37
<b>Abb. 23:</b> Beispiel für webbasiertes Stör- und Alarmmanagement, u.a. zur frühzeitigen Meldung von energieineffizientem Betrieb [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH] .....	38

<b>Abb. 24:</b> Beispiel für ein übliches Liniendiagramm und für die neue Darstellung als Carpet Plot für verdichtete Auswertung von Messdaten, [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH].	39
<b>Abb. 25:</b> Beispiel für ein tabellengeführtes HACCP-Protokoll, [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH]	40
<b>Abb. 26:</b> Beispiel für Verlauf der Kühlraumtemperatur bei einer Teststudie an einer realen Anlage zur Analyse von unterschiedlichen Regelungskonzepten für eine energetische Sanierung und Optimierung	41
<b>Abb. 27:</b> Beispiel für Verlauf der Verdampferoberflächentemperatur bei einer Teststudie an einer realen Anlage zur Analyse von unterschiedlichen Regelungskonzepten für eine energetische Sanierung und Optimierung	41
<b>Abb. 28:</b> Beispiel für Temperaturverläufe an einer realen Anlage zur Analyse der Temperaturen in einem Käserregal in einem Lebensmittelmarkt	42
<b>Abb. 29:</b> Beispiel für Überwachung und Analyse der Temperaturverläufe in einem Tiefkühlschrank in einem Lebensmittelmarkt	42

## Symbolverzeichnis

### Formelzeichen:

$h$	spezifische Enthalpie [J/kg]
$\dot{m}$	Massenstrom [kg/s]
$P$	Leistung [W]
$Q$	Kälteenergie [kWh]
$\dot{Q}$	Kälteleistung [W]
$t$	Zeit [s] bzw. [h]
$T$	Temperatur [K]
$\varepsilon$	Leistungszahl [-]
$\vartheta$	Temperatur [°C]
$\lambda$	Liefergrad Verdichter [-]
$\eta$	Wirkungsgrad; Gütegrad [-]
$V$	Volumen [m <sup>3</sup> ]

### Abkürzungen:

COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
KPI	Key Performance Indice
SPF	Seasonal Performance Factor
TCOP	Total Coefficient of Performance (Leistungszahl), nach VDMA 24247-7
TEPF	Total Energy Performance Factor (Arbeitszahl), nach VDAM 24247-7

### Indizes:

c	Carnot
c	Verflüssung
el	elektrisch
eff	effektiv
mech	mechanisch
o	Verdampfung
L	Luft
Verd	Verdampfer

## 1 Zusammenfassung

In diesem Vorhaben wurden Methoden und Verfahren zur energetischen Bewertungen von gewerblichen Kälteanlagen untersucht, die geeignet sind, die Energieeffizienz von Kälteanlagen im laufenden Betrieb zu erhöhen. Dies betrifft sowohl theoretische Untersuchungen der kälte- und thermodynamischen Grundlagen als auch experimentelle Untersuchungen an einer kälte-technischen Feldanlage.

Es wurden im Wesentlichen zwei Ziele verfolgt. Einerseits sollten Grundlagen geschaffen werden, ob und wie die Energieeffizienz im laufenden Anlagenbetrieb (Online-Verfahren) unter technischen und wirtschaftlichen Kriterien mit einer hinreichenden Genauigkeit bewertet werden kann. Dazu wurden ausgehend von Literaturangaben und theoretischen Untersuchungen verschiedene Ansätze untersucht und bewertet. Hierbei gilt es nicht nur den Aufwand (elektrische Leistungsaufnahme) sondern auch den Nutzen (Kälteleistung) in Form einer neu definierten Leistungszahl TCOP (Total Coefficient of Performance) bzw. einer Arbeitszahl, TEPF (Total Energy Performance Indicator) gemäß dem Einheitsblatt VDMA 24247-Teil 7, [VDMA11] zu messen und auszuwerten. Als Ergebnis konnte festgestellt werden, dass diese Methodik grundsätzlich für eine Online-Bewertung von Kälteanlagen geeignet ist, aber noch einige technische und wirtschaftliche Hürden für den praktischen Einsatz bestehen. So ist z.B. für die kontinuierliche Auswertung eine hohe Abtastrate der zu erfassenden Prozessgrößen in Sekunden-Auflösung bei den heute eingesetzten Datenloggern nicht üblich, was wiederum eine hohe Rechenleistung und Speicherbedarf für eine kontinuierliche Archivierung erfordert. Eine weitere Hürde ist die erzielbare Genauigkeit des Verfahrens. Nach den Ergebnissen ist für die in diesem Vorhaben beschriebenen indirekten Messverfahren in Verbindung mit dem üblichen Ein-/Aus-Taktbetrieb im laufenden Anlagenbetrieb eine Messgenauigkeit unter 20 % nicht zu erwarten.

Das zweite Ziel war, mittels intelligenter Software-Algorithmen und Auswertungen aussagekräftige Informationen über den Anlagenzustand bezüglich energieeffizienter Betriebsweise und intelligenter Überwachungs- und Diagnosefunktionen zu erhalten. Damit lassen sich für den Betreiber und das Service-Personal von Kälteanlagen frühzeitig Indikatoren ableiten, ob und wie effizient eine Kälteanlage im laufenden Betrieb arbeitet. Hierzu wurden in dem Vorhaben ausgehend von einem intelligenten Kühlstellenregler relevante Betriebsparameter auf einem Datenlogger aufgezeichnet und anschließend über Software-Auswertungsprogramme aussagekräftige Darstellungen erstellt. So entstanden grafische Darstellungen in Form von sog. Carpet Plots, die in einer komprimierten Form Datenauswertungen über längere Zeiträume ermöglichen und zielgerichtete Hinweise auf Optimierungspotenziale erlauben.

Die in diesem Vorhaben durchgeführten Untersuchungen und erzielten Ergebnisse liefern wichtige Erkenntnisse für den weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf von Online-Verfahren zur Erhöhung der Energieeffizienz von Kälteanlagen im laufenden Betrieb. Mit dem Vorhaben konnten wertvolle Erfahrungen gesammelt werden, welche grundsätzlichen Möglichkeiten aber auch Grenzen für eine Online-Bewertung der Energieeffizienz von Kälteanlagen bestehen. Als konkretes Ergebnis des Vorhabens konnten Algorithmen zur Visualisierung von Betriebszuständen aus Prozessdaten entwickelt werden. Es wird erwartet, dass zukünftig Lösungen für die gewerbliche Kältetechnik angeboten werden können, die durch das kontinuierliche Energie-Monitoring mit Energieeffizienzbewertung zu einer Energieeinsparung in der Größenordnung von 10-15 % führen. Bei einem jährlichen Verbrauch von 77.000 GWh elektrischen Endenergieverbrauch für kältetechnische Anwendungen in Deutschland kann das kontinuierliche Energie-Monitoring von Kälteanlagen einen signifikanten Beitrag zur Umweltschonung leisten.

Hinweis: Das Vorhaben wurde von der Deutsche Bundesstiftung Umwelt, die das Vorhaben über einen Zeitraum von 2 Jahren gefördert hat (Az: 27352). Für dies Förderung, die das Vorhaben und seine Ergebnisse erst möglich gemacht haben, sei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt ausdrücklich gedankt.

## 2 Einleitung

### Ausgangssituation

Das Thema Energieeinsparung von Kälteanlagen gewinnt immer mehr an Bedeutung. Das wachsende Umweltbewusstsein und die stark gestiegenen Energiepreise sensibilisieren die Betreiber von Kälteanlagen, die verstärkt nach energieeffizienten Lösungen nachfragen. Zur nachhaltigen, energetischen Bewertung von gewerblichen Kälteanlagen fehlt es jedoch derzeit noch an der erforderlichen Technologie, die es insbesondere dem Betreiber von Kälteanlagen erlaubt, den energetischen Zustand seiner Anlagen ständig im laufenden Betrieb beobachten und einfach bewerten zu können. Aus den Erfahrungen in der Praxis der Gewerbekälte, bei der Anlagen i.d.R. vom Kältehandwerk geplant und ausgeführt werden, kann davon ausgegangen werden, dass Kälteanlagen bereits ab Beginn der Inbetriebnahme energetisch nicht optimal ausgeführt und eingestellt sind. D.h. üblicherweise haben Kälteanlagen in der Praxis von Beginn an einen unnötig hohen Energieverbrauch, ohne dass dies dem Betreiber bewusst und bekannt ist. Erfahrungen aus anderen Bereichen der Gebäudetechnik lassen erwarten, dass hierdurch ein Energieeinsparpotenzial von 20-30 % erzielt werden kann. Nach einem Positionspapier des Forschungsinstituts Kältetechnik (FKT) sind in der Kältetechnik sogar Energieeinsparpotenziale von bis zu 40 % durch einen optimierten Anlagenbetrieb und effizientere Komponenten erreichbar.

In einer UBA-Studie<sup>1</sup> wird auf die Bedeutung eines Energie-Monitorings von Kälteanlagen als wichtiges Werkzeug für den Anlagenbetreiber in seinem Bemühen um eine zielgerichtete Energieeinsparung hingewiesen. Zudem wird in dieser Studie erwähnt, dass solche Regelungs- und Überwachungssysteme bisher noch nicht am Markt verfügbar sind. Auch ist abzusehen, so diese Studie, dass durch ein kontinuierliches Monitoring der Energieeffizienz zukünftig bei Kaufentscheidungen die Bedeutung der um ein vielfach höheren Betriebskosten gegenüber den einmal getätigten Investitionskosten über den gesamten Lebenszyklus einer Anlage transparent wird.

Nach einer Studie des DKV<sup>2</sup> aus dem Jahr 2002 beträgt der gesamte Energiebedarf zur technischen Erzeugung von Kälte in Deutschland 77.091 GWh/a, was einem Äquivalent von 40 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emission entspricht. Damit tragen Kälteanlagen zu 14% am gesamten Endenergieverbrauch für Strom (Bezugsjahr 1999) in der Bundesrepublik Deutschland bei. Der gesamte Energieverbrauch für Kälte verteilt sich auf die Bereiche Nahrungsmittel (Erzeugung, Lagerung, Transport, Verkauf, Haushalt) 67,0 %, der Klimatisierung (Büro- und Verwaltungsgebäude, Industrie, Handel, Schiene, Wasser, Luft) 21,7 %, der Prozesskälte (Chemie, Bauindustrie, Bergbau, Labor, Tieftemperatur) 9,1 % und Sonstiges (Medizin, Sport, Wehrtechnik) 2,2 %.

In vielen Anwendungen im Bereich Gewerbe, Dienstleistung und Handel (Gewerbekälte) wie z.B. Discounter, Supermärkte, Lebensmitteleinzelhandel, Bäckereien, Metzgereien und der Kühllogistik (Kältezentral- und -verteilager, Kühlcontainer, Kühltransporte) trägt die Kältetechnik häufig bis zu 50-60% am gesamten elektrischen Stromverbrauch bei. In diesem Bereich liegt noch ein enormes Energieeinspar- und Kostenoptimierungspotenzial brach, wenn es gelingt, kontinuierlich den energetischen Zustand der Anlage im laufenden Betrieb einer Kälteanlage zu bewerten und frühzeitig Informationen über eine reduzierte Energieeffizienz der Anlage zu erhalten. Dies erlaubt die Einleitung von frühzeitigen und zielgerichteten Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz von Kälteanlagen.

---

<sup>1</sup> Forschungsbericht 206 44 300 UBA-FB 001180: Vergleichende Bewertung der Klimarelevanz von Kälteanlagen und -geräten für den Supermarkt, ISSN 1862-4359

<sup>2</sup> DKV Statusbericht Nr.22: Energiebedarf für die technische Erzeugung von Kälte, Juni 2002

In der Praxis wird im Bereich der Gewerbekälte - wenn überhaupt - lediglich der Energieverbrauch erfasst und dies meistens nur für den gesamten Betrieb. Die genauen Energieverbrauchszahlen stehen häufig erst zeitlich verzögert und in einer unzureichenden Auflösung, z.B. über die Energieverbrauchsabrechnung zur Verfügung. Ineffektiv arbeitende Anlagen können damit meistens auch nicht herausgefunden werden, da deren Verbrauch im Gesamtverbrauch untergeht. Häufig ist nicht transparent, wie und wo es sich lohnt Energie einzusparen.

Viele Jahre der praktischen Erfahrung zeigen, dass gerade in diesem vom Kältehandwerk bedienten Bereich der Kältetechnik nicht davon ausgegangen werden kann, dass die geplanten und ausgeführten Anlagen mit der Inbetriebnahme energetisch optimal arbeiten. D.h. üblicherweise haben Kälteanlagen in der Praxis von Beginn an einen unnötig hohen Energieverbrauch, ohne dass dies dem Betreiber bewusst und bekannt ist. Bei gewerblichen Kälteanlagen sind die Gründe für hohe Betriebskosten (Energieverbrauch, Kühlgutverluste) neben falsch dimensionierten Anlagenkomponenten und schlecht ausgeführten Anlagensystemen auch vielfach der Einsatz simpler Automatisierungslösungen wie z.B. einfache Ein-/Aus-Steuerung von Kompressoren, energetisch ineffiziente Abtau-Steuerungen, falsch eingestellte Reglerparameter bedingt durch eine hohe Komplexität und hohe Anzahl an einzustellenden Parametern, ein niedriges Informationsmanagement sowie das Fehlen einer Online-Adaption oder automatischen Fehlererkennung und –Diagnose.

Diese Randbedingungen führen in der Praxis dazu, dass die Anlagen bei Einsatz einfacher Regelgeräte (Zweipunktregler) zwar vielfach ohne Störung laufen und die geforderten Temperaturen liefern („Es macht kalt“), aber dies bedingt durch eine niedrige Energieeffizienz häufig zu einem unnötig hohen Energieverbrauch führt. Dem Betreiber einer Kälteanlage ist i.d.R. nicht bewusst oder bekannt, dass seine Kälteanlage somit über viele Jahre des Betriebs energetisch schlecht bzw. ineffizient läuft.

Will man diese Situation verbessern, besteht ein Ansatz darin in automatisierter und systematischer Form neben dem Energieverbrauch (Aufwand) auch die bereitgestellte Kälteleistung (Nutzen) mit hinreichender Genauigkeit im laufenden Betrieb der Kälteanlagen zu erfassen, um letztlich Nutzen zu Aufwand und damit die Gesamt-Energieeffizienz von Kälteanlagen in Form eines Key Performance Indices (KPI) online, d.h. im laufenden Betrieb bewerten zu können. Dies ermöglicht es wiederum, dass der Betreiber die Gesamtenergieeffizienz seiner Kälteanlage über eine einfache Bewertungsskala (z.B. in Form einer „Energieampel“ oder eines „Energiecockpits“) direkt angezeigt bekommt. Denn der Betreiber hat schließlich das größte Interesse an einem ressourcenschonenden Energieeinsatz, zumal, wenn man berücksichtigt, dass gerade im gewerblichen Bereich die Energiekosten häufig in der Größenordnung der erzielbaren Rendite des Warenverkaufs liegen.

Ganz erheblich sind die Umweltauswirkungen hochgerechnet auf den Endenergieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Bundesrepublik Deutschland. Ausgehend von den Erfahrungen aus der Gebäudetechnik ist zu erwarten, dass durch die konsequente Nutzung eines Online-Verfahrens zur Bewertung der Energieeffizienz der Energieverbrauch von Kälteanlagen in Verbindung mit einer optimierten Betriebsführung um 20-30 % gesenkt werden kann. Überträgt man dies auf die eingangs genannten Zahlen für den Gesamtbedarf für Kälte in Deutschland, so ist hier ein theoretisches Potenzial von 15.420 - 23.130 GWh/a oder eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 8-12 Mio. t CO<sub>2</sub> erreichbar. Selbst wenn dieses theoretische Potenzial mittel- bis langfristig lediglich zu 20% ausgeschöpft wird, entspricht dies immerhin einer mittleren Einsparung von 3.080 – 4.625 GWh/a bzw. einer Reduzierung von 1,6-2,4 Mio. t CO<sub>2</sub>. Hierbei ist noch nicht berücksichtigt, dass wir in den nächsten Jahren mit einem weiteren steigenden Bedarf an installierter Kälteleistung zu rechnen haben.

## Zielsetzung

Die in diesem FuE-Vorhaben verfolgten Lösungsansätze zielen darauf ab, Methoden, Verfahren und technische Systeme (Hardware, Software) zu untersuchen und zu entwickeln, mit denen durch ein kontinuierliches Controlling und Energie-Monitoring die Gesamtenergieeffizienz von Kälteanlagen im laufenden Betrieb bewertet und verbessert werden kann. Die dadurch entstehende Transparenz ermöglicht u.a. auch das frühzeitige Erkennen eines erhöhten und unnötigen Energieverbrauchs, und macht diese für den Betreiber gewerblicher Kälteanlagen transparent.

Um die Energieeffizienz einer Kälteanlage bewerten zu können, ist es notwendig neben dem Energieverbrauch (Aufwand) durch Messung mittels Energiezähler auch die bereitgestellte Kälteleistung (Nutzen) mit hinreichender Genauigkeit im laufenden Betrieb der Kälteanlagen zu erfassen, um letztlich Nutzen zu Aufwand und damit die Gesamt-Energieeffizienz von Kälteanlagen in Form eines oder mehrerer Key Performance Indices (KPI) im laufenden Betrieb bewerten zu können.

Während der Aufwand (elektrischer Energieverbrauch) bei den i.d.R. elektrisch betriebenen Kälteanlagen vergleichsweise einfach über einen üblichen elektrischen Energiezähler gemessen werden kann, gestaltet sich die Messung des Nutzens (Nutz-Kälteleistung) ungleich schwieriger.

Bei sogenannten indirekten Kälteanlagen ist es zwar grundsätzlich möglich, die Kälteleistung auf dem wasserseitigen Kühlkreislauf mit Hilfe eines üblichen Kältemengenzählers durch Messung des Massenstromes und der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf zu messen. Dies ist bei größeren Kälteanlagen (> 50 kW) auch durchaus üblich. Bei Anlagen kleinerer Leistung ist allerdings aus Kostengründen i.d.R. kein Kältemengenzähler vorhanden. Wesentlich schwieriger ist die Situation zudem bei direkten Kälteanlagen, die in der Gewerbekälte häufig eingesetzt werden. Bei den direkten Kälteanlagen, d.h. bei denen der Wärmeübertrager als Direktverdampfer unmittelbar an der Kühlstelle angeordnet ist und die abzuführende Wärme luftseitig über den Verdampfer direkt auf den Kältemittelkreislauf übertragen wird, ist eine direkte Messung der Kälteleistung in der Praxis im laufenden Anlagenbetrieb bisher nicht möglich. Dies ist lediglich unter Laborbedingungen z.B. zur Leistungsmessung von Wärmeübertragern oder punktuell bei definierten Betriebspunkten mit entsprechend aufwändigen Messeinrichtungen möglich.

## Aufgabenstellung

Eine wesentliche Aufgabenstellung des Vorhabens war es, geeignete Hardware und Software zu entwickeln, auf deren Basis ein indirektes Verfahren zur Energieeffizienzbewertung und Werkzeuge für ein kontinuierliches Energie-Monitoring von Kälteanlagen implementiert werden können. Hierdurch kann ein signifikanter Beitrag zur Energieeffizienz von Kälteanlagen geleistet werden, indem für den Betreiber frühzeitig überhöhte Energieverbräuche (z.B. durch falsche Reglereinstellungen, Kältemittelleckagen, schlecht eingestellte Expansionsventile) protokolliert und angezeigt werden.

Für die Umsetzung des zu erforschenden Verfahrens in Form eines wissensbasierten Algorithmus konnte auf bereits bestehende Hard- und Software-Lösungen der Fa. Cool Expert aufgebaut werden, die allerdings in diesem Vorhaben neben den theoretischen und experimentellen Untersuchungen noch erheblich angepasst und weiterentwickelt werden musste.

Von der Firma Cool Expert wurden in der Vergangenheit bereits adaptive, wissensbasierte Kühlstellenregler entwickelt, auf deren bereits erfassten Messgrößen für das neu zu entwickelnde Verfahren zurückgegriffen werden kann. Die Idee besteht darin, die für die Steuerung und Regelung der Anlage bereits vorhandenen Messgrößen (z.B. Kühlstellentemperatur, Schaltzustände Aggregate) aus dem Kühlstellenregler um weitere Messgrößen (z.B. Verdichterein- und austrittstemperaturen, Anlagendrucke, elektrischer Energieverbrauch) zu ergänzen, über ent-

sprechende Kommunikationssysteme auf dem Datenlogger EEC zu erfassen und zur weiteren Archivierung und Auswertung dem zu entwickelnden Verfahren zur Energieeffizienzbewertung zuzuführen. Zusätzlich werden ergänzende Anlagenkenngrößen und -parameter (z.B. Kältemittel-Stoffdaten) in einer internen Datenbank hinterlegt. Als Ergebnis soll die aktuelle Gesamtenergieeffizienz der Anlage als Leistungszahl TCOP (Total Coefficient of Performance) und Energieeffizienzkennzahl TEPF (Total Seasonal Performance Factor) in Anlehnung an das VDMA Einheitsblatt 24247 VDMA11] ausgewiesen werden.

Eine wesentliche Grundlage für die hierzu erforderliche Hardware besteht in dem Datenlogger EEC, der von der Firma Cool Expert aktuell entwickelt wurde und sich gerade in der Markteinführung befindet. Der Datenlogger ermöglicht das Auslesen aller Kühlstellenregler und Erfassen weiterer Prozessdaten (z.B. Drucksensoren, elektrischer Verbrauch) und deren Archivierung. Über verschiedene Schnittstellen (Ethernet, Funk-Modem, Analog-/ISDN-Modem) können diese Daten auf einen webbasierten Rechner zur weiteren Auswertung und Visualisierung übertragen werden. In Verbindung mit dem bereits vorhandenen wissensbasierten, selbstoptimierenden Kühlstellenregler QKL mini2, der über ein integriertes Störmanagement verfügt und auf dessen interne Prozessgrößen zugegriffen werden und dem vom Antragsteller neu entwickelten Datenlogger ist mit entsprechenden zusätzlichen Hard- und Softwareentwicklungen eine technische Plattform geschaffen, um dieses innovative Verfahren in Form von Hardware und Software umsetzen zu können.

Durch das neue, webbasierte Verfahren in Verbindung mit dem Datenlogger, kann die Überwachung von gewerblichen Kälteanlagen jederzeit von jedem Ort der Welt erfolgen und gleichermaßen von unterschiedlichen Zielgruppen genutzt werden (Betreiber, Servicepersonal, Energiemanager usw.).

In diesem Vorhaben ist die Weiterentwicklung von Hardware und Software hinsichtlich folgender Funktionalitäten und Parameter vorgesehen:

#### Hardware

- Erweiterung für bis zu 256 Analog- und Digitaleingänge
- Erweiterung der Anbindung auf max. 124 Kühlstellen (Kühlräume, Kühlmöbel)
- Einstellbarer Datenaufzeichnungszyklus von 1 Sekunde bis 15 Minuten
- Störfallerfassung, -bearbeitung und Weiterleitung
- Temperaturbereich minus -70 bis +70 °C
- Druckbereich 0 - 10 / 25 bar
- Anbindung an Systeme unterschiedlicher Hersteller

#### Software

- Temperaturlaufzeichnung für Kühlstellen (z.B. Verkaufsgondeln, Tiefkühltruhen, Kühlregale, Tiefkühlager, Moprolager, etc.)
- Temperaturwetterfassung alle 15 Minuten für jeden Datenpunkt (bei Störungen oder Abweichungen Erfassung im Sekundentakt)
- Übermittlung der erfassten Temperaturdaten an Servicezentrale via Internet
- Langzeitspeicherung der Temperaturdaten in Servicezentrale, gleichermaßen muss eine Sicherheit der erfassten Daten auch im Störfall gewährleistet sein.
- Druck- und Temperaturlaufzeichnung der Kältemaschine (Hochdruck, Niederdruck)
- Aufnahme der elektrischen Leistung des Verdichters inkl. Hilfsenergien

- Hinterlegen Anlagenparameter (z.B. Kältemittel, Verdichter- und Verdampfertyp)
- Zugriffskontrolle – Filialleiter sollen Daten der eigenen Filiale sehen, Baubetreuer soll Daten der von ihm betreuten Filialen sehen, Zentrale soll alle Daten einsehen können.

Neben der Weiterentwicklung und Anpassung der Hardware-Komponenten ist es erforderlich, möglichst flexibel und kostengünstig Fremdprodukte (z.B. Regelkomponenten anderer Hersteller, Energiezähler, Messmodule) über geeignete Kommunikations- und Bussysteme zu integrieren, um zusätzlich erforderliche Prozessgrößen, Energieverbräuche und Anlagenzustände zu erfassen.

### 3 Übersicht zu Energiekenngrößen für Kälteanlagen

#### Systembetrachtung

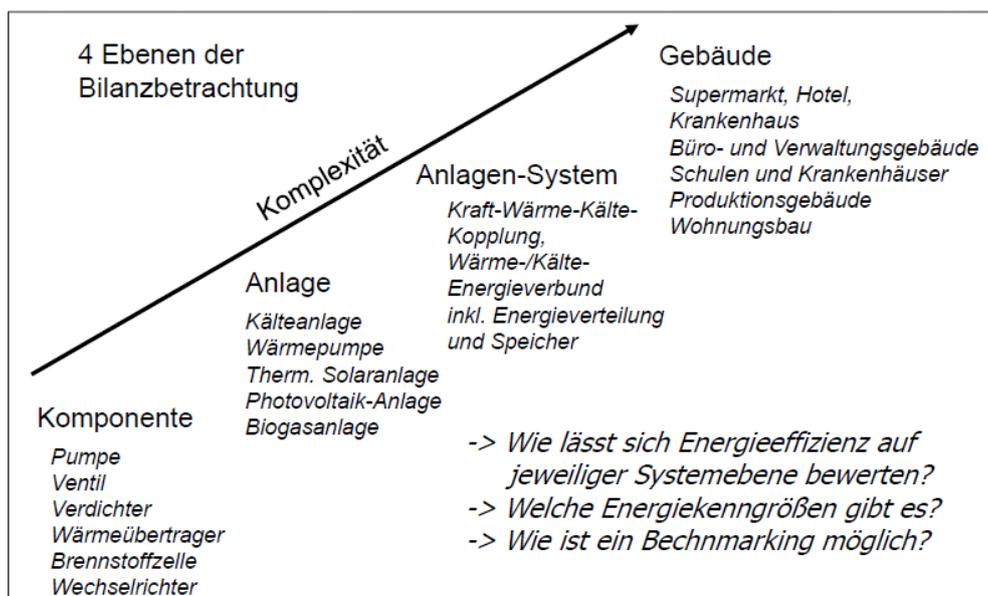
Die folgenden Ausführungen stellen im wesentlichen eine Zusammenfassung der Veröffentlichungen von [Beck08] und des VDMA Einheitsblattes 24247 Teil 7 [VDMA11] dar, auf die im weiteren Verlauf für die theoretischen Untersuchungen aufgebaut wurde.

Aufgrund des zunehmenden Strebens nach höherer Energieeffizienz gewinnt die energetische Bewertung von Kälteanlagen eine immer größere Bedeutung. Dies gilt sowohl für einzelne Komponenten (z.B. Verdichter, Wärmeaustauscher) als auch für einen Kältemittelkreislauf aber auch für eine gesamte Kälteanlage inkl. Energieverteilung bis zur Nutzenübergabe. Mit Hilfe passender Messtechnik und unter Einsatz von standardisierten Bus- und Kommunikationssystemen können energetische Größen immer kostengünstiger und genauer gemessen werden und als berechnete Energiekenngrößen zur energetischen Bewertung von Anlagen herangezogen werden.

Der systematischen Energieeffizienz-Bewertung und eindeutigen Vergleichbarkeit von Anlagen im Sinne eines Benchmarkings stehen allerdings drei wesentliche Hürden entgegen, [Beck08]:

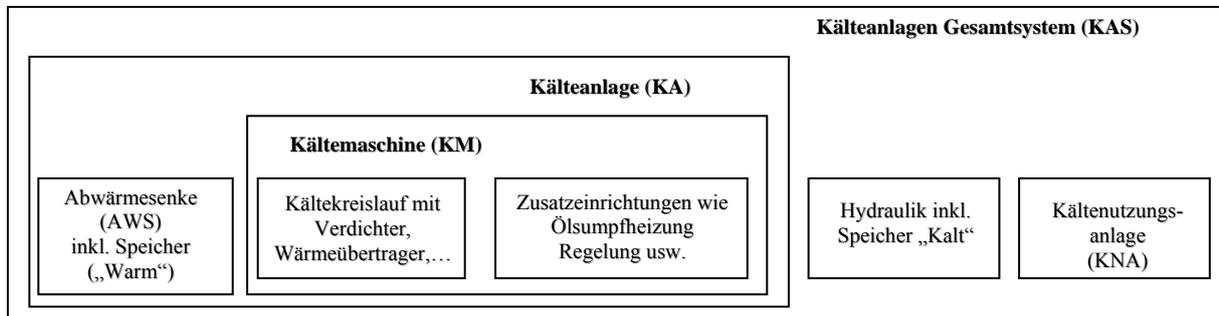
- Die eindeutige Definition der zu betrachtenden Bilanzhülle mit Festlegung einer eindeutigen Systemgrenze
- Die eindeutige Definition und Berechnung von Energieeffizienz-Kenngrößen
- Die Festlegung eindeutiger und verbindlicher Messkonzepte

Wichtig für die energetische Bewertung von Energiesystemen sind eine eindeutige und transparente Festlegung der Systemgrenzen und des Bilanzierungsraumes. Abbildung 1 zeigt dazu vier Ebenen der Bilanzierung mit Auflistung typischer Beispiele, bezogen auf unterschiedliche Bilanzräume wie Komponenten (Aggregate), Anlagen, Anlagensysteme und ganze Gebäude.



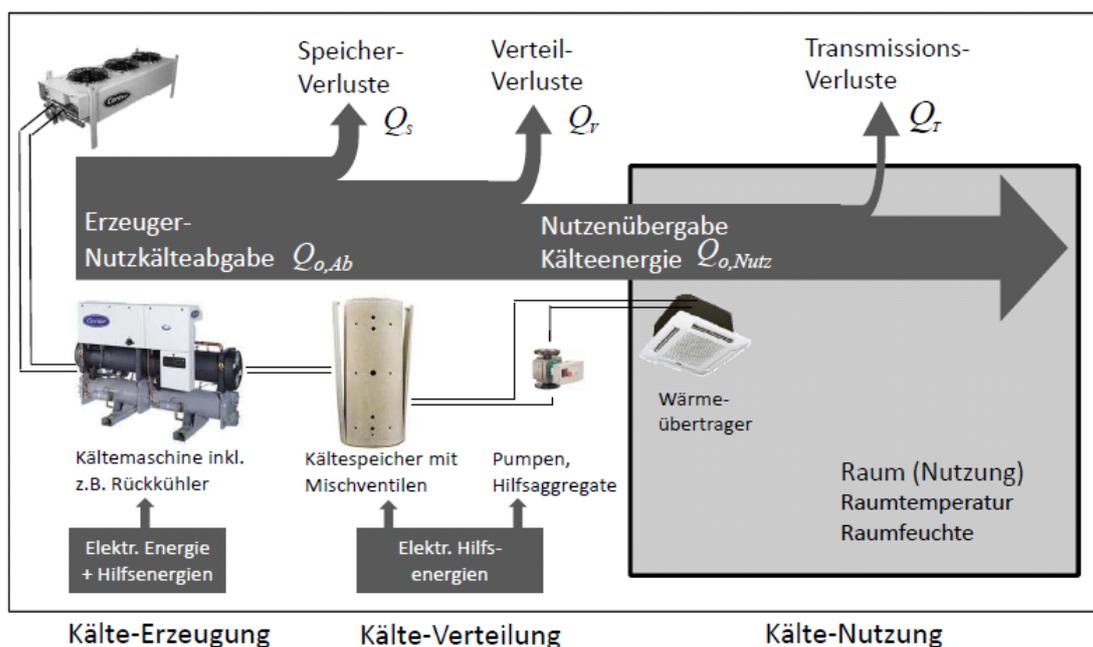
**Abb. 1:** Ebenen der Bilanzbetrachtung zur energetischen Bewertung von Energiesystemen, [Beck08]

Kälteanlagen gemäß Abbildung 1 sind nach dieser Einteilung der Ebene „Anlage“ zuzuordnen. Um gemessene energetische Kenngrößen nun eindeutig einer bestimmten Bilanzgrenze zuzuordnen zu können, bedarf es deren eindeutigen Bezeichnung. In Anlehnung an VDI 2067-Teil 6, die sich mit Wärmepumpenanlagen beschäftigt, wird für eine Systemabgrenzung eines kältetechnischen Gesamtsystems als Kälteanlagen-Gesamtsystem (KAS) eine Terminologie nach Abbildung 2 vorgeschlagen.



**Abb. 2:** Systembild für die Kennzeichnung des Anlagenumfangs eines Kälteanlagen-Gesamtsystems (KAS), nach [Beck08]

Der Energiefluss von der Kälteerzeugung über die Kälteverteilung zur Kältenutzung ist in Bild 8 dargestellt. Ausgehend von der bereitgestellten Erzeuger-Nutzkälteabgabe  $Q_{o,ab}$  der Kälteanlage steht abzüglich der auftretenden Verluste (Speicherverluste, Verteilverluste) die für die Kälteanwendung nutzbare Nutz-Kälteenergie  $Q_{o,nutz}$  an der Kälteübergabe zur Verfügung. Als Aufwand müssen einerseits die elektrischen Energie für die Kältemaschine bzw. das Kälteaggregat als auch alle Energien für die Hilfsaggregate aufgebracht werden. Entscheidend für die energetische Bewertung einer Kälteanlage ist die Festlegung der Systemgrenze zur Bilanzierung von Nutzen zu Aufwand.



**Abb. 3:** Energieflusses von der Kälte-Erzeugung über die Kälte-Verteilung zur Kälte-Nutzung, [Beck08]

## Übersicht zu energetischen Kenngrößen von Kälteanlagen

Kennzahlen zur energetischen Bewertung einer Komponente, eines Gerätes oder einer ganzen Anlage stellen immer das Verhältnis des Nutzens zum Aufwand dar. Beispiele für technische Geräte oder Systeme sind z.B. der Wirkungsgrad von Motoren oder die Leistungszahl von Wärmepumpen. Wichtig hierbei ist jedoch gleichzeitig der Bezug zur gewählten Bilanzgrenze und zur genauen Definition, was der Nutzen und was der Aufwand darstellt. Außerdem ist darauf zu achten, ob als Verhältnis leistungsbezogene oder energiebezogene Größen herangezogen werden. Auch ist darauf zu achten, ob es sich bei den angegebenen Werten um Messungen im Labor bzw. vorgegeben Testbedingungen handelt oder um in realen Anlagen im laufenden Betrieb gemessene Werte. Wichtig ist schließlich zu unterscheiden, ob sich diese Kenngrößen auf einzelne Komponenten beziehen (z.B. Verdichter, Wasser-/Luftkühler) oder auf komplette Anlagen (z.B. Wärmepumpen, Kaltwassersätze).

Als Teil der theoretischen Untersuchungen wurden in der Literatur wie z.B. [DKV05], [ReSp08], [Cub97], nach bereits vorhandenen Kennzahlen zur Bewertung von Kälteanlagen mit Bezug zu dem in diesem Vorhaben zu entwickelnden Verfahren recherchiert. Des Weiteren wird auf die Zusammenstellung von Kenngrößen nach [Beck08] zurückgegriffen.

Für die energetische Bewertung von Kältemaschinen bzw. Wärmepumpen werden - teilweise basierend auf Normen oder Richtlinien - mehrere, zum Teil unterschiedliche, aber auch zum Teil mehrfach verwendete energetische Kenngrößen verwendet.

Typische energetische Kenngrößen sind:

Leistungskenngrößen (Verhältnis Nutzleistung zur aufgenommenen Leistung):

- Kälteleistungszahl  $\varepsilon_K$  (Carnot, effektiv, isentrop, innere, äußere)
- Gütegrad  $\eta$  (Carnot, isentrop, real)
- Wirkungsgrad  $\eta$  (mechanisch, elektrisch)
- COP (Coefficient of Performance)
- EER (Energy Performance Ratio)
- ESEER (European Seasonal Energy Efficient Ratio)
- IPLV (Integrated Part Load Value)

Energie-Kenngrößen (Verhältnis Nutzenergie zu aufgenommener Energie):

- Jahresarbeitszahl JAZ bzw.  $\beta$
- Seasonal Performance Factor SPF

Ausgehend von den thermodynamischen Grundlagen sind im Folgenden einige Definitionen für wichtige energetische Bewertungsgrößen zusammengestellt, die grundsätzlich für die Verwendung in diesem Vorhaben in Frage kommen können.

Zur energetischen Bewertung von Arbeitsmaschinen (linksläufiger Kreisprozess) wird üblicherweise die Leistungszahl  $\varepsilon$  herangezogen:

Für den (idealen) Kältemaschinen-Betrieb gilt die *Carnot-Kälteleistungszahl*:

$$\varepsilon_{K,C} = \frac{T_0}{T_C - T_0} \quad (\text{Gl. 1})$$

Als *effektive (oder auch tatsächliche) Kälteleistungszahl* wird das Verhältnis der tatsächlichen gemessenen Kälteleistung zur tatsächlichen gemessenen Antriebsleistung bezeichnet.

$$\varepsilon_{K,eff} = \frac{\dot{Q}_0}{P} \quad (\text{Gl. 2})$$

Hierbei wird die Kälteleistung z.B. nach EN 12900, ermittelt und für die Leistung wird bei offenen Verdichtern die Antriebsleistung an der Welle  $P_{mech}$  und bei halbhermetischen oder hermetischen Verdichtern die elektrische Anschlussleistung  $P_{el}$  herangezogen.

Aus der gemessenen elektrischen Anschlussleistung lässt sich über die Beziehung

$$P_{mech} = \eta \cdot P_{el} \quad (\text{Gl. 3})$$

mit dem Motor-Wirkungsgrad  $\eta$  die mechanische Wellenleistung bestimmen.

Diese effektive Kälteleistungszahl wird in der Praxis häufig auch als COP (Coefficient of Performance) bezeichnet, was leider zur Verwirrung führen kann, da der COP nach DIN EN 14511 bereits als Wärmeleistungszahl für Wärmepumpen im Heizbetrieb definiert ist.

Das Verhältnis von effektiver Leistungszahl und der Carnot-Leistungszahl bei einer Verdichter-Kältemaschine bzw. gesamten Kälteanlage wird nach [DKV05] als Carnot-Gütegrad oder reversibler Gütegrad bezeichnet:

$$\eta_c = \frac{\varepsilon_{K,eff}}{\varepsilon_{K,C}} \quad (\text{Gl. 4})$$

Welche konkrete Kälteleistung (Gesamt-, Netto- oder Nutzkälteleistung) zu welcher konkreten Aufwands-Leistung (Wellenleistung, Klemmenleistung, Leistungen für Hilfsaggregate) zur Ermittlung der berechneten Kälteleistungszahl ins Verhältnis gesetzt werden soll, wird allerdings nach [DKV05] nicht festgelegt.

Im Folgenden werden weitere in der Praxis verwendete energetische Kenngrößen aufgelistet, die zum Teil für Leistungsmessungen einzelner Komponenten oder Systeme (z.B. Kaltwassersatz, Chiller) auf dem Prüfstand, d.h. unter Laborbedingungen definiert sind:

- Kälteleistungszahl EER (Energy Efficiency Ratio) für Kältemaschinen im Volllastbetrieb und unter Prüfbedingungen (nach EUROVENT)
- Kälteleistungszahl ESEER (European Seasonal Energy Efficiency Ratio) nach EUROVENT für Kältemaschinen, Kaltwassersätze (Chiller) und Wärmepumpen im Kühlbetrieb mit Berücksichtigung des Teillastbetriebs
- Wärmeleistungszahl COP (Coefficient of Performance) für Wärmepumpen (nach DIN EN 14511, DIN EN 15450 bzw. EN 255)
- Jahresarbeitszahl JAZ oder  $\beta$  (engl. SPF-Seasonal Performance Factor) nach prEN 15316-4-2
- Teilleistungszahl IPLV (Integrated Part Load Value) nach ARI 550/590-98

Will man nun eine energetische Bewertung von Kälteanlagen-Gesamtsystemen im laufenden Betrieb unter Berücksichtigung der Kältemaschine, der Energieverteilung (Hydraulik), der Nutzenübergabe (z.B. Wärmeaustauscher) inkl. der erforderlichen Steuer- und Regelungstechnik mit allen Hilfsenergien durchführen, ist es erforderlich, auch hierzu eine genaue Bilanzierung mit eindeutigen Systemgrenzen durchzuführen.

## 4 Theoretische Ansätze zu Bestimmung der Energieeffizienz

Im VDMA Einheitsblatt 24247, Teil 7 [VDMA11] werden Effizienz-Kenngrößen vorgeschlagen, mit denen Kälteanlagen im laufenden Betrieb hinsichtlich ihrer Energieeffizienz bewertet werden können. Wichtig hierbei ist es, dass es sich hierbei um Kenngrößen handelt, die nicht unter Labor- bzw. Prüfbedingungen ermittelt werden, sondern dass diese Kenngrößen grundsätzlich im praktischen Betrieb an realen Anlagen kontinuierlich gemessen werden können. Allerdings gibt es bisher hierzu noch keine praktischen Erfahrungen zur Anwendung dieser Kenngrößen an realen Anlagen in der Praxis.

In Analogie zur Betrachtung bei Wärmepumpen mit der Leistungszahl bzw. COP als leistungsbezogene Kenngröße und der Jahresarbeitszahl bzw. SPF als energetische Kenngröße werden in dem Einheitsblatt sowohl eine leistungsbezogene, als auch eine energiebezogene Kenngröße für Kälteanlagen eingeführt.

Die leistungsbezogene Kenngröße **TCOP** (*Total Coefficient of Performance*) ist definiert zu:

$$TCOP = \frac{\dot{Q}_{0,Nutz}}{\sum P_{el,i}} \quad (\text{Gl. 5})$$

Die Größe **TCOP** ist eine Leistungszahl und erlaubt somit eine energetische Momentan-Bewertung der Kälteanlage.

Als energetische Effizienz Kenngröße wird die Arbeitszahl

**TEPF** (*Total Energy Performance Factor*) definiert gemäß:

$$TEPF = \frac{\dot{Q}_{0,Nutz} * t}{\sum_i P_{el,i} * t_i} = \frac{\int_{t1}^{t2} \dot{Q}_{0,Nutz} dt}{\sum_i (\int_{t1}^{t2} P_{el,i} dt_i)} \quad (\text{Gl. 6})$$

Die Größe **TEPF** ist eine Arbeitszahl, wobei als Zeitperiode ein Tag, eine Woche, ein Monat oder ein Jahr gewählt werden kann. Da mit dieser Größe alle elektrischen Energien inkl. der Hilfsenergien erfasst werden und mit der bereitgestellten Nutz-Kälteenergie ins Verhältnis gesetzt werden, ist mit dem **TEPF** somit eine energetische Bewertung einer Kälteanlage über einen definierten Zeitraum im laufenden Betrieb möglich.

Grundsätzlich sind beide Kenngrößen bei jedem Kälteanlagen-System messtechnisch erfassbar. Das (theoretische) Messkonzept nach VDMA 24247–Teil 7 erfordert eine kontinuierliche Überwachung und Aufzeichnung der relevanten Betriebs- und Energieparameter. Es ist angelehnt an die DIN EN 15450, [DIN07] und sieht wie folgt aus:

„Direkte Messmethode“ bei indirekten Kälteanlagen:

- Kontinuierliche direkte Messung der elektrischen Leistungen aller Aggregate (inkl. der Hilfskomponenten) mit digitalen bzw. auslesbaren Elektrozählern
- Kontinuierliche direkte Messung der Nutz-Kälteleistung mit Hilfe eines Kältemengen-zählers (oder separat Vor-/Rücklauftemperatur und Massenstrom) als externes Verfahren
- Hieraus Ermittlung der Leistungszahl **TCOP** sowie Arbeitszahl **TEPF** über festzulegenden Zeitraum (z.B. Monat)

„Indirekte Messmethode“ bei direkten Kälteanlagen:

- Kontinuierliche direkte Messung der elektrischen Leistungen aller Aggregate (inkl. der Hilfskomponenten) mit digitalen bzw. auslesbaren Elektrozählern
- Kontinuierliche direkte Messung der Nutz-Kälteleistung mittels indirekter Messung über ein Kältemittelbilanzverfahren (internes Verfahren)
- Hieraus Ermittlung der Leistungszahl TCOP sowie Arbeitszahl TEPF über festzulegenden Zeitraum (z.B. Monat)

Während die direkte Messmethode bei indirekten Kälteanlagen (z.B. Kaltwassersatz) grundsätzlich mit bekannter Messtechnik und Messverfahren umgesetzt werden kann, gibt es für die indirekte Messmethode zurzeit noch keine standardisierten und etablierten Verfahren für eine kontinuierliche Messung in der Praxis. Genau in diese Richtung zielen daher die hier vorgesehenen Untersuchungen und Entwicklungen.

Am Institut für Gebäude- und Energiesysteme der Hochschule Biberach wurden erste Erfahrungen mit der direkten Messmethode bei Kaltwassersätzen gesammelt und der Nutzen für eine optimierte Betriebsführung an realen Anlagen aufgezeigt, [BeKo2011]. Erfahrungen mit Auswertungen nach der indirekten Methode wurden allerdings nicht erwähnt.

### Theoretische Untersuchungen zur direkten Messmethode

Die Energieeffizienzbewertung von direktverdampfenden Kälteanlagen erfolgt wie bei allen thermodynamischen Kreisprozessen durch das Bilden des Verhältnisses von Nutzen zu Aufwand. Als Nutzen wird die zur Verfügung gestellte Nutz-Kälteleistung  $\dot{Q}_0$  und als Aufwand die Summe aller aufgewendeten elektrischen Leistungen  $P_{el}$  für die Komponenten im Kältesystem (Verdichter, Ventilatoren, Pumpen, sonstige Hilfsenergie) zur Bereitstellung der Kälteleistung betrachtet. Hierbei ist folglich zu berücksichtigen, dass sich der elektrische Aufwand je nach Bilanzgrenze ändert. Es kann eventuell sinnvoll sein, bei einer Anlage mehrere Bilanzgrenzen festzulegen und für jede Bilanzgrenze einen entsprechenden TCOP bzw. TEPF nach Gleichung (5) bzw. (6) auszuweisen.

Bei den folgenden Betrachtungen wird die Bilanzgrenze bei der Kälteanlage (KA) gemäß Abbildung 2 gezogen und dazu erst einmal nur die elektrische Leistung, die der Verdichter benötigt, betrachtet. Diese Leistung wird als Leistung  $P_{\text{v}}$  bezeichnet.

Um eine Energieeffizienzbewertung während des Anlagenbetriebs durchführen zu können, müssen die benötigten Größen Kälteleistung und elektrische Leistung des Verdichters gemessen werden. Die elektrische Leistung kann mit einem üblichen elektrischen Leistungsmessgerät mit geeigneter Messklasse gemessen werden, und ist nach dem Stand der Technik bei sorgfältiger Installation problemlos möglich.

Die Messung der Kälteleistung nach einem indirekten Verfahren ist grundsätzlich ebenfalls technisch möglich. Für die Berechnung der internen, d.h. auf den Kältemittelkreislauf bezogenen Kälteleistung müssen zwei Temperaturen (vor dem Expansionsventil und nach dem Verdampfer) und an den jeweils gleichen Stellen der Druck gemessen werden. Zusätzlich muss der Massenstrom des Kältemittels gemessen werden, um die Kälteleistung berechnen zu können.

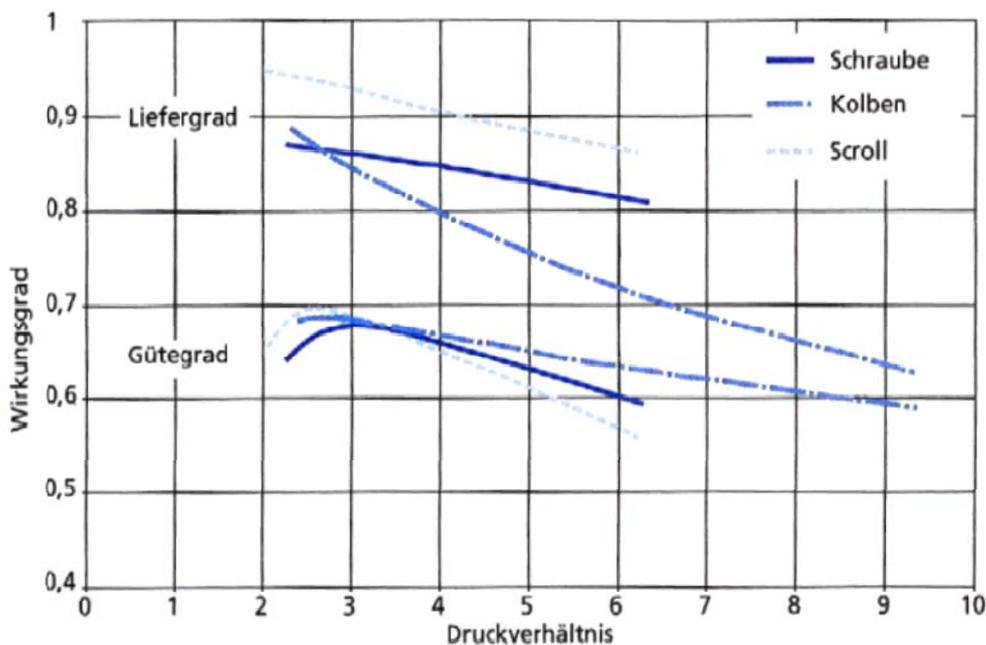
Das Messen von Drücken und Temperaturen im Kältemittelkreislauf ist nach dem Stand der Technik einfach möglich und kann vergleichsweise kostengünstig umgesetzt werden. Die Massenstrommessung ist zwar ebenfalls nach dem Stand der Technik möglich, aber mit der heute am Markt verfügbaren Sensortechnik nur mit sehr kostenintensiver Messtechnik z.B. über eine Messung mittels Coriolis-Sensor zu realisieren. Auf Grund der hohen Kosten für die Messtechnik wird diese Methode hauptsächlich in Wissenschaft und Forschung bzw. im Laborbetrieb bei

genau definierten Test-Bedingungen eingesetzt. Ein flächendeckender Einsatz dieser hochgenauen Messtechnik in der breiten Praxis ist auch in Zukunft aus Kostengründen nicht absehbar.

Daher liegt es nahe, Verfahren zur Energieeffizienzbewertung von direktverdampfenden Kompressionskälteanlagen ohne Massenstrommessung zu untersuchen. Solche Verfahren sind aus theoretischer und technischer Sicht auch grundsätzlich möglich. Ein vergleichbares Verfahren wird in [Ber87] bereits in einer Patentschrift von 1987 beschrieben. Das Verfahren beruht allerdings auf der Annahme bzw. Vorgabe eines bekannten und festen Verdichter-Wirkungsgrads  $\eta_T$ . Nach diesem Verfahren wurde dieser Wirkungsgrad aufgrund umfangreicher experimenteller Untersuchungen an halb-hermetischen Verdichtern verschiedenster Hersteller empirisch ermittelt. Daraus folgernd wird im Ergebnis für den Wirkungsgrad ein fester Wert von 90 – 95% vorgeschlagen [Ber10]. Mittlerweile gibt es auch auf Basis dieses Verfahrens ein kommerzielles Produkt, genannt ClimaCheck, mit dem nach Angaben des Herstellers insbesondere energetische Untersuchungen für die Inbetriebnahme und temporäre Prüfung von Klimageräten, Lüftungsgeräten und Wärmepumpen durchgeführt werden können. Inwieweit dieses Verfahren auf die speziellen Randbedingungen in der Gewerbekälte-technik mit dem häufigen Ein-/Aus-Taktbetrieb geeignet sind, bleibt offen.

Die Zusammenhänge und Ergebnisse nach [Ber10] wurden daher in diesem Vorhaben nochmals kritisch hinterfragt und analysiert. Eine grundlegende Annahme bei dem Verfahren ist die Vorgabe eines festen Verdichter-Wirkungsgrads  $\eta_T$ . Speziell bei den üblicherweise in Gewerbekälteanlagen eingesetzten Hubkolbenverdichtern setzt sich dieser Verdichter-Wirkungsgrad wiederum aus dem Liefergrad  $\lambda$ , dem mechanischen Wirkungsgrad  $\eta_m$  und dem induzierten Gütegrad  $\eta_i$  zusammen, die allerdings von verschiedenen Größen abhängig sind und im Betrieb als nicht konstant angenommen werden können.

Abbildung 5 zeigt als Beispiel das Verhalten von Liefer- und Gütegrad in Abhängigkeit des Druckverhältnisses. Es ist zu sehen, dass dieses für alle drei gezeigten Verdichterbauarten (Schraube, Kolben und Scroll) bei steigendem Druckverhältnis eine stark abfallende Tendenz aufweisen.



**Abb. 4:** Abhängigkeit des Liefer- und Gütegrads von Verdichtern [CRH03]  
Es zeigen sich Änderungen im Liefergrad im Bereich von:

- Schraubenverdichter: 0.88-0.8
- Kolbenverdichter: 0.89-0.65
- Scroll-Verdichter: 0.95-0.85

Auch der Gütegrad schwankt über den Druckbereich:

- Schraubenverdichter: 0.68-0.6
- Kolbenverdichter: 0.69-0.59
- Scroll-Verdichter: 0.7-0.55

Zum besseren Verständnis dieser Zusammenhänge wurden daher die relevanten theoretische Grundlagen hinterfragt, die im Folgenden zusammengestellt sind.

Die Leistungszahl einer Kältemaschine ergibt sich allgemein aus dem Verhältnis von Nutzen zu Aufwand.

$$s_{KM} = \frac{\dot{Q}_0}{P_e} \quad (\text{Gl.7})$$

Des Weiteren können Kälteleistung (Nutzen) und die mechanische Verdichterantriebsleistung (Aufwand)  $P_e$  wie folgt berechnet werden.

$$\dot{Q}_0 = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) \quad (\text{Gl.8})$$

$$P_e = \frac{\lambda \cdot \dot{V}_t \cdot (h_2 - h_1)}{v_t \cdot \eta_t \cdot \eta_m} \quad (\text{Gl.9})$$

mit

$P_e$	=	Wellenantriebsleistung (effektiv)
$\lambda$	=	Liefergrad
$\dot{V}_t$	=	theoretischer Fördervolumenstrom
$\eta_t$	=	indizierter Gütegrad
$\eta_m$	=	mechanischer Gütegrad
$v_t$	=	spezifisches Volumen

Die elektrische Klemmenleistung ergibt sich über den elektrischem Wirkungsgrad zu:

$$P_{el} = \frac{P_e}{\eta_e} \quad (\text{Gl.10})$$

$$P_{el} = \frac{P_e}{\eta_e} = \frac{\lambda \cdot \dot{V}_t \cdot (h_2 - h_1)}{v_t \cdot \eta_t \cdot \eta_m \cdot \eta_e} \quad (\text{Gl.11})$$

Setzt man Gl. (8) und Gl. (11) in die Formel 1 ein, so ergibt sich

$$s_{KM} = \frac{\dot{m} \cdot (h_1 - h_4)}{\frac{\lambda \cdot \dot{V}_t \cdot (h_2 - h_1)}{v_t \cdot \eta_t \cdot \eta_m}} \quad (\text{Gl.12})$$

Dies stimmt auch mit den Ergebnissen aus [CEH03] überein.

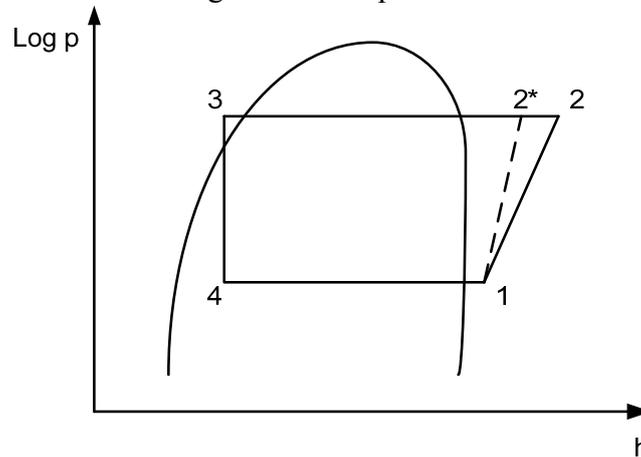
Weiterhin gilt, dass das Verhältnis des Volumenstroms  $\dot{V}_z$  durch das spezifische Volumen  $v_i$  den Massenstrom  $\dot{m}$  ergibt, d.h.

$$s_{KM} = \frac{\dot{m} \cdot (h_1 - h_4)}{\dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \cdot \frac{\lambda}{\eta_i \cdot \eta_m}} \quad (\text{Gl.13})$$

Der Massenstrom kann aus der Gleichung eliminiert werden und es gilt:

$$s_{KM} = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)} \cdot \frac{\eta_i \cdot \eta_m}{\lambda} \quad (\text{Gl.14})$$

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass sich die Leistungszahl der Kältemaschine aus den Enthalpiedifferenzen und den Werten für den Liefergrad  $\lambda$ , mechanischen Wirkungsgrad  $\eta_m$  und induzierten Gütegrad  $\eta_i$  berechnet lässt. Die Enthalpien wiederum lassen sich aus in Abhängigkeit von dem verwendeten Kältemittel aus den gemessenen Drücken und Temperaturen gemäß dem log p,h-Diagramm nach Abbildung 4 bzw. entsprechenden Kältemitteltabellen ermitteln.



**Abb. 5:** Realer und idealer Verdichtungsprozess im log p,h Diagramm

Im Verfahren nach [Ber10] wird für die Berechnung der Leistungszahl folgender Ansatz mit einem konstanten und festen Verdichter-Wirkungsgrad  $\eta_T$  getroffen:

$$s_{KM} = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)} \cdot \eta_T \quad (\text{Gl.15})$$

Setzt man die beiden Gleichungen 14 und 15 gleich, so ergibt sich

$$s_{KM} = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)} \cdot \frac{\eta_i \cdot \eta_m}{\lambda} = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)} \cdot \eta_T \quad (\text{Gl.16})$$

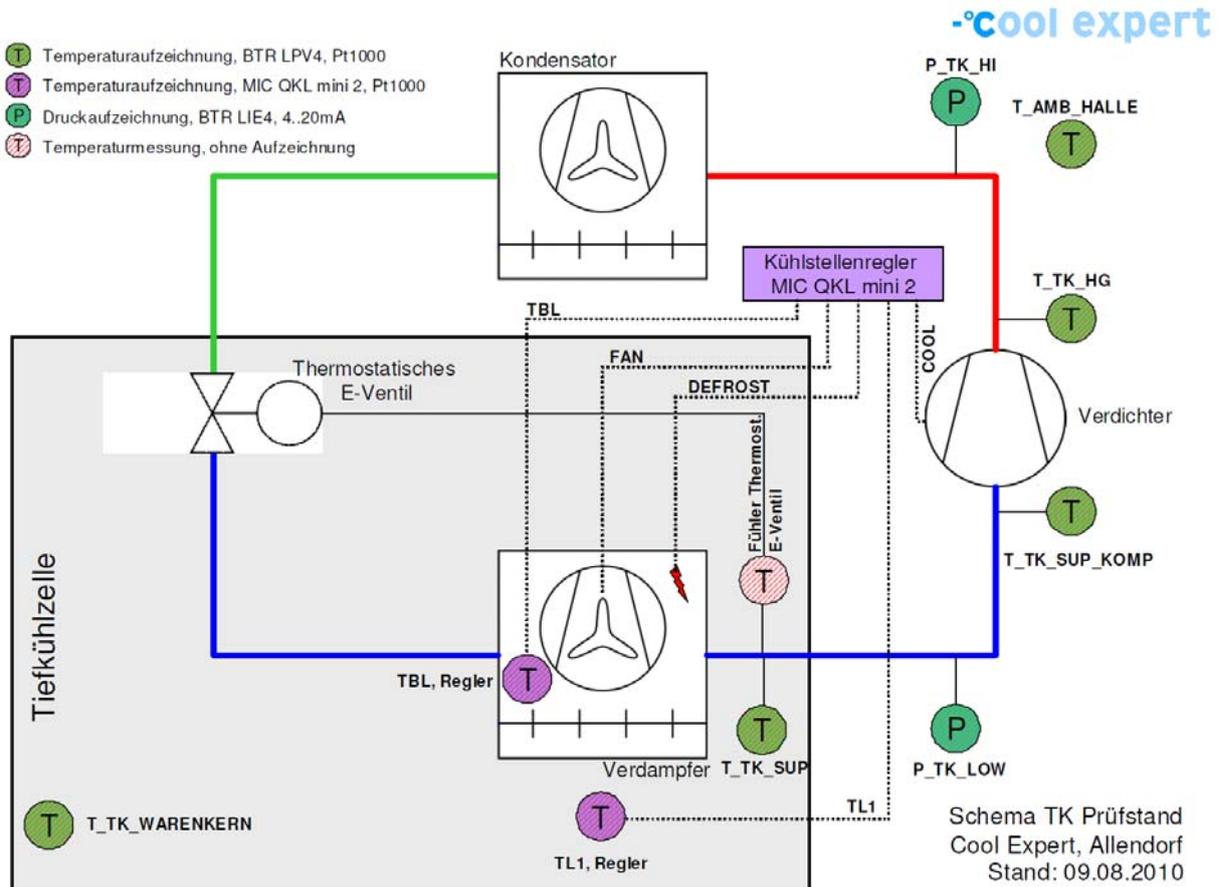
Das würde bedeuten, dass gilt:

$$\frac{\eta_i \cdot \eta_m}{\lambda} = \eta_T = \text{konstant} \quad (\text{Gl.17})$$

Das Verfahren nach [Ber10] setzt somit den Term aus Liefer- und Gütegrad als konstant voraus, was aber wie in Abbildung 2 dargestellt, nicht der Fall ist, sondern z.B. sehr stark vom Druckverhältnis und den aktuellen Betriebsbedingungen abhängt.

## 5 Experimentelle Untersuchungen an einer Feldkälteanlage

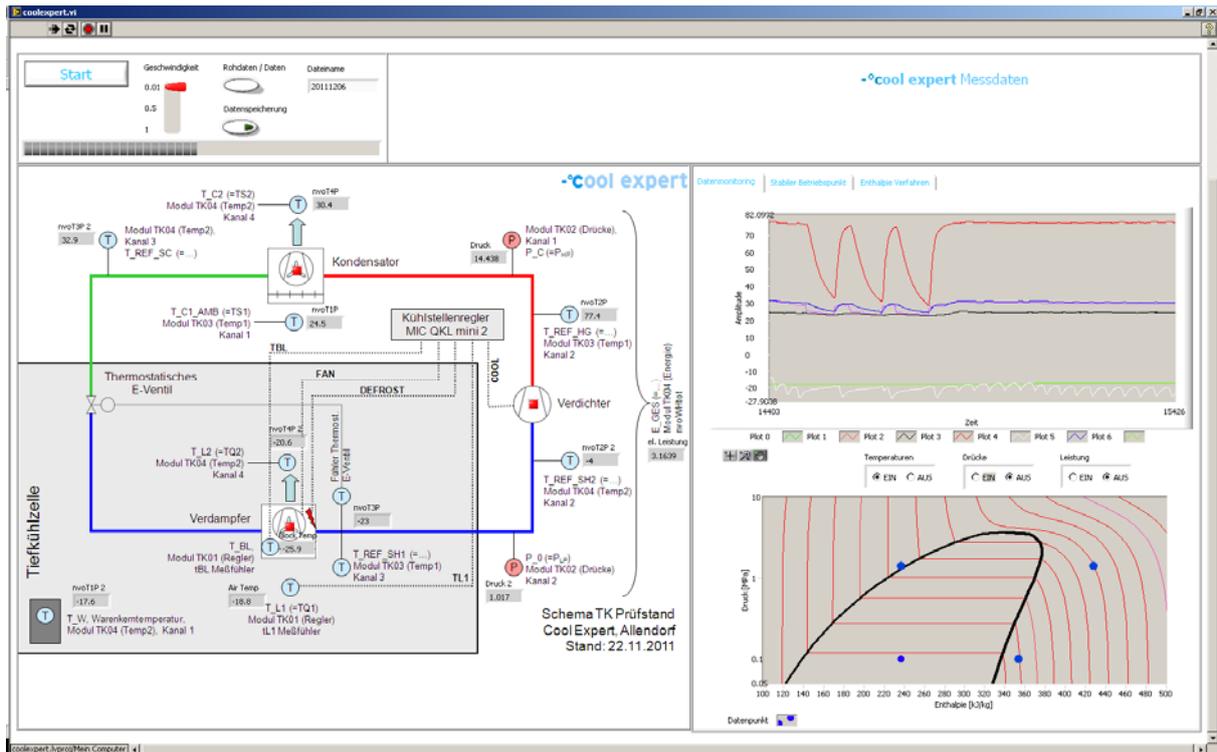
Um diese Zusammenhänge experimentell weiter zu untersuchen, wurden gezielte Versuche an einer Feldanlage (Kühlzelle mit Kälteanlage und umfangreicher Messtechnik) durchgeführt. Dazu wurde eine bereits vorhandene Testanlage durch gezielte Messtechnik ergänzt, s. Abbildung 6.



**Abb. 6:** Messkonzept für Testanlage (Kühlzelle mit Kälteaggregate und Kühlstellenregler), [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH]

Die von dem Datenlogger EEC aufgezeichneten Messwerte wurden mit einem eigens auf diese Aufgabenstellung erstellten Softwaretools aufbereitet und für Auswertung gezielt dargestellt. Im Gegensatz zum vorhandenen Datenlogger EEC kann mit dem Softwaretool auf eine Stoffdatenbank für Kältemittel für die Berechnung der Enthalpien zugegriffen werden. Dadurch sind detailliertere Betrachtungen im Kältemittelkreislauf und den im Kältemittel auftretenden thermodynamischen Aggregatzuständen möglich. Insbesondere ist damit die Berechnung von Leistungszahl nach Gl. 16 möglich.

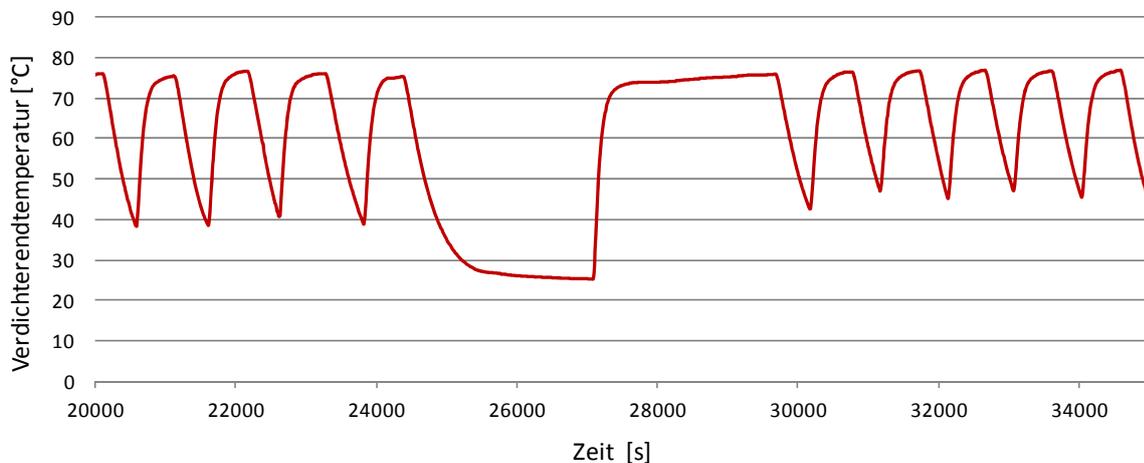
Die Abbildung 7 zeigt exemplarisch die Oberfläche des Softwaretools. Mit der Auswertung ist es möglich, einerseits die Messdaten im Kältemittelkreislauf grafisch darzustellen. Des Weiteren lassen sich die Anlagendrucke im üblichen log p,h-Diagramm darstellen. Schließlich sind auch übliche Linien-Diagramme darstellbar, die wahlweise für die zeitlichen Verläufe von Temperaturen, Drücken und Kälteleistungen verwendet werden können.



**Abb. 7:** Spezifisches Auswerteprogramm zur Messdatenaufbereitung und Messdatendarstellung

Die Messdatenauswertung wurde für mehrtägige Messungen an der Feldanlage durchgeführt. In den in Folge näher beschriebenen Messintervallen befand sich die Kälteanlage in einem für die Untersuchungen typischen Betriebszustand, wie dies häufig in der Praxis für Anwendungen in der Gewerbekälte mit einer Kühlzelle/Kühlraum inkl. Verdampfer und einem kompakten Verdichter-/Verflüssigersatz anzutreffen ist.

Abbildung 8 zeigt die Temperatur am Verdichteraustritt. Diese Temperatur kann als Indikator für den Anlagenbetrieb herangezogen werden, da diese einer starken Veränderung zwischen Anlagenstillstand und Betrieb unterliegt und somit dynamische Anlagenzustände sehr gut wiedergibt. Neben dem eigentlichen Betriebszustand (an/aus) lässt sich am Verlauf dieser Temperatur sehr gut erkennen, wann ein stabiler, quasi-stationärer Betriebszustand auftritt.

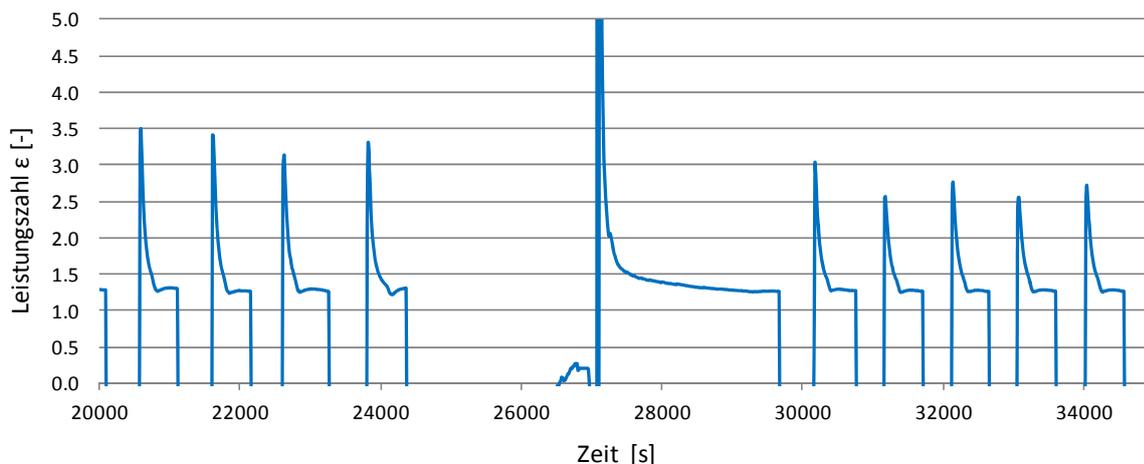


**Abb. 8:** Temperatur am Verdichteraustritt als Indikator für die Dynamik im üblichen Taktbetrieb einer Gewerbekälteanlage

Abbildung 8 verdeutlicht zum einen, dass die Anlage eine sehr hohe Takthäufigkeit aufweist, wie dies üblicherweise auch in vielen Kälteanlagen dieser Art der Fall ist. Eine typische Schaltzyklusdauer beträgt hier ca. 20 min, mit ca. 8 Minuten Einschaltzeit und 12 Minuten Ausschaltzeit des Verdichters. Die Anlage nähert sich nach dem Anfahren einem stationären Betriebspunkt und wird dann meist auf Grund zu geringer Kälteanforderung bereits wieder abgeschaltet. Die verlängerte Einschaltzeit, die in der Mitte des Messintervalls zu sehen ist, wurde durch das Erhöhen der Kühllast, z.B. durch Einbringen von Kühlgut und zeitweisen Türöffnungen erzwungen.

Der häufig auftretende, instationäre Betrieb der Anlage ist sehr verbreitet in Gewerbekälteanlagen (Verdichter mit konstanter Drehzahl). Das Taktverhalten resultiert aus der für die häufigste Zeit des Jahres zu großen Kälteleistung des Verdichters. Diese wird nur in Spitzenlastzeiten bei Volllast (z.B. hohe Kühllast durch Einlagern großer Mengen von warmen Kühlgut) oder bei hohen Umgebungsbedingungen im Sommer benötigt und ist somit für den in der meisten Betriebszeit vorliegenden Teillastbetrieb zu groß. Die große Kälteleistung verkürzt somit die Laufzeit des Verdichters erheblich und führt letztlich zum häufigen Taktbetrieb.

Abbildung 9 zeigt als ein Ergebnis der Auswertung die Leistungszahl nach der Berechnungsmethode nach Gleichung 17. Während des Anfahrprozesses ändern sich das Druckverhältnis und die Temperaturen sehr stark. Dies führt zu einem kurzzeitig sehr hohen Wert der Leistungszahl bis 3.5, die sich nach dem Einschwingvorgang auf einen Wert von 1.3 einschwingt.



**Abb. 9:** Verlauf der Leistungszahl der Kälteanlage im laufenden Betrieb, berechnet nach Gl. 17

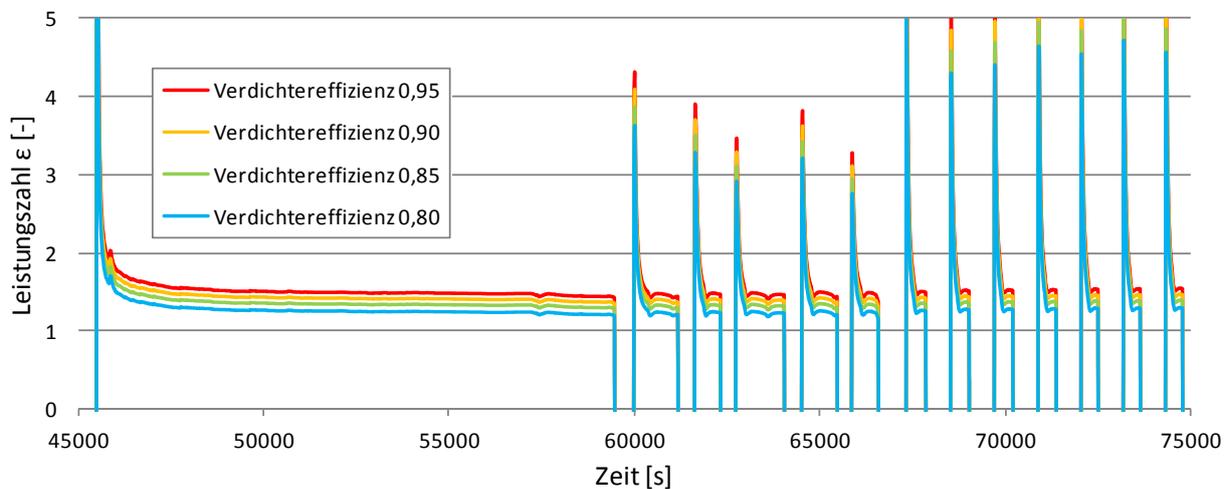
Durch die Spitze beim Startvorgang und den stark instationären Einschwingvorgang wird das Ergebnis insgesamt verfälscht. In Bezug auf die Jahresarbeitszahl kann eine signifikante Abweichung auftreten. In diesem Beispiel:

Mittlere Leistungszahl im stationären Betrieb (30 min Mittelwert):	1,61
Mittlere Leistungszahl im Taktbetrieb (Mittelwert aus zwei An-/Aus-Zyklen):	1,95

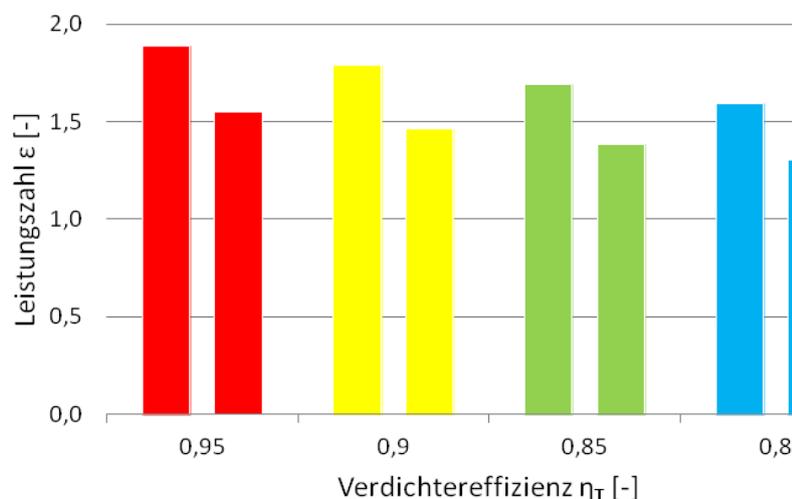
Wie zuvor geschildert, wird bei dem Verfahren nach [Ber10] mit einem festen Verdichter-Wirkungsgrad  $\eta_T$  gearbeitet, für dessen Wert für dieses Verfahren ein Wert von  $\eta_T=0.9..0.95$  für die Praxis vorgeschlagen wird. Für die Beurteilung des Einflusses dieses Faktors auf die Berechnungsergebnisse wurden die Berechnungen der Leistungszahl aus den Messungen mit unterschiedlichen Faktoren für die Verdichtereffizienz durchgeführt.

Abbildung 10 zeigt hierzu die zeitlichen Verläufe der Leistungszahl in Abhängigkeit von der Wahl des Faktors für den Verdichter-Wirkungsgrad. Abbildung 11 zeigt hierzu nochmals die deutlichen Abweichungen der mittleren Leistungszahl in Abhängigkeit von dem Faktor für den Verdichter-Wirkungsgrad, jeweils für den Taktbetrieb (linke Spalte) und einen stationären Betriebspunkt (rechte Spalte). Generell werden in Phasen des Taktbetriebs gegenüber dem stationären Betriebspunkten deutlich höhere Leistungszahlen rechnerisch ermittelt.

Alleine durch diesen Faktor ergeben sich Abweichungen in der Leistungszahl von ca. 18 % zwischen mittleren Leistungszahlen im stationären Betrieb gegenüber der Auswertung im Taktbetrieb.



**Abb. 10:** Einfluss des Faktors für den Verdichter-Wirkungsgrad auf die Leistungszahl



**Abb. 11:** Einfluß des Faktors der Verdichtereffizienz auf die mittlere Leistungszahl jeweils für stationären Betrieb und häufig taktenden Betrieb

Im Folgenden sind die wesentlichen Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zusammengefasst:

- Die Methode nach [Ber10] kann brauchbare Ergebnisse im stationären, d.h. eingeschwungenen Zustand liefern. Die Methode ist aber als Online-Verfahren mit Berücksichtigung dynamischer Ein- und Ausschaltvorgänge und Berücksichtigung von Hilfsenergien (z.B. Abtauvorgänge) für den hier verfolgten Einsatz nicht geeignet.
- Die direkte Messmethode unter Berechnung des Massenstroms und mit Berücksichtigung des Verdichter-Wirkungsgrades erscheint grundsätzlich geeignet und liefert grundsätzlich auch brauchbare, nachvollziehbare Ergebnisse. Fraglich ist allerdings die absolut zu erzielende Genauigkeit bzw. Fragen nach den Genauigkeitsgrenzen und verschiedenen Einflussfaktoren auf die Messgenauigkeit. Hier ist es sinnvoll und erstrebenswert, in Folgeprojekten gezielte Untersuchungen zur Validierung des Verfahrens gegenüber Referenzmessungen mit einem Coriolis-Massenstromsensor durchzuführen.
- Das Rechnen mit einem pauschalen, festen Verlustfaktor für den Verdichter-Wirkungsgrad erscheint im praktischen, häufig taktenden Betrieb als nicht ausreichend. Hier müssten andere Ansätze wie z.B. die Einbindung von Verdichterkennlinien der Hersteller berücksichtigt werden, die abhängig vom Betriebspunkt variable Faktoren für die Werte des Verdichter-Wirkungsgrades ermöglichen. Dies wäre ein Ansatzpunkt für gezielte weitere Forschungs- und Entwicklungsvorhaben.
- Durch das häufige Takten (typisch: ca. 15-20 Minuten) im üblichen Ein-/Aus-Betrieb bei Gewerbekälteanlagen kleiner und mittlerer Größe liegen häufig keine ausreichend langen stationären Betriebszeiten vor, die eine hinreichend aussagekräftige Bewertung von Leistungs- und Arbeitszahlen ermöglichen. Sicherlich lassen sich durch zusätzliche Software-Algorithmen sinnvolle Zeitfenster für die Bewertung von mittleren Leistungszahlen herausfiltern und als Werte für die Leistungszahl TCOP berechnen. Allerdings erscheint es als sehr schwierig hieraus über die Zeit integriert aussagekräftige Werte für die Arbeitszahl TEPF zu berechnen.
- Im Verlauf des Projektes stellte sich heraus, dass die momentan mit dem Datenlogger EEC bei der Datenerfassung erzielbaren minimalen Erfassungszeiten von 1-Minuten-Werten für eine energetische Auswertung nicht ausreichend sind. Der 1-Minuten-Wert ist ein in der Kältetechnik üblicher Wert für ein Datenlogging. Die für eine Erfassung und Verarbeitung erforderliche Hardware für den Datenlogger übersteigt die in der Kältetechnik zurzeit übliche untere Erfassungsrate somit erheblich. Der hierfür umzusetzende Software-Aufwand ist zurzeit wirtschaftlich nicht zu vertreten und musste daher in diesem Projekt verworfen werden. Aus diesem Grund wurde für die experimentellen Ergebnisse zum Teil für die hochdynamischen Messungen eine ergänzende Datenerfassung mit einer zugeschnittenen Auswertesoftware implementiert.

### Gesamtfazit der theoretischen und experimentellen Untersuchungen zur Entwicklung eines On-line-Verfahrens zur energetischen Bewertung der Energieeffizienz von Kälteanlagen:

Auf Basis der Arbeiten von theoretischen Überlegungen, Literaturanalysen und experimentellen Untersuchungen an einer Laboranlage hat sich herausgestellt, dass das in diesem Vorhaben anvisierte Verfahren bei direkt verdampfenden Systemen grundsätzlich theoretisch und praktisch umsetzbar ist. Es sind aber noch einige Hürden hinsichtlich realisierbarer Messgenauigkeit und erforderlicher Datenerfassungsrate vorhanden.

Das Verfahren kann unter der Voraussetzung von konstanten, stationären Betriebspunkten (d.h. konstantes Druckverhältnis), d.h. im eingeschwungenen Betrieb bei konstanten Bedingungen für eine grobe Inbetriebnahme, Inspektion und Fehlersuche durchaus geeignet sein, um gezielte Aussagen treffen zu können. Ziel in diesem Projekt war es aber, eine zuverlässige Aussage über die eine kontinuierliche Messung der Energieeffizienz über einen längeren Zeitraum in Form einer Arbeitszahl treffen zu können. Da häufiger Taktbetrieb und dadurch häufig auftretender instationärer Betrieb und ein über den Jahresverlauf ständig variierendes Druckverhältnis zu erwarten ist, wird das Verfahren für diese Anwendung als nicht geeignet erachtet.

Aus diesem Grund wurden die in diesem Vorhaben verfolgten Ansätze und Ergebnisse für den breiten praktischen Betrieb unter den derzeitigen technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen als nicht realisierbar bewertet. Das vereinfachte Verfahren wird nicht weiter verfolgt, da insbesondere die Annahme, dass der Verdichter-Wirkungsgrad konstant ist, für die hier vorgesehene Anwendung zur kontinuierlichen Bewertung der Energieeffizienz im laufenden Betrieb mit dem typischen Taktbetrieb als nicht zielführend bzw. nicht geeignet angesehen wird.

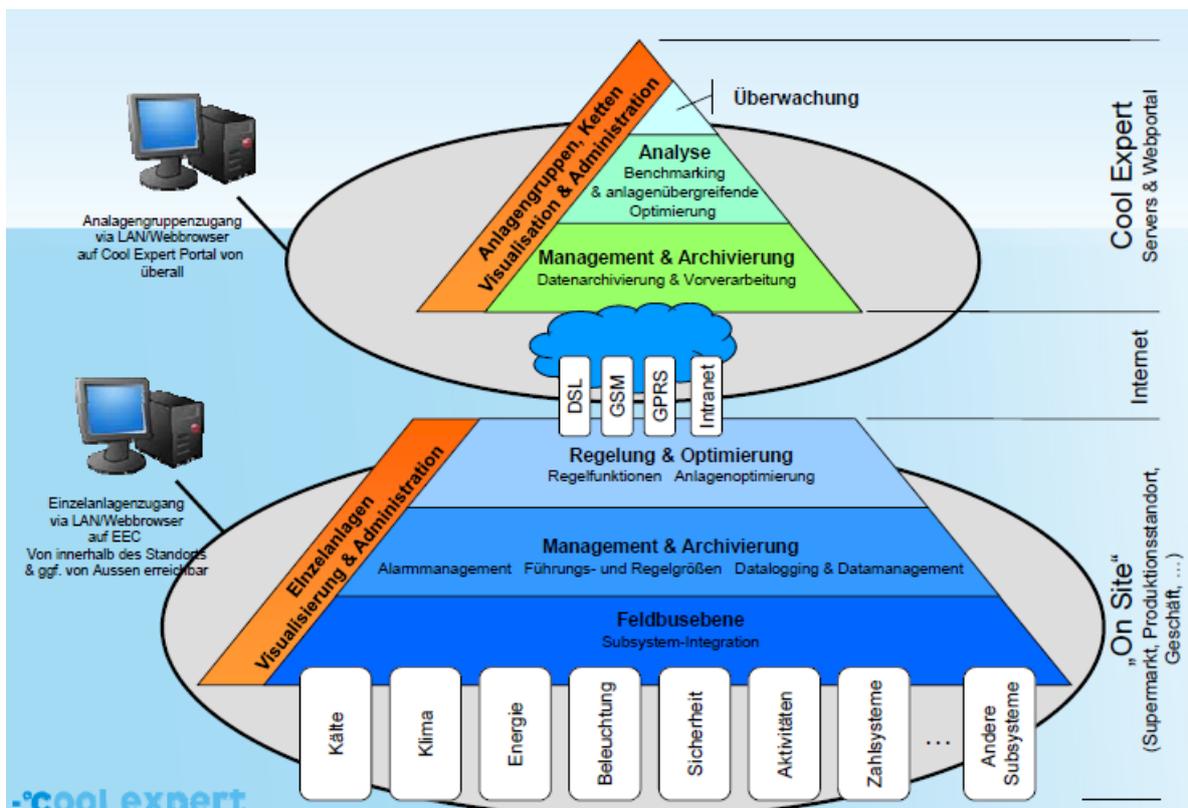
Für die exakte Messung der Energieeffizienz sollte die Kälteleistung möglichst direkt gemessen werden. Es besteht ein Bedarf an der Entwicklung von kostengünstigen Durchflusssensoren für den Einsatz im Kältemittelkreis, um den Kältemittelmassenstrom zu erfassen. Dazu wurden in dem Vorhaben erste Recherchen durchgeführt und informelle Nachfragen bei einschlägigen Forschungs- und Entwicklungsabteilungen von Instituten und Hochschulen durchgeführt. Als Ergebnis ist zu erwarten, dass es in naher Zukunft kostengünstige Durchflusssensoren für die Messung des Kältemittelmassenstroms in der Flüssigkeitsleitung von Kälteanlagen geben wird und dies zu deutlich niedrigeren Kosten als dies heute der Fall ist.

Als Fazit kann somit festgehalten werden, dass die indirekte Messmethode weiterhin eine große Herausforderung darstellt. Sie ist zwar grundsätzlich theoretisch und praktisch möglich, es besteht aber noch erheblicher theoretischer, methodischer und experimenteller Forschungsbedarf für eine zuverlässige und wirtschaftliche Umsetzung für die Praxis.

## 6 Konzeption und Entwicklung von Hard- und Software

Ein weiteres wesentliches Ziel des Vorhabens war die Entwicklung von Hard- und Software als Basis für die Erfassung von geeigneten Prozessgrößen für die Auswertung von Energieeffizienz-Kenngrößen und ein kontinuierliches Energie-Monitoring in Form von Software-Algorithmen. Dazu wurde im Rahmen dieses Vorhabens ein Konzept entwickelt, mit dem Kälteanlagen für unterschiedlichste Anwendungen der Kältetechnik in ein Energie-Monitoring und Energiemanagement-System für gesamte Gebäudeobjekte eingebunden werden können. Ausgehend von Anwendungen, in denen der Hauptenergieverbraucher die kältetechnische Anwendung ist (z.B. Bäckereien, Metzgereien, Supermärkte, Discounter,..), sollen weitere Systeme der technischen Gebäudeausrüstung wie Licht, Heizung, Lüftung, Sicherheitstechnik usw. in ein gesamtes Energie-Monitoring-System eingebunden werden können.

Abbildung 12 zeigt als Ergebnis dieser Untersuchungen als Übersicht eine System-Architektur, die es erlaubt, für unterschiedlichste Anwender eine zugeschnittene Plattform aufzubauen, die es einerseits erlaubt vor Ort (z.B. Betreiber vor Ort, Marktleiter in einem Supermarkt) die Anlagen zu beobachten und zu optimieren. Andererseits bietet das Konzept aber auch die Möglichkeit, dass Service-Personal mit entsprechender Fachkompetenz von außerhalb über ein Web-Portal die Anlagen überwachen und diagnostizieren kann. Schließlich bietet diese Architektur die Möglichkeit, dass Daten aus Anlagen automatisiert energetisch bewertet werden und per Ferneingriff optimiert werden können (z.B. Einstellung/Optimierung von Sollwerten oder Reglerparametern).



**Abb. 12:** Konzeptstudie für zu entwickelndes webbasiertes Portal zur energetischen Analyse und Überwachung von Kälteanlagen und sonstigen technischen Anlagen für spezifische Zielkunden wie z.B. Supermarktbetreiber, [Cool Expert Entwicklungs GmbH]

Aus der Praxis ist z.B. bekannt, dass Anlagen sehr lange mit zu niedrig eingestellten Sollwerten für die Kühlraumtemperatur betrieben werden oder dass Reglerparameter nach der Inbetriebnahme falsch eingestellt werden. Eine z.B. zu niedrig eingestellte Solltemperatur um 3 K führt zu einem Energiemehrverbrauch von ca. 10 %, eine unnötig hoch eingestellte Verflüssigungstemperatur von 5 K zu einem Energiemehrverbrauch von ca. 15 %. Können diese Einstellungen kontinuierlich überwacht und optimiert werden, kann hierdurch bereits ein erhebliches Energieeinsparpotenzial bei einem geringen zeitlichen und finanziellen Aufwand erzielt werden. Voraussetzung ist allerdings, dass alle Regler und Automationskomponenten über moderne Bussysteme vernetzt sind und aus der Ferne in ein Optimierungskonzept eingebunden werden können.

In einer UBA-Studie<sup>3</sup> wird auch auf die Bedeutung eines Energie-Monitorings von Kälteanlagen als wichtiges Werkzeug für den Anlagenbetreiber in seinem Bemühen um eine zielgerichtete Energieeinsparung hingewiesen. Zudem wird in dieser Studie erwähnt, dass solche Regelungs- und Überwachungssysteme bisher noch nicht am Markt verfügbar sind. Auch ist abzusehen, so diese Studie, dass durch ein kontinuierliches Monitoring der Energieeffizienz zukünftig bei Kaufentscheidungen die Bedeutung der um ein vielfaches höheren Betriebskosten gegenüber den einmal getätigten Investitionskosten über den gesamten Lebenszyklus einer Anlage transparent wird.

Der in Abbildung 12 dargestellte Entwurf stellt eine mögliche Struktur für ein Energiemanagement-System für das in der UBA-Studie geforderte Energie-Monitoring dar. Basierend auf diesem Konzeptentwurf wurden im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens Hardware- und Software-Lösungen als Teil des Gesamtkonzeptes entwickelt und implementiert. Allerdings konnte aufgrund der umfangreichen Entwicklungsarbeiten in dem Vorhaben nur ein Teil des gesamten Konzeptes in Form von prototypischen Lösungen umgesetzt werden. Die in diesem Vorhaben umgesetzten Hardware- und Softwarelösungen werden im Folgenden mit Bezug zu dem Thema der Online-Verfahren zur Energieeffizienzbewertung und des Energie-Monitorings kompakt beschrieben.

## 6.1 Hardware

Bezüglich der Hardware wurden im Rahmen dieses Vorhabens gezielte Weiterentwicklungen bei verschiedenen Hardware-Komponenten spezifiziert und durchgeführt. Dies umfasste die Komponenten:

- Weiterentwicklung und Anpassung des Datenloggers MIC EEC
- Weiterentwicklung und Anpassung des adaptiven Kühlstellen- und Abtauregler QKL mini2
- Integration von Fremdprodukten als LON-basierte Feldbusmodule (Temperatur- und Druckmessmodule, Energiezähler, Funkmodule zur Erfassung von Prozessgrößen)
- Integration von übergeordneten Automationsstationen (SPS) über LON-Feldbussystem
- Integration von funkbasierten Komponenten

Im Folgenden werden in kompakter Form die in diesem Vorhaben neu entwickelten bzw. für das Vorhaben angepassten und integrierten Hardware-Komponenten beschrieben.

---

<sup>3</sup> Forschungsbericht 206 44 300 UBA-FB 001180: Vergleichende Bewertung der Klimarelevanz von Kälteanlagen und -geräten für den Supermarkt, ISSN 1862-4359

## Weiterentwicklung und Anpassung des Datenloggers MIC EEC

Der Datenlogger MIC EEC stellt die Kernhardware dar, mit der alle Prozeßdaten, internen Prozeßzustände (z.B. Schaltzustände von Kältemaschine, Ventilatoren, Pumpen, ..), Energieverbräuche usw. über Bussystem erfasst und in einer Datenbank mit Zeitstempel abgelegt werden. Diese Daten sind die Basis für eine zielgerichtete Datenanalyse und Berechnung von Energieeffizienz-Kenngrößen.



**Abb. 13:** Datenlogger MIC EEC, Basis-Hardware für Datenarchivierung und Energie-Monitoring von Kälteanlagen [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH]

Des Weiteren werden über den Datenlogger alle Kühlstellenregler und Feldbus-Komponenten in einer Kälteanlage integriert. Der Datenlogger kann zugeschnitten auf die konkreten Anforderungen flexibel konfiguriert werden, z.B. bzgl. Weiterleitung von Stör- und Alarmmeldungen als email oder SMS. Über das Internet kann auf alle gespeicherte Größen über eine im Datenlogger integrierte webbasierte Oberfläche von jedem beliebigen Rechner und Ort mit unterschiedlich konfigurierbaren Zugriffsrechten zugegriffen werden.



**Abb. 14:** Datenlogger MIC EEC, Integrationsplattform für Regler, Prozessdaten und Energiezählern für ein webbasiertes Energie-Monitoring [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH]

Der Datenlogger MIC EEC wurde zusammengefasst in diesem Vorhaben hinsichtlich folgender Funktionalitäten und Parameter implementiert:

- Erweiterung für die modulare und flexible Erfassung von bis zu 256 Analog- und Digitaleingänge über LON-Erweiterungsmodule, s. Abbildung 17
- Erweiterung der Anbindung auf max. 124 Kühlstellen (Kühlräume, Kühlmöbel) in Abhängigkeit von Busauslastung und Anzahl der zu speichernden Datenpunkte pro Busmodul
- Temperaturbereich im Bereich von -70 bis +70 °C
- Erfassung eines Druckbereiches von 0 - 10 / 25 bar
- Entwicklung von Schnittstellen, z.B. für Integration von Bussystemen wie Modbus, M-Bus usw. Dieser Punkt wurde begonnen, aber im Laufe des Projektes zurückgestellt, da bekannt wurde, dass eine Initiative des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins (DVK) für einen Arbeitskreis gestartet wurde, die eine einheitliche, herstellerübergreifende Datenschnittstelle für die Kältetechnik spezifizieren wird. Diese Spezifikationen sollen bei der weiteren Entwicklung berücksichtigt werden.
- Erweiterung des Datenloggers mit ergänzender Hardware und integrierter Software als Grundlage für eine Online-Bewertung der Gesamtenergieeffizienz. Hierzu wurden am Markt vorhandene LON-Module ausgewählt, die eine Integration wichtiger Prozessgrößen ermöglichen. So wurde ein LON-fähiger elektrischer Energiezähler (Fa. Gossen-Metrawatt, siehe Abbildung 16) und analoge und digitale Messmodule (Fa. BTRNetcom, s. Abbildung 17) für die Erfassung von Anlagenzuständen und Prozessgrößen integriert
- Um auch freiprogrammierbare Automationsgeräte für weitere Automationsaufgaben außerhalb der Kältetechnik (z.B. Heizung, Lüftung, Beleuchtung, ...) integrieren zu können wurde eine LON-fähige speicherprogrammierbare Steuerung (Fa. Sysmik-SPS) mit weiteren 256 Analog- und Digitaleingängen integriert.

### Weiterentwicklung und Anpassung des adaptiven Kühlstellen- und Abtaureglers QKL mini2

Bei dem Kühlstellen- und Abtauregler QKL mini2 handelt es sich um einen autoadaptiven Regler, der sich durch einen selbstlernenden Algorithmus ständig an veränderliche Betriebsbedingungen anpasst und zum energetischen richtigen Zeitpunkt ein Abtauvorgang einleitet (Bedarfsabtauung). Außerdem sind verschiedene Algorithmen wie z.B. ein sog. Latentwärmeprogramm implementiert, die einen energieeffizienten Kühlbetrieb bei Kälteanlagen gewährleisten.

In diesem Vorhaben wurde die Weiterentwicklung des Reglers hinsichtlich folgender Funktionalitäten und Parameter durchgeführt.

- Kontinuierliche Erfassung aller Laufzeiten und Schaltzustände der Aggregate Verdichter, Ventilator und Abtauheizung
- Weiterentwicklung von Algorithmen zur Trenderkennung von ineffizienten Betriebsweisen (z.B. über Auswertung von Temperatur-Gradienten und Laufzeitverhältnissen)
- Verfeinerung und Weiterentwicklung eines verbesserten Stör- und Alarmmanagements für Hinweise auf ineffiziente Betriebsweisen

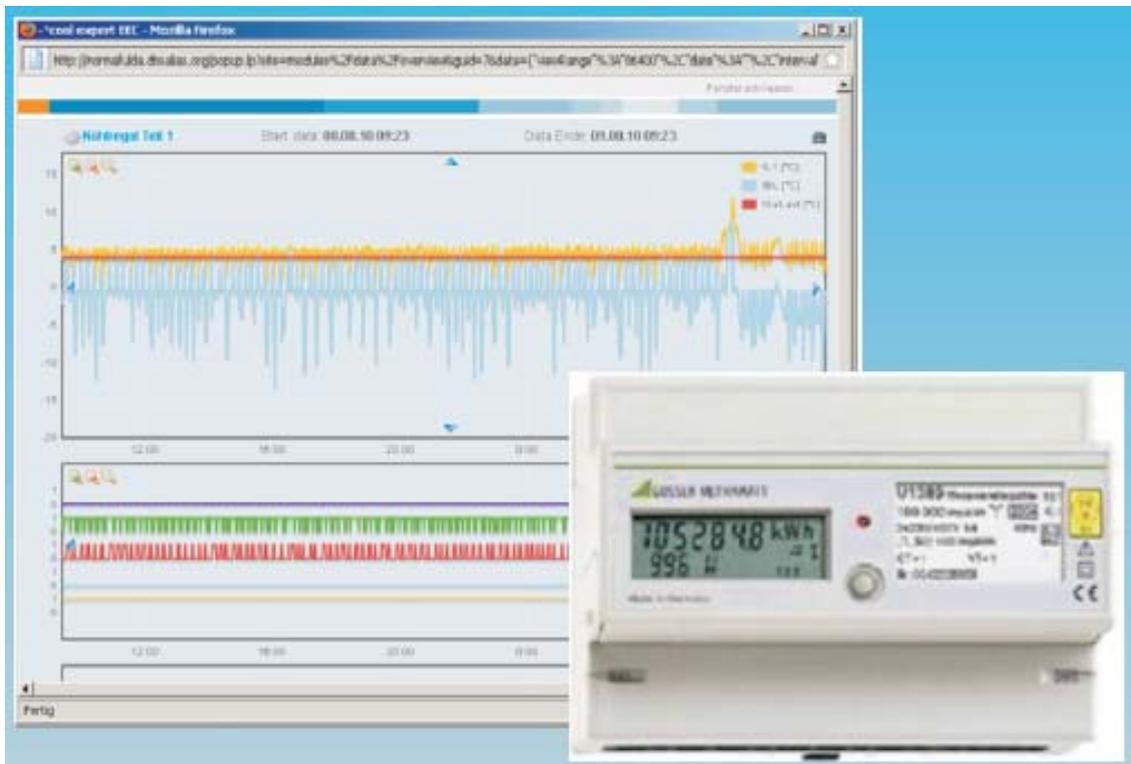


**Abb. 15:** Adaptiver, energieeffizienter Kühlstellenregler mit integriertem Alarm- und Störungsmanagement [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH]

### Integration von Fremdprodukten als LON-basierte Feldbusmodule (z.B. Temperatur- und Druckmessmodule, elektrische Energiezähler)

Neben der Weiterentwicklung und Anpassung der eigenen Hardware-Komponenten sollte es möglich sein, möglichst flexibel und kostengünstig Fremdprodukte (z.B. Regelkomponenten anderer Hersteller, Energiezähler, Analog- und Digitalmodule) in das Energiemanagement-System zu integrieren, um auch ergänzende Informationen aus Anlagen für ein Energie-Monitoring erfassen und mit auswerten zu können.

Abbildung 16 zeigt als Beispiel einen LON-fähigen elektrischen Wirkenergiezähler, mit dem der Energieverbrauch von Kältemaschinen gemessen werden kann und die Werte über das Bus-system auf den Datenlogger für eine Visualisierung übertragen und parallel in der Datenbank für eine spätere Auswertung archiviert werden können.



**Abb. 16:** Beispiel für Anzeige und Auswertung der Energieverbräuche einer Kälteanlage mit einem bus-basierten Energiezähler [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH, elektronischer Wirkenergiezähler Fa. Gossen Metrawatt]

Abbildung 17 zeigt als weiteres Beispiel LON-fähige Analog- und Digitalmodule, die erforderlich sind, um zusätzliche Temperatur- und Drucksensoren in Anlagen zu installieren und zu messen, die als Basis für eine indirekte Messung der Energieeffizienz von Kälteanlagen benötigt werden. An die Module lassen sich übliche Temperatursensoren mit 0..10 V Anschluss oder Drucksensoren mit 4..20 mA Anschluss anschließen. Des Weiteren sollten für einen energieeffizienten Betrieb von Kälteanlagen die Türen von Kühlräumen oder der Abdeckungen von Kühltruhen überwacht werden können, da diese in der Praxis häufig unnötig lange offen stehen und dies dadurch zu einem unnötig hohen Energieverbrauch führt. Für eine Überwachung von Kontakten können z.B. digitale Eingangsmodule verwendet werden, die ebenfalls den Zustand des Türkontakts über das Bussystems auf den Datenlogger zur Überwachung und Archivierung überträgt. Damit können auch direkte Warnmeldungen an das Betreiber- oder Servicepersonal ausgelöst werden.



**Abb. 17:** Beispiel für busfähige Komponenten für analoge Eingänge für Temperatur- und Druckerfassung sowie digitale Eingänge [Bildquelle: BTRNetcom GmbH]

### Integration von funkbasierten Komponenten

Zur Überwachung und für eine frühzeitige Erkennung von unzulässig hohen oder niedrigen Temperaturen in Kühltheken oder Kühltruhen bieten sich funkbasierte Komponenten an. Dies hat den Vorteil, dass die Sensoren an einer geeigneten Stelle frei platziert werden können und keine separate Verdrahtung erforderlich ist. Die in diesem Vorhaben untersuchte und eingebundene EnOcean-Funktechnologie zeichnet sich dadurch aus, dass keine übliche Energieversorgung mit umweltschädlichen Batterien erforderlich ist, sondern die Energie über die Umgebungsenergie (hier: Solarstrahlung mit Fotovoltaik-Zelle) erfolgt.



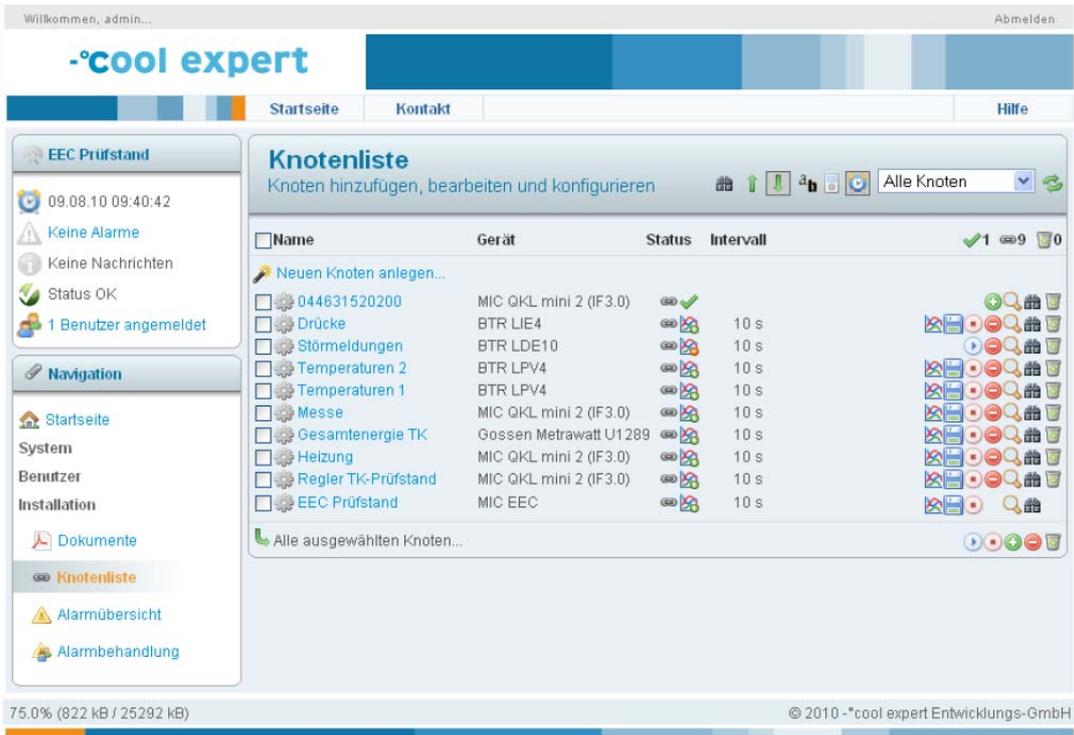
**Abb. 18:** Beispiel für funkbasierte Einbindung von Temperaturfühlern mit batterieloser EnOcean-Technologie [Bildquelle: Fa. Thermokon Sensortechnik GmbH]

## 6.2 Software

In diesem Vorhaben wurde die gezielte Weiterentwicklung von Software des Datenloggers MIC EEC hinsichtlich Analyse- und Auswertelgorithmen als Grundlage für die Online-Bewertung der Energieeffizienz von Kälteanlagen durchgeführt. Dies umfasst folgender Funktionalitäten und Parameter:

- Automatisierte Parametrierung und Inbetriebnahme von Komponenten (Kühlstellenregler QKL mini 2, Energiezähler, Analogmodule für Temperaturen und Drücke, Digital-Module), s. Abbildung 19
- Konfigurierbares Aufzeichnungsintervall; Da es sich bei dem eingesetzten Datenlogger um eine Hardware-Basis auf Windows CE Betriebssystem mit eingeschränkter Rechenleistung handelt, hängt der Datenaufzeichnungszyklus von 1 - 15 min u.a. sehr stark von der Anzahl der auszulesenden Komponenten ab. Beim max. Anschluss von 50 Busteilnehmern ist ein minimaler Aufzeichnungszyklus von 15 Minuten möglich, bei max. 10 Busteilnehmern kann der Datenaufzeichnungsrate auf bis zu 1 min erhöht werden.
- Automatisierte Protokollierung, Archivierung, und Visualisierung von Temperaturverläufen von Kühlstellen (Kühlräume, Tiefkühlager, Tiefkühltruhen, Kühlregale, etc.), s. Abbildung 20 und 21
- Standardisierte Exportmöglichkeiten für Daten zur weiteren Verarbeitung, z.B. als .csv-Dateien für Einbindung und grafischen Aufbereitung in anderen Software-Programmen, s. Abbildung 22
- Langzeitspeicherung der Temperaturdaten in Servicezentrale, gleichermaßen muss eine Sicherheit der erfassten Daten auch im Störfall gewährleistet sein.
- Übermittlung der erfassten Temperaturdaten an Servicezentrale via Internet inkl. Störfallerfassung, -bearbeitung und Weiterleitung per email oder SMS
- Konzeption und Einrichtung eines prototypischen Web-Portals zur Archivierung und Auswertung von Anlagendaten (Energiekennwerte, Störmeldungen, Prozessdaten, ) für unterschiedlichste Nutzer (Kälteanlagenbauer, Service, Betreiber, Energiemanager, ...)
- Mechanismen zur gezielten Zugriffskontrolle. Betreiber bzw. Filialleiter sollen Daten der eigenen Filiale sehen, Energiebetreuer soll Daten aller der von ihm betreuten Filialen sehen, Administrator soll alle Daten einsehen können.
- Erfassung und Archivierung der elektrischen Leistung des Verdichters inkl. Hilfsenergien über elektr. Energiezähler, s. Abbildung 15
- Hochladen und Hinterlegen aller Datenblätter, Komponentendatenblätter und Manuals als .pdf-Dateien auf dem Datenlogger inkl. Hinterlegen von Anlagenparametern (z.B. Kältemittel, Verdichter- und Verdampfertyp),
- Erstellung von aussagekräftigen Darstellungsarten für Prozessdaten und Auswertung des Anlagenzustandes mittels sog. CarpetPlots (s. Abbildung 24-26)

Diese in diesem Vorhaben durchgeführten gezielten Weiterentwicklungen stellen die Software-Basis und die notwendigen Voraussetzungen für ein flexibles, ausbaufähiges und internetbasiertes Energiemanagement- und Energiemonitoring-System zur kontinuierlichen energetischen Überwachung und energetischen Bewertung von Kälteanlagen dar.



**Abb. 19:** Beispiel für Konfigurationsmenue zur Einbindung von busfähigen Komponenten für Energiemessung und Temperatur-/Drucksensoren [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH]



**Abb. 20:** Beispiel für webbasierte Datenaufzeichnung und –visualisierung von Energieverbräuchen und Druckverläufen der Kälteanlage [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH]

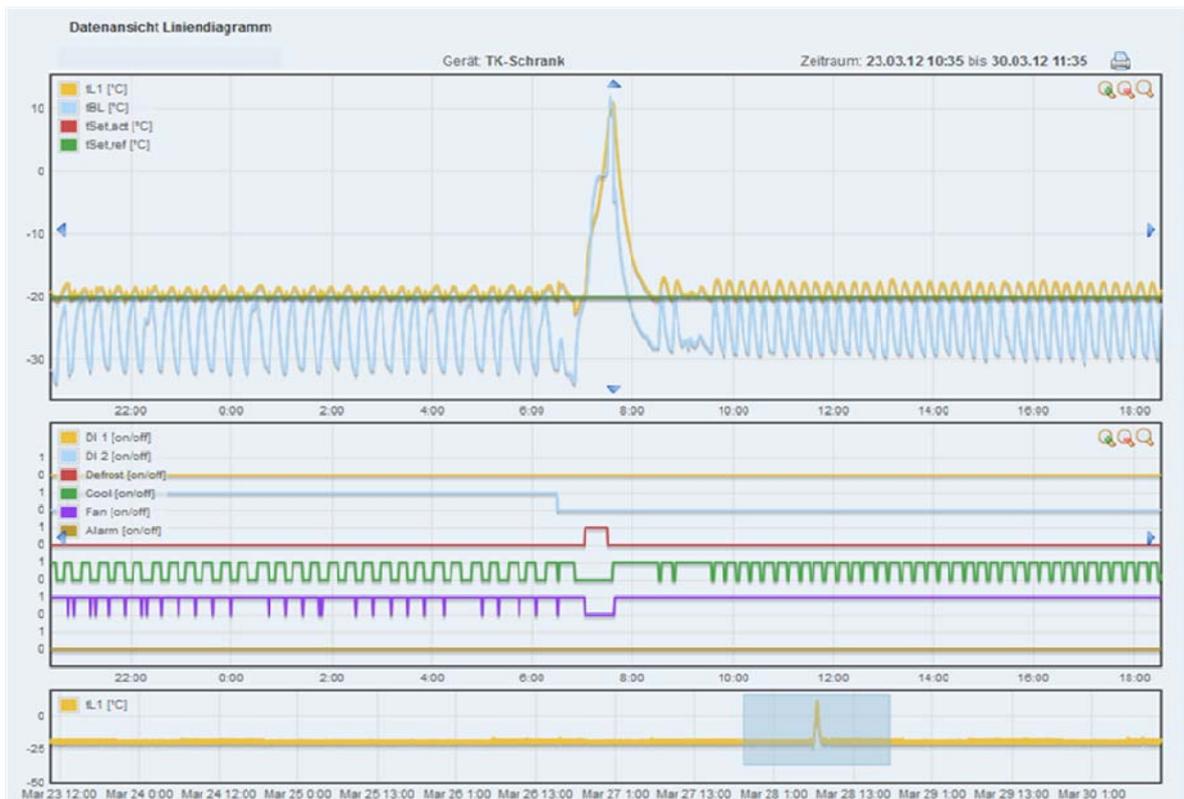


Abb. 21: Beispiel für webbasierte Datenaufzeichnung und Detailanalyse von Anlagenzuständen und Temperaturverläufen für einen Kühl- und Abtauzyklus [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH]

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
2	Datei	Regler TK-Prüfstand_2011.03.14_18-25.csv										
3	Name	Regler TK-Prüfstand										
4	Beschreibung											
5	Datumsformat	local	UTC +0100									
6	Datum	15.03.2011 18:25										
7	Notizen											
9	Zeitstempel	nvoAirTemp	nvoAlarmRel	nvoBlockTem	nvoCool	nvoFan	nvoHeater	nvoStateDI1	nvoStateDI2	nvoThermost	nvoThermostSpRef	
10	14.03.2011 18:25	-20	0	-24	0	0	0	0	0	0	-20	-20
11	14.03.2011 18:25	-20	0	-23,9	0	0	0	0	0	0	-20	-20
12	14.03.2011 18:25	-20	0	-23,9	0	0	0	0	0	0	-20	-20
13	14.03.2011 18:25	-20	0	-23,9	0	0	0	0	0	0	-20	-20
14	14.03.2011 18:26	-20	0	-23,9	0	0	0	0	0	0	-20	-20
15	14.03.2011 18:26	-20	0	-23,8	0	0	0	0	0	0	-20	-20
16	14.03.2011 18:26	-20	0	-23,8	0	0	0	0	0	0	-20	-20
17	14.03.2011 18:26	-19,9	0	-23,8	0	0	0	0	0	0	-20	-20
18	14.03.2011 18:26	-19,9	0	-23,9	0	0	0	0	0	0	-20	-20
19	14.03.2011 18:26	-19,9	0	-23,7	0	0	0	0	0	0	-20	-20
20	14.03.2011 18:27	-19,9	0	-23,7	0	0	0	0	0	0	-20	-20
21	14.03.2011 18:27	-19,8	0	-23,6	0	0	0	0	0	0	-20	-20
22	14.03.2011 18:27	-19,8	0	-23,7	0	0	0	0	0	0	-20	-20
23	14.03.2011 18:27	-19,8	0	-23,6	0	0	0	0	0	0	-20	-20
24	14.03.2011 18:27	-19,8	0	-23,6	0	0	0	0	0	0	-20	-20
25	14.03.2011 18:27	-19,8	0	-23,6	0	0	0	0	0	0	-20	-20
26	14.03.2011 18:28	-19,8	0	-23,5	0	0	0	0	0	0	-20	-20
27	14.03.2011 18:28	-19,8	0	-23,5	0	0	0	0	0	0	-20	-20
28	14.03.2011 18:28	-19,9	0	-23,5	0	0	0	0	0	0	-20	-20
29	14.03.2011 18:28	-19,7	0	-23,5	0	0	0	0	0	0	-20	-20
30	14.03.2011 18:28	-19,7	0	-23,4	0	0	0	0	0	0	-20	-20
31	14.03.2011 18:28	-19,7	0	-23,4	0	0	0	0	0	0	-20	-20
32	14.03.2011 18:29	-19,7	0	-23,4	0	0	0	0	0	0	-20	-20
33	14.03.2011 18:29	-19,7	0	-23,3	0	0	0	0	0	0	-20	-20
34	14.03.2011 18:29	-19,7	0	-23,3	0	0	0	0	0	0	-20	-20
35	14.03.2011 18:29	-19,7	0	-23,3	0	0	0	0	0	0	-20	-20
36	14.03.2011 18:29	-19,7	0	-23,3	0	0	0	0	0	0	-20	-20
37	14.03.2011 18:29	-19,7	0	-23,3	0	0	0	0	0	0	-20	-20
38	14.03.2011 18:30	-19,6	0	-23,2	0	0	0	0	0	0	-20	-20
39	14.03.2011 18:30	-19,6	0	-23,2	0	0	0	0	0	0	-20	-20
40	14.03.2011 18:30	-19,6	0	-23,2	0	0	0	0	0	0	-20	-20
41	14.03.2011 18:30	-19,6	0	-23,1	0	0	0	0	0	0	-20	-20
42	14.03.2011 18:30	-19,5	0	-23,1	0	0	0	0	0	0	-20	-20
43	14.03.2011 18:30	-19,5	0	-23,1	0	0	0	0	0	0	-20	-20
44	14.03.2011 18:31	-19,5	0	-23	0	0	0	0	0	0	-20	-20
45	14.03.2011 18:31	-19,5	0	-23	0	0	0	0	0	0	-20	-20
46	14.03.2011 18:31	-19,5	0	-23	0	0	0	0	0	0	-20	-20
47	14.03.2011 18:31	-19,5	0	-22,9	0	0	0	0	0	0	-20	-20
48	14.03.2011 18:31	-19,5	0	-22,9	0	0	0	0	0	0	-20	-20
49	14.03.2011 18:31	-19,5	0	-22,8	0	0	0	0	0	0	-20	-20
50	14.03.2011 18:32	-19,4	0	-22,9	0	1	0	0	0	0	-20	-20
51	14.03.2011 18:32	-19,4	0	-22,7	0	1	0	0	0	0	-20	-20
52	14.03.2011 18:32	-19,3	0	-22,4	0	1	0	0	0	0	-20	-20
53	14.03.2011 18:32	-19,2	0	-22	0	1	0	0	0	0	-20	-20
54	14.03.2011 18:32	-19,1	0	-21,6	0	1	0	0	0	0	-20	-20
55	14.03.2011 18:32	-19,1	0	-21,3	0	1	0	0	0	0	-20	-20

Abb. 22: Beispiel für Datenexport in Tabellenform [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH]

The screenshot displays the 'cool expert' web interface. The top navigation bar includes 'Startseite', 'Kontakt', and 'Hilfe'. The main content area is titled 'Alarmübersicht (1/6)' and contains a table of alarm events. A secondary window, 'Alarmbehandlung', is overlaid on the right, showing a form for creating or editing alarm sets, including a list of recipients and actions.

Ereignis	Zeitstempel	Quelle	Status
PFL	05.08.10 10:13	Norma Fulda	🚨
DI 1	04.08.10 15:50	Störung ZEAS	🚨
EUS	29.07.10 17:03	Kühlregal Teil 1	🚨
DFAIL	27.07.10 17:56	Kühlregal Teil 3	🚨
DFAIL	27.07.10 17:56	Kühl	🚨
DFAIL	27.07.10 17:56	Kühl	🚨
DFAIL	27.07.10 17:30	Kühl	🚨
DFAIL	27.07.10 17:30	Kühl	🚨
DFAIL	27.07.10 17:01	Zähl	🚨
ALARM_REL	27.07.10 15:21	Kühl	🚨
ECO	27.07.10 15:21	Kühl	🚨
ALARM_REL	27.07.10 15:21	Kühl	🚨
ECO	27.07.10 15:21	Kühl	🚨
ALARM_REL	27.07.10 15:20	Kühl	🚨
ECO	27.07.10 15:20	Kühl	🚨
ALARM_REL	27.07.10 15:20	Kühl	🚨
ECO	27.07.10 15:20	Kühl	🚨
ALARM_REL	27.07.10 15:20	Kühl	🚨
ECO	27.07.10 15:20	Kühl	🚨

**Abb. 23:** Beispiel für webbasiertes Stör- und Alarmmanagement, u.a. zur frühzeitigen Meldung von energieineffizientem Betrieb [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH]

## Erstellung von Algorithmen für die Darstellung und Auswertung von Prozessgrößen und Anlagenzustandes unter Anwendung von Carpet Plots

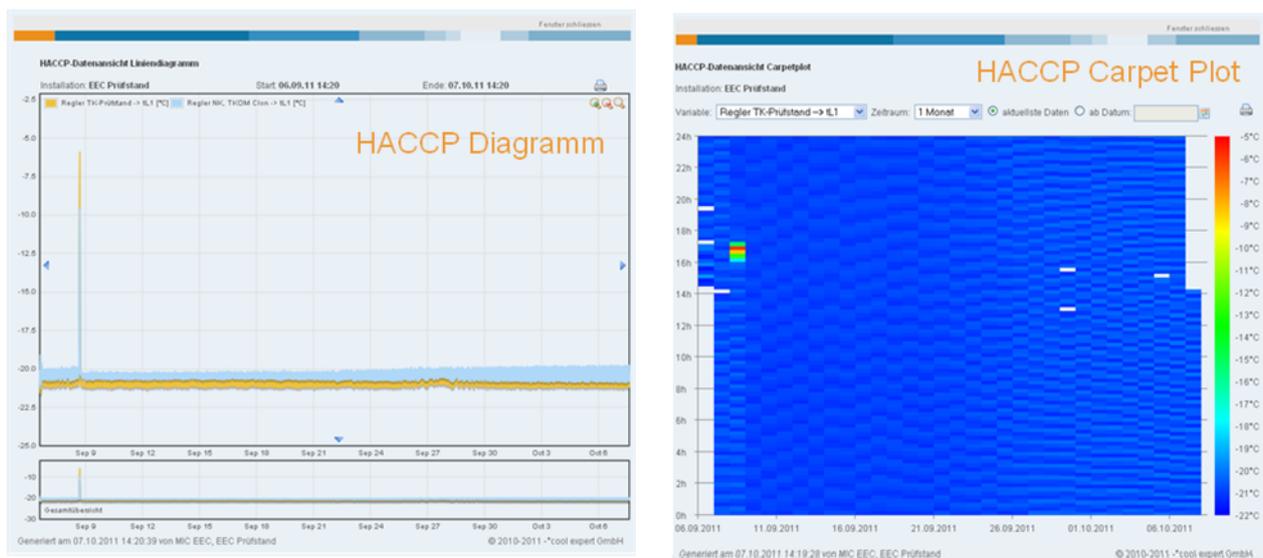
Eine interessante Innovation für die Kältetechnik stellt die gezielte Aufbereitung und Darstellung von umfangreichen Daten in Form von sog. Carpet Plots dar. Diese Art der Darstellung wird verstärkt in der Gebäude- und Energietechnik eingesetzt und erlaubt eine hochverdichtete Darstellung von Daten. In der Kältetechnik wird diese Art der Darstellung noch nicht verwendet. Mit dem Vorhaben konnten erste Entwicklungen umgesetzt und erste Erfahrungen mit den Auswertungsmöglichkeiten mit Hilfe dieser Darstellungen gesammelt werden.

Alternativ oder ergänzend zu den üblichen Liniendiagrammen werden für eine verdichtete Informationsdarstellung von Daten sog. Carpet Plots eingesetzt, die dieser Darstellungsart eine hervorragende Möglichkeit bieten, Anlagenzustände und Prozessgrößen-Verläufe anschaulich und aussagekräftig über einen längeren Zeitraum (Woche, Monat, Jahr) darzustellen.

Abbildung 24 zeigt als Beispiel ein Carpet Plot einer Kühlmöbeltemperatur, die im Rahmen der vielfach geforderten HACCP-Überwachung von Lebensmitteln kontinuierlich überwacht werden muss. Im Vergleich dazu links die eine Darstellung als Liniendiagramm.

In dem Beispiel ist im Carpet Plot über einen längeren Zeitraum auf einen Blick deutlich die erhöhte Kühlwaretemperatur durch die Farbkodierung erkennbar. Mit einem Liniendiagramm muss dagegen zeitaufwändig der tägliche Temperaturverlauf kontrolliert und ausgewertet werden. Noch zeitaufwändiger, aber in der heutigen Praxis noch üblich, ist die Auflistung der Kühlwaretemperatur mittels manueller oder automatisierter Temperaturprotokollierung, s. Abbildung 25.

Neben der gesetzlich geforderten HACCP-Aufzeichnung kann diese Art der Darstellung auch sehr gut dazu genutzt werden, um mit einem Blick feststellen zu können, ob die Kühlagertemperatur eventuell auch zu niedrig eingestellt ist, was wie bereits zuvor erläutert, zu unnötigem Mehrenergieverbrauch führen kann. Somit ist diese Art der Darstellung auch ein hervorragendes Werkzeug für ein verbessertes Energie-Monitoring.



**Abb. 24:** Beispiel für ein übliches Liniendiagramm und für die neue Darstellung als Carpet Plot für verdichtete Auswertung von Messdaten, [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH]

# HACCP Bericht

-°cool expert

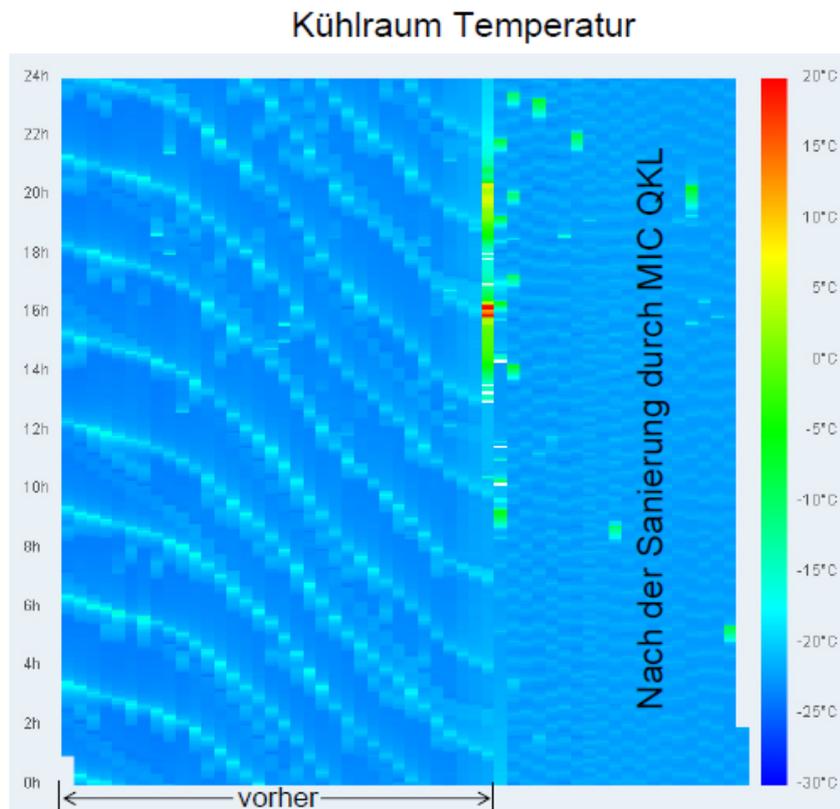
Bericht: HACCP  
Geräte-Id: 22-30-CE4-020101  
Beschreibung:  
Zeitformat: local, UTC +0100

Kühlregal Mopro1 -> tL1 [°C] (1)  
Kühlregal Mopro 2 -> tL1 [°C] (2)  
Käsetheke -> tL1 [°C] (3)  
Kühlraum -> tL1 [°C] (4)  
Kühlregal Würst -> tL1 [°C] (5)  
TK-Schrank -> tL1 [°C] (6)  
Kühlregal Mopro 3 -> tL1 [°C] (7)  
Funkfühler B (bei Würstregal) -> Käse-SB 1 [°C] (8)

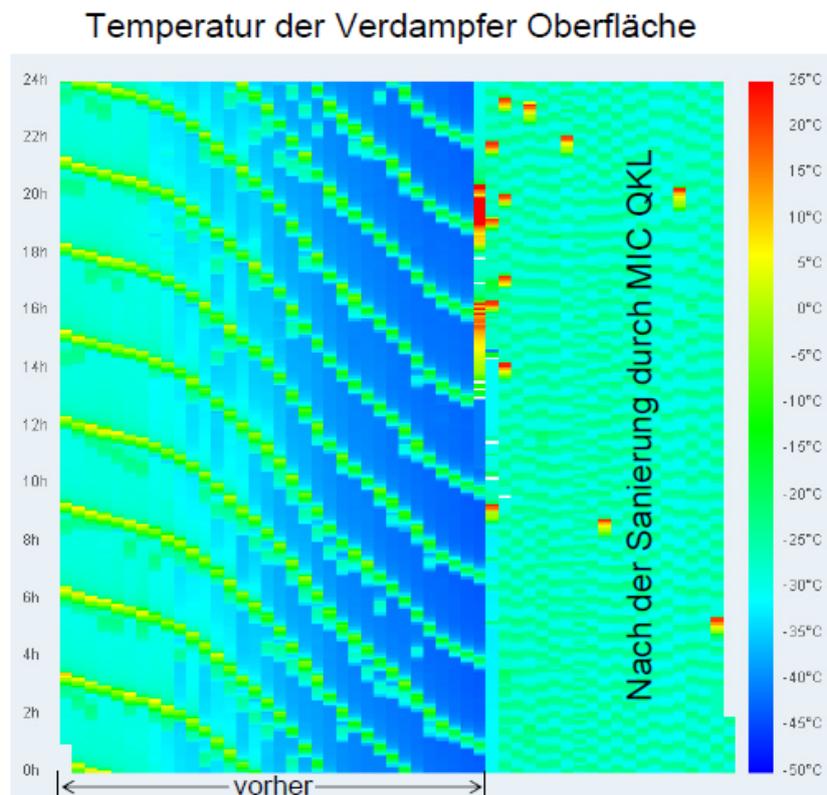
Zeitstempel [d.m.y h:m]	Kühlrega... tL1 (1)-[°C]	Kühlrega... tL1 (2)-[°C]	Käsetheke tL1 (3)-[°C]	Kühlraum tL1 (4)-[°C]	Kühlrega... tL1 (5)-[°C]	TK-Schrank tL1 (6)-[°C]	Kühlrega... tL1 (7)-[°C]	Funkfühl... Käse-SB 1 (8)-[°C]
30.03.2012 01:05	4,90	5,52	5,84	5,58	1,48	-19,28	4,88	4,96
30.03.2012 01:20	4,12	5,20	6,14	4,86	1,50	-19,34	5,00	4,96
30.03.2012 01:35	4,42	5,20	5,22	4,82	1,70	-19,06	5,14	5,32
30.03.2012 01:50	5,12	5,20	6,40	5,58	1,18	-19,38	4,82	4,90
30.03.2012 02:05	4,92	5,40	6,62	4,78	1,20	-19,40	5,04	4,90
30.03.2012 02:20	4,74	5,32	6,04	4,96	1,34	-19,22	5,00	4,90
30.03.2012 02:35	5,00	5,14	6,06	5,66	1,24	-19,10	5,14	4,96
30.03.2012 02:50	4,82	4,90	6,38	4,76	1,16	-19,24	5,18	4,78
30.03.2012 03:05	4,56	5,08	5,62	4,88	1,24	-19,10	4,72	4,84
30.03.2012 03:20	4,62	5,12	5,88	5,60	0,98	-19,16	4,92	4,84
30.03.2012 03:35	4,68	5,38	6,02	4,80	1,90	-19,00	4,96	5,08
30.03.2012 03:50	4,34	4,86	5,98	5,26	0,22	-19,32	5,14	6,12
30.03.2012 04:05	4,44	5,12	5,50	5,50	1,72	-19,24	4,96	6,16
30.03.2012 04:20	5,04	5,00	6,18	4,74	0,90	-19,42	4,70	5,08
30.03.2012 04:35	4,86	5,06	5,94	8,58	0,30	-19,18	4,84	4,96
30.03.2012 04:50	3,72	4,98	5,76	4,72	0,24	-19,34	4,80	4,84
30.03.2012 05:05	4,64	5,26	5,76	5,36	0,24	-19,26	5,36	4,90
30.03.2012 05:20	5,12	6,02	7,96	5,82	0,16	-19,12	4,96	4,72
30.03.2012 05:35	3,74	4,92	9,38	4,74	1,24	-19,06	5,04	4,84
30.03.2012 05:50	3,56	4,92	5,94	5,10	0,28	-19,30	4,98	4,84
30.03.2012 06:05	4,96	5,42	6,22	5,54	1,02	-19,08	4,86	4,78
30.03.2012 06:20	4,88	5,06	6,24	4,54	0,82	-19,36	5,02	4,84
30.03.2012 06:35	4,70	5,42	5,60	5,08	0,00	-18,12	4,88	4,78
30.03.2012 06:50	5,00	4,18	6,72	5,74	1,48	-19,22	5,12	4,84
30.03.2012 07:05	3,66	4,36	5,54	5,30	0,30	-18,96	3,76	4,66
30.03.2012 07:20	5,32	5,18	6,70	5,30	3,16	-19,32	5,88	4,78
30.03.2012 07:35	5,02	6,06	7,26	5,66	3,34	-19,04	6,04	5,08
30.03.2012 07:50	4,36	5,02	7,36	4,98	1,76	-18,88	5,22	5,20
30.03.2012 08:05	4,80	5,10	6,76	7,18	1,66	-18,92	4,32	5,14
30.03.2012 08:20	4,68	5,00	6,70	6,52	1,06	-18,94	4,92	5,52
30.03.2012 08:35	5,10	5,00	6,06	4,34	2,46	-18,94	4,64	5,26
30.03.2012 08:50	4,96	5,56	7,40	5,68	2,52	-18,14	5,48	5,32
30.03.2012 09:05	5,04	5,36	7,96	5,76	2,46	-18,74	5,06	5,52
30.03.2012 09:20	4,76	5,24	6,86	4,56	2,48	-18,96	4,88	5,38
30.03.2012 09:35	4,56	4,34	7,30	6,02	1,32	-19,14	4,26	5,52
30.03.2012 09:50	4,24	5,02	6,62	5,30	1,74	-19,06	4,52	6,30
30.03.2012 10:05	4,66	4,22	6,32	4,46	0,60	-19,08	4,40	7,34
30.03.2012 10:20	4,74	5,54	7,26	6,08	3,64	-19,36	5,16	6,06
30.03.2012 10:35	5,44	5,40	7,76	5,02	2,28	-18,98	5,46	5,82
30.03.2012 10:50	4,12	4,82	6,82	4,54	1,42	-18,92	3,72	6,02

**Abb. 25:** Beispiel für ein tabellengeführtes HACCP-Protokoll, [Quelle: Cool Expert Entwicklungs GmbH]

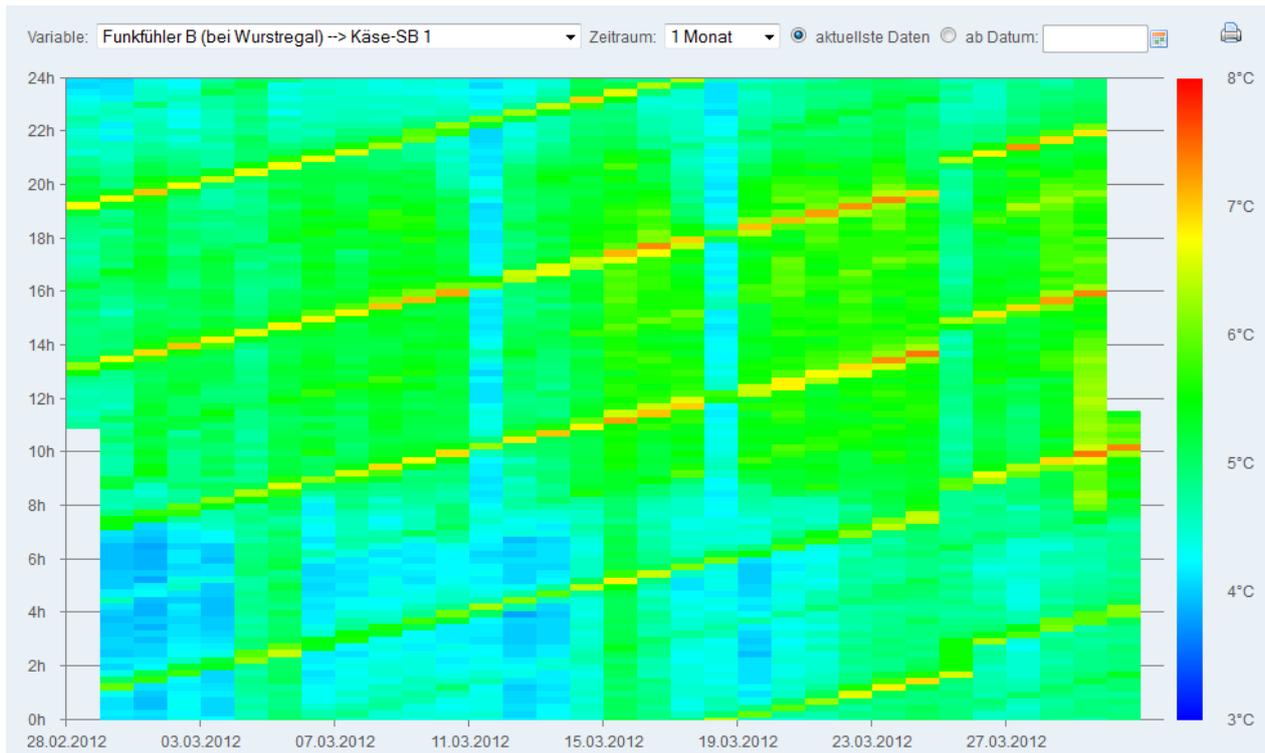
Diese Art der Datendarstellung wurde in dem Vorhaben für erste Anwendungen und Einsätze in der Praxis erfolgreich getestet (siehe Abbildungen 26 und 29). Diese Art der Darstellung kann zukünftig zielgerichtet z.B. für eine Energieeffizienz-Bewertung und für ein intelligentes Anlagen- und Energie-Monitoring auf einem Energie-Portal (s. Abbildung 12) angepasst und weiterentwickelt werden.



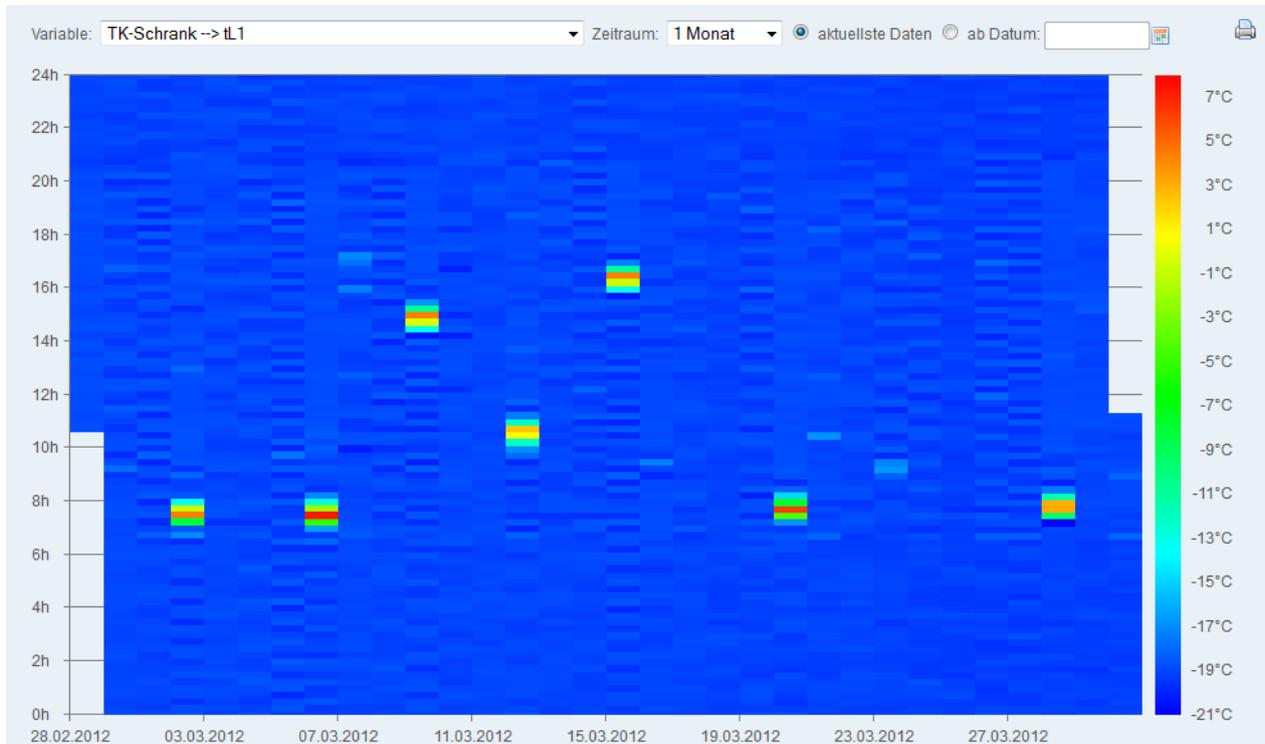
**Abb. 26:** Beispiel für Verlauf der Kühlraumtemperatur bei einer Teststudie an einer realen Anlage zur Analyse von unterschiedlichen Regelungskonzepten für eine energetische Sanierung und Optimierung



**Abb. 27:** Beispiel für Verlauf der Verdampferoberflächentemperatur bei einer Teststudie an einer realen Anlage zur Analyse von unterschiedlichen Regelungskonzepten für eine energetische Sanierung und Optimierung



**Abb. 28:** Beispiel für Temperaturverläufe an einer realen Anlage zur Analyse der Temperaturen in einem Käseregal in einem Lebensmittelmarkt



**Abb. 29:** Beispiel für Überwachung und Analyse der Temperaturverläufe in einem Tiefkühlschrank in einem Lebensmittelmarkt

## **7 Verbreitung der Vorhabensergebnisse**

Teil-Ergebnisse des Vorhabens wurde auf folgender Veranstaltung durch einen Vortrag mit Veröffentlichung im Tagungsband präsentiert:

Vortrag bei ZVKKW Supermarkt-Symposium Kälte- und Wärmeerzeugung im Lebensmittel-einzelhandel, Nürnberg, 5./6. April 2011

Meyer, F.: Abtauung zum energetisch besten Zeitpunkt, Vortrag bei ZVKKW Supermarkt-Symposium Kälte- und Wärmeerzeugung im Lebensmitteleinzelhandel, Nürnberg, 5./6. April 2011

Des Weiteren wurde auf das Vorhaben bei der Messe Chillventa, Nürnberg, Oktober 2010 hingewiesen, bei dem das Unternehmen Cool Expert Entwicklungs GmbH als Aussteller mit einem Messestand vertreten war.

Zwischen- und Endergebnisse des Vorhabens wurden zudem mehrfach bei internen und externen Seminar- und Workshop-Veranstaltungen präsentiert.

Es ist geplant, weitere Vorträge und Veröffentlichungen nach Abschluss des Vorhabens zu verfassen.

## 8 Fazit

In diesem Vorhaben wurden im Wesentlichen folgende Ergebnisse erzielt:

Einerseits konnten in dem Vorhaben Grundlagen geschaffen werden, ob und wie die Energieeffizienz im laufenden Anlagenbetrieb (Online-Verfahren) unter technischen und wirtschaftlichen Kriterien mit einer hinreichenden Genauigkeit bewertet werden kann. Dazu wurden ausgehend von Literaturangaben und theoretischen Untersuchungen verschiedene Ansätze untersucht und bewertet. Als Ergebnis konnte festgestellt werden, dass die verfolgte Methodik grundsätzlich für eine Online-Bewertung von Kälteanlagen geeignet ist, aber noch einige technische und wirtschaftliche Hürden für den praktischen Einsatz bestehen. So ist z.B. für die kontinuierliche Auswertung eine hohe Abtastrate der zu erfassenden Prozessgrößen in Sekunden-Auflösung bei den heute eingesetzten Datenloggern nicht üblich, was wiederum eine hohe Rechenleistung und Speicherbedarf für eine kontinuierliche Archivierung erfordert. Eine weitere Hürde ist die erzielbare Genauigkeit des Verfahrens. Nach den Erkenntnissen ist für die in diesem Vorhaben beschriebenen indirekten Messverfahren in Verbindung mit dem üblichen Ein-/Aus-Taktbetrieb im laufenden Anlagenbetrieb von Gewerbekälteanlagen eine Messgenauigkeit unter 20 % nicht zu erwarten.

Ein weiteres Ergebnis wurde erzielt, indem durch intelligente Software-Algorithmen und Auswertungen aussagekräftige Auswertungen über den Anlagenzustand bezüglich energieeffizienter Betriebsweisen und intelligenter Überwachungs- und Diagnosefunktionen erstellt werden können. Damit lassen sich für den Betreiber und das Service-Personal von Kälteanlagen frühzeitig Indikatoren ableiten, ob und wie effizient eine Kälteanlage im laufenden Betrieb arbeitet. Hierzu wurden in dem Vorhaben ausgehend von einem intelligenten Kühlstellenregler relevante Betriebsparameter auf einem Datenlogger aufgezeichnet und anschließend über Software-Auswertungsprogramme aussagekräftige Darstellungen erstellt. So entstanden grafische Darstellungen in Form von sog. Carpet Plots, die in einer komprimierten Form Datenauswertungen über längere Zeiträume ermöglichen und zielgerichtete Hinweise auf Optimierungspotenziale erlauben. Aufbauend auf diesen Ergebnissen sind auch neue Dienstleistungsgeschäfte wie Fernservice-, Fernwartung- und Ferndiagnose zu erwarten.

Die in diesem Vorhaben durchgeführten Untersuchungen und erzielten Ergebnisse liefern zudem wichtige Erkenntnisse für den weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf von Online-Verfahren zur Erhöhung der Energieeffizienz von Kälteanlagen im laufenden Betrieb sowie von Energie-Monitoring-Systemen. Es wird erwartet, dass zukünftig Lösungen für die gewerbliche Kältetechnik angeboten werden, die durch das kontinuierliche Energie-Monitoring mit Energieeffizienzbewertung zu einer Energieeinsparung in der Größenordnung von 10-15 % führen. Bei einem jährlichen Verbrauch von 77.000 GWh elektrischen Endenergieverbrauch für kältetechnische Anwendungen in Deutschland kann das kontinuierliche Energie-Monitoring von Kälteanlagen damit einen signifikanten Beitrag zur Umweltschonung leisten.

## 9 Literaturverzeichnis

- [Bec08] Becker, M.: Energetische Bewertung von Kälteanlagen und optimierte Betriebsführung von Kälteanlagen aus automatisierungstechnischer Sicht, Tagungsband Bd. II, DKV-Tagung Ulm, 19.-21. November 2008
- [BeKö11] Becker, M.; Köberle, T.: Verfahren zur Bewertung der Energieeffizienz von Kälteanlagen. Tagungsband Facility Management Kongress, 22.-24.2.2011, Frankfurt, S. 99-108,
- [Ber87] Berglöf, Klas. *A method for analysing and controlling a cooling process. WO 87/05097 (27.08.87 87/19)* Schweden / Stockholm, Februar 1987.
- [Ber10] Berglöf, Klas. *Innovative Method for Performance Inspections Used to Optimise Existing Refrigeration and Air- Conditioning Plants.* Stockholm : International Refrigeration and Air Conditioning Conference, 2010. Paper 1059.
- [CRH03] Ciconkov, Risto und Hilligweg, Arnd. *Kolbenverdichter - Simulation des Leistungsverhaltens beim Einsatz in einem Verflüssigungssatz.* Skopje / Nürnberg : KI Luft- und Kälte, 2003.
- [Cub97] Cube, Steimle, e.al.: Lehrbuch der Kältetechnik, C.F. Müller Verlag, Band 1, 4. A., 1997
- [DKV05] DKV-Arbeitsblätter für die Wärme- und Kältetechnik, Kältemaschinenregeln, Ordner 3, C.F. Müller Verlag Heidelberg, August 2005
- [DIN07] DIN EN 15450: Heizungsanlagen in Gebäuden – Planung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen, Beuth-Verlag, Dez. 2007
- [Mey11] Meyer, F.: Abtauung zum energetisch besten Zeitpunkt, ZVKKW Supermarkt-Symposium Kälte- und Wärmeerzeugung im Lebensmitteleinzelhandel, Nürnberg, 5./6. April 2011
- [ReSp08] Recknagel, Sprenger, Schramek: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, Oldenbourg Verlag, Ausgabe 07/08
- [VDMA11] Einheitsblatt VDMA 24247-7: Energieeffizienz von Kälteanlage, Teil 7: Regelung, Energiemanagement und effiziente Betriebsführung, Verein Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA), April 2011