



Sonderausgabe  
Großkältetechnik

# Bewertung innovativer Kälteprozesse

## Dynamische Simulation, Einsparpotenziale und Anwendung

*Dipl.-Ing. (BA) Gerhard Frei, MBA,*  
*SIMREFF GmbH,*  
*München,*  
*www.simreff.com*  
*Dipl.-Oec. Steffen Klein,*  
*Combitherm GmbH,*  
*Fellbach,*  
*www.combitherm.de*

Die Steigerung der Produktivität, der Energieeffizienz und der Produktqualität gewinnen bei Produktionsprozessen mit Kälteanwendung immer mehr an Bedeutung. Eine innovative Konzeptfindung im Einklang mit Verordnungen und angepasst an den Kälteanwendungsprozess erfordert neue Bewertungsmethoden. Mit dynamischer Systemsimulation in der Kältetechnik können sowohl ungenutzte Energieeinsparpotenziale erkannt werden, als auch innovative Kälteprozesse bewertet und untereinander verglichen werden.

Der Energiebedarf der in Deutschland installierten Kältesysteme beträgt ca. 15 % des gesamten deutschen Elektroenergiebedarfs. In Deutschland sind ca. 120 Mio. Kälteanlagen installiert und im Bereich der Industrie- und Prozesskälte ist der Verbrauch an elektrischer Energie in einem Zeitraum von zehn Jahren (1999 bis 2010) um 51 % angewachsen [1] [2]. Betreiber von Kälteanlagen sind nach EU-Energieeffizienzrichtlinie (2012/27/EU) dazu verpflichtet, die Gesamtenergiebilanz zu verbessern. Des Weiteren sind Betreiber bestrebt, die Produktionsnebenkosten zu senken, um die eigene Wettbewerbsfähigkeit zu stärken. Dabei fehlt es oft an Wissen, um Kälteprozesse fachgerecht und effizient zu optimieren.

### Innovative Kälteprozesse

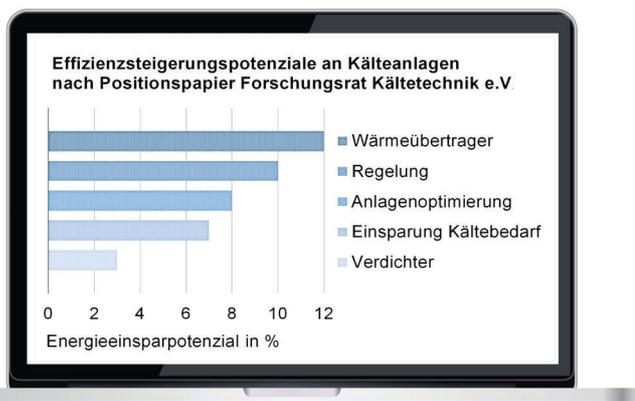
Die Kombination aus Kältekonzept, Kältemittel, Füllmenge, Aufstellungsort und effizienter Betrieb der Anlage über den Lebenszykluszeitraum stellt Betreiber, Planer und

Anlagenbauer vor neue Herausforderungen. Die verschärfte F-Gase-Verordnung fordert bis zum Jahr 2030, das CO<sub>2</sub>-Äquivalent der F-Gase EU-weit um fast 80 % zu verringern. Komponenten der Kälteanlagen müssen unter Berücksichtigung der Wahl des Kältemittels und der Systemfüllmenge (GWP) Mindesteffizienzwerte nach Ökodesign-Richtlinie erfüllen. Das Effizienzsteigerungspotenzial für Kälteprozesse liegt, je nach Anlage und Standort, im Bereich von 10-40 %, verbunden mit einer Kosteneinsparung und einer Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Bilanz (siehe Abbildung 1) [3]. Gesamtprozessoptimierung und Effizienzsteigerung werden oftmals nur teilweise oder gar nicht ausgeschöpft. Diese können allerdings durch dynamische Systemsimulation und eine ganzheitliche Betrachtung von Kältebelastung, Kälteanlage und Wirtschaftlichkeit aufgezeigt werden. Das sollte stets vor dem Hintergrund einer Betrachtung der Lebenszykluskosten geschehen, da die kumulierten Energiekosten die

Investitionskosten um ein Fünf- bis Zehnfaches übersteigen können. Benchmarking, energetische Bewertung und Vergleich von Kälteanlagen nach Energieeffizienzgraden gewinnen in den nächsten Jahren immer mehr an Bedeutung. Die SIMREFF-Methodik der dynamischen Systemsimulation ermöglicht es, all diesen Vorgaben gerecht zu werden, innovative Konzepte zu erarbeiten und Systemkomponenten zu optimieren.

### Methodik SIMREFF

Die Methodik SIMREFF (Simulation, Refrigeration & Efficiency) stellt eine wissensbasierte Dienstleistung zur Planung, Inbetriebnahme und Betriebsoptimierung von Kälteanlagen dar. Angewendet wird die neu entwickelte SIMREFF-Simulationssoftware. SIMREFF verknüpft und simuliert dynamisch drei Prozesse und führt zu einer ganzheitlichen Betrachtung (Abbildung 2). Jeder Prozessschritt wird durch einen Simulationsbaustein, den Anwender-, Kälte- und



Abbildungen 1+2: Effizienzsteigerungspotenzial an Kälteanlagen (links) und Dynamische Verknüpfung und ganzheitliche Betrachtung (rechts)

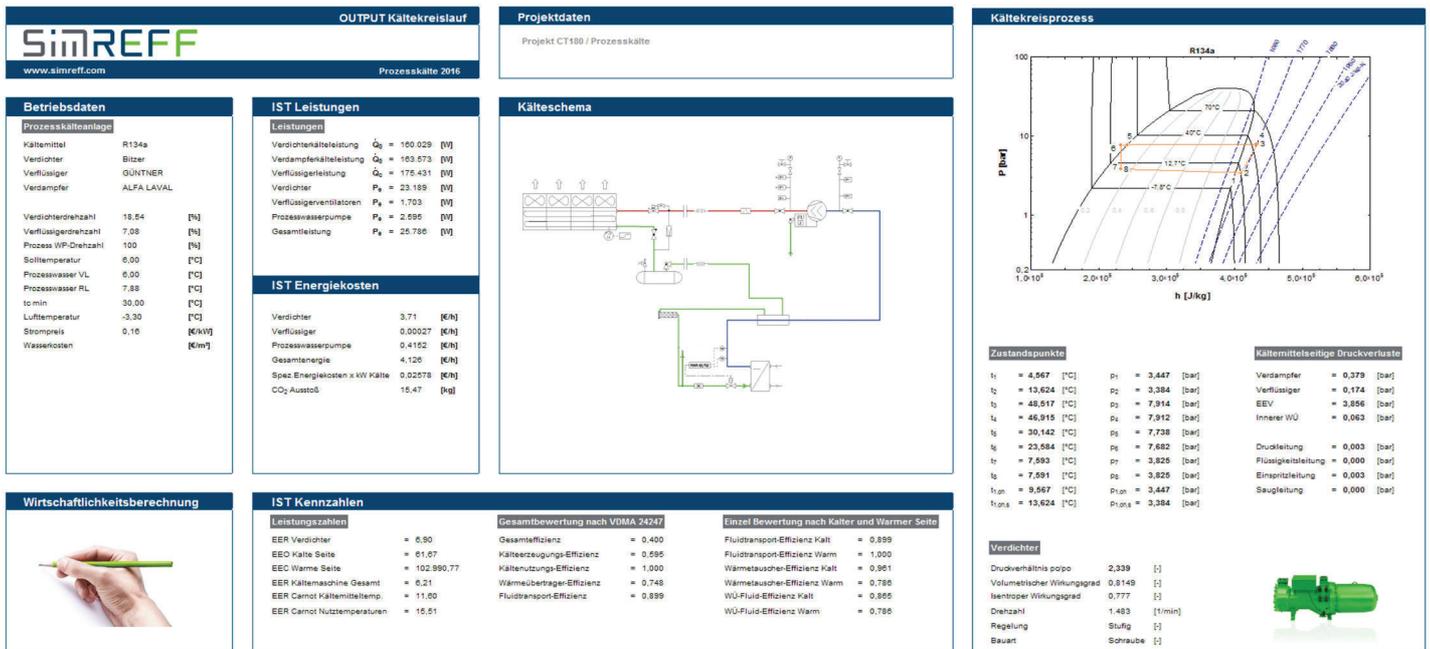


Abbildung 3: OUTPUT-Programmoberfläche des Kälteprozesses mit Ist-Kennzahlen

Wirtschaftlichkeitsprozess, abgebildet. In Abhängigkeit von Produktionsweise, Klimabedingungen und Teillastverhalten wird für ein Jahr ein stündliches Kältebedarfsprofil berechnet und daraus wird das effizienteste und wirtschaftlichste Kälteanlagen- und Regelungskonzept ermittelt. Die Innovation dieser Systemsimulation besteht in der detailgetreuen Modellierung und Abbildung sowie Verknüpfung der Einzelprozesse.

Dieser Systemsimulation liegen mathematische und physikalische Modelle, ein fundiertes Wissen über Anwendungsprozesse und das Wissen über Betriebsverhalten der eingesetzten kältetechnischen Komponenten und Systeme zugrunde. Ergänzt werden diese Systemstudien durch wirtschaftliche Analysen. Eine Abbildung innovativer Kälteprozesse, Kälte-Wärme-Kopplungen oder kombinierte Gebäudekonzepte mit Prozesskälte, Wärmepumpe und Freier-Kühlung

### Tabelle 1: Lastprofil Randbedingungen

Umschaltpunkte und Lastprofil Randbedingungen			
		Volllast	Grundlast
Kühllast	kW	920	320
Grenzwerte der Außentemperatur	°C	32	≤ 12
Teillastverhalten zwischen den Grenztemperaturen	°C	stetig	konstant

können im SIMREF-Modell umgesetzt und neutral verglichen werden. Kundenspezifische Auslegungstools und Anlagenkonzepte können individuell realisiert werden und für BAFA-Anträge bewertet werden, wie jüngst geschehen für die hoch zu bewertende Innovation, den „eChiller“ mit Wasser als Kältemittel.

### SiMREF-Softwaremodell

Das SiMREF-Rechenmodell besteht aus diversen in Tabellenform angereicherten Eingabe- und Ausgabemasken. Die grafische Nutzeroberfläche ermöglicht es, die erstellten Simulationsmodelle zu parametrieren und die Berechnungen durchzuführen. Es können Herstellerangaben der verwendeten

# EE für EFFIZIENTE ENERGIE

Wir bauen Kältetechnik der Zukunft auf die viele Unternehmen vertrauen

Infos und Messetermine unter [efficient-energy.com](http://efficient-energy.com)

100 %  
Wasser als Kältemittel

80 %  
Energiekosteneinsparung

ten Komponenten eingegeben oder aktuelle Betriebsgrößen des zu berechnenden Lastzustands vordefiniert werden. Die Anwenderprozessmaske wurde für die unterschiedlichsten Lastprofile und Prozesse gestaltet und legt u.a. die Verwendung der Klimadaten fest. Es können deutsche Standorte, nach dem Testreferenzjahr des Deutschen Wetterdienstes, oder internationale Wetterdaten, aus der ASHRAE-Klimadatenbank, verwendet werden. Die dynamische stündliche Lastprofil-Abbildung des Anwenderprozesses kann auf Basis von Monats-, Wochen- oder Stundenwerten erfolgen. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, einen stündlichen Kälteleistungsbedarf aus einer thermisch-energetischen Gebäudesimulation einzulesen oder direkt den stündlichen Kälteleistungsbedarf von Lüftungsanlagen durch das integrierte h,x-Modul zu ermitteln. Somit steht ein vollständiges stündliches Lastprofil der Kälteanlage über 8760 h/a zur Verfügung. Kern der Simulation ist die exakte Abbildung des Kälteprozesses, der je nach Anwendung variiert. Hierzu zählen neben dem/den Verdichter(n) auch die Abbildung der Wärmeübertrager, Ventilatoren und Sekundärkreisumpen. Das Simulationsmodell der Kältemaschine wurde in einer Softwareumgebung mit integrierter Stoffdatenbank entwickelt. Zur Parametrierung des Verdichters werden Hersteller-



Abbildung 4: Combitherm-Industrie-Prozesskälteanlage

daten nach DIN EN 12900 [4] benötigt und für die Simulation in Polynome umgeformt, woraus Wirkungsgrade abgeleitet werden. Zur Abbildung stetiger Verdichterdrehzahlen werden die Polynome für unterschiedliche Drehzahlen ermittelt und unbekannte Drehzahlen werden interpoliert. Auch für Wärmeübertrager werden Auslegungsdaten der Hersteller verwendet. Um auch das Teillastverhalten auf der Wärmeauf- und

-abnahmeseite abbilden zu können, werden vorab die Wärmeübergangskoeffizienten bei unterschiedlichen Kältemittel- und Fluidmassenströmen abgeleitet. Aus den daraus gewonnenen Daten werden neue Exponentialfunktionen gebildet, die eine Beschreibung des Teillastverhaltens und der Wärmeübergangskoeffizienten im aktuellen Betriebspunkt ermöglichen. Das so entwickelte Modell, z.B. einer Kompressionskältemaschine, ermöglicht die Berechnung verschiedenster Betriebspunkte der Anlage unter Berücksichtigung sämtlicher Anlagen-druckverluste, kältemittel-, prozesswasser- und kühlwasserseitig.

**Tabelle 2: Vergleich der Regelkonzepte**

Vergleich der Regelkonzepte

		Regelstrategie <i>tc<sub>min</sub> konst.</i>	SIMREFF OPT- Load-Polynom
Min. Verflüssigungstemperatur <i>tc<sub>min</sub></i>	°C	30°C konstant	variabel ≥ 25°C
Jahresbetriebsstunden	h/a	8760	8760
Jahreskühlenergie	kWh/a	3.373.081	3.373.081
Jahresstromenergie	kWh/a	536.700	474.031
Min. Leistungszahl <i>EER<sub>KM</sub></i>	-	3,10	2,90
Max. Leistungszahl <i>EER<sub>KM</sub></i>	-	6,79	8,45
Mittlere Leistungszahl <i>EER<sub>KM</sub></i> über 8760 h/a	-	6,49	7,60
Min. elektr. Leistungsaufnahme	kWh	47,13	37,87
Max. elektr. Leistungsaufnahme	kWh	295,93	316,33
Jahresmittelwert elektr. Leistungsaufnahme	kWh	61,27	54,11
Strompreis	€/kWh	0,16	0,16
Kosten elektrische Energie Kältemaschine	€/a	85.872 €	75.845 €
Energieeinsparpotenzial	%/a	-	11,7
CO <sub>2</sub> -Einsparpotenzial	t/a	-	33,5
Kosten Regelstrategie (Simulation/Umsetzung)	€	-	5.800
Return-on-Investment (ROI)	Monate	-	~ 6

**SIMREFF-Bewertung**

Mit Hilfe des Simulationsmodells wird das Betriebsverhalten einer realen Kälteanlage unter verschiedensten Umgebungstemperaturen und Lastanforderungen abgeleitet. Aus der Simulation sind dynamische, optimal angepasste Betriebsparameter, wie optimale Verflüssigungstemperaturen, Regelstrategien oder Umschaltunkte bei Nutzung von freier Kühlung abzuleiten und in Form von Gleichungen darstellbar. Um das Optimierungspotential aufzuzeigen, wird die Simulation mit verschiedenen Anlagenkomponenten und Regelparametern durchgeführt. Nach der Simulation werden energetische Jahreskennzahlen, wie beispielsweise Jahresarbeitszahlen (SEER für verschiedene Bilanzgrenzen), Leistungszahlen (EER an beliebigen Betriebspunkten) und

Effizienzwirkungsgrade der Kälteanlage in Anlehnung an VDMA 24247 [5], ausgewiesen. Die Software ermöglicht neben der stündlichen Abbildung (siehe Abbildung 6) des Anwenderkühlprozesses und der Kälteanlage eine Bewertung der Investitions- und Betriebskosten. D.h. die Lebenszykluskosten werden unter Berücksichtigung von Risiko- und Sensitivitätsanalysen über den Betriebszeitraum der Anlage ermittelt. Alle relevanten Eingaben und alle Ergebnisse werden nach der Berechnung automatisch grafisch und tabellarisch aufbereitet und in Masken ausgegeben. Abbildung 3 zeigt beispielhaft eine OUTPUT-Oberfläche der entwickelten Software SiMREFF, die IST-Leistungen und Kennzahlen darstellt.

SIMREFF unterstützt somit Beratungsleistungen nach dem EDL-Gesetz bzw. kann zur softwaregestützten Energieberatung für Kälteanlagen im Rahmen eines BAFA-Energieaudits verwendet werden. Das Berechnungsverfahren bietet eine einheitliche Vergleichsbasis für unterschiedliche Kälteanlagenkonzepte und eignet sich zur neutralen energetischen Beurteilung und Optimierung von Anlagen. Es findet Einsatz sowohl in der Planung als auch bei der Bewertung von Anlagen im Bestand.

### Anwendung in der Praxis

Am Beispiel einer industriellen Prozesskälteanlage wird eine mögliche Anwendung der SiMREFF-Simulationssoftware erläutert. Die Hauptkomponenten der Kälteanlage wurden bereits in der Planung durch den Hersteller in Hinblick auf einen effizienten

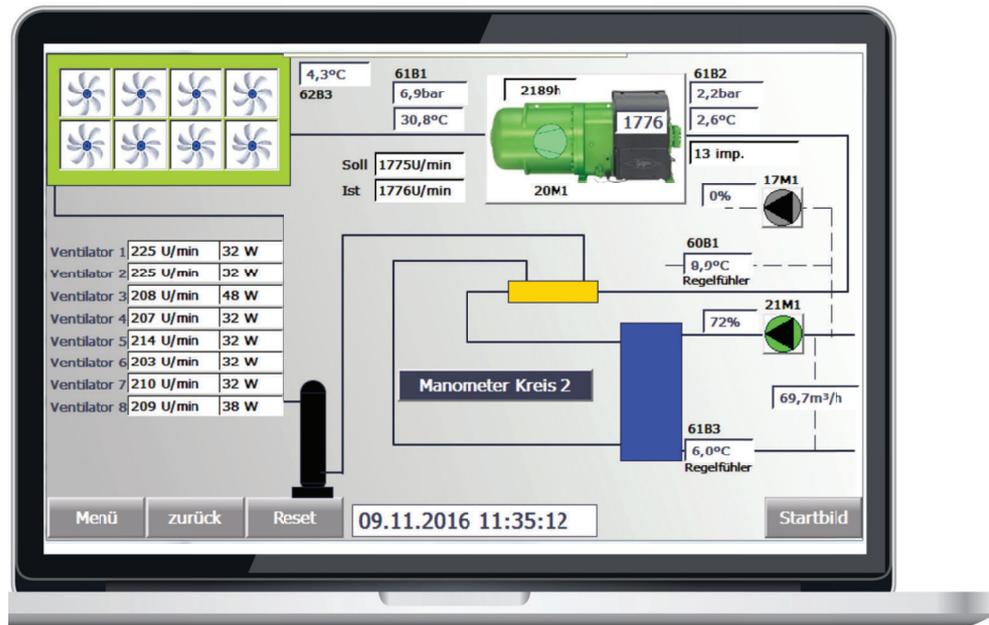


Abbildung 5: Bildschirm der Industrie-Prozesskälteanlage mit Ist-Daten der SiMREFF-Regelstrategie

Anlagenbetrieb aufeinander abgestimmt. Die Herausforderung für SiMREFF bestand in einer weiteren Effizienzsteigerung der Anlage durch die Definition einer optimierten und implementierbaren Regelstrategie. Bei der Anlage handelt es sich um eine von der Combitherm GmbH für Außenaufstellung geplante Industrie-Prozesskälteanlage (siehe Abbildung 4). Diese besteht aus zwei getrennten R134a-Kältekreisläufen, Verflüssigern mit EC-Ventilatoren, drehzahlgeregelten Schraubenverdichtern sowie zwei drehzahlgeregelten Prozesswasserpumpen. Die Prozesskälte (6/12 °C) wird ganzjährig für Labors, Produktionsmaschinen und zusätzlich in den Sommermonaten für

die Gebäudeklimatisierung eingesetzt. Die Produktion erfolgt im Dreischichtbetrieb. Somit resultieren annähernd 8760 h Betriebsstunden im Jahr. Für die Generierung des Kältebelastungsprofils (Anwenderprozess) ist ein außentemperaturabhängiges Lastprofil mit einer Grundlast von 320 kW und einer maximalen Kühllast von 920 kW ermittelt worden. Die maximale Last tritt ab einer Außenlufttemperatur von 32 °C auf. Wesentliche Randbedingungen zum Lastprofil sind aus Tabelle 1 zu entnehmen.

Die Kältemaschine wurde für dieses individuelle Kundenprojekt mit dem SiMREFF-Simulationsmodell abgebildet. Auf Basis des vorhin genannten Lastprofils oder der



## GLYKOSOL N



DIE **ENERGIE** FÜR EIN PROFESSIONELLES KLIMA

Kälte- und Wärmeträgerflüssigkeit auf Basis  
Monoethylenglykol für technische Anwendungen

pro KÜHLSOLE GmbH

Am Langen Graben 37  
D-52353 Düren

Tel.: +49 2421 59196-0  
info@prokuehlsole.de

[www.prokuehlsole.de](http://www.prokuehlsole.de)



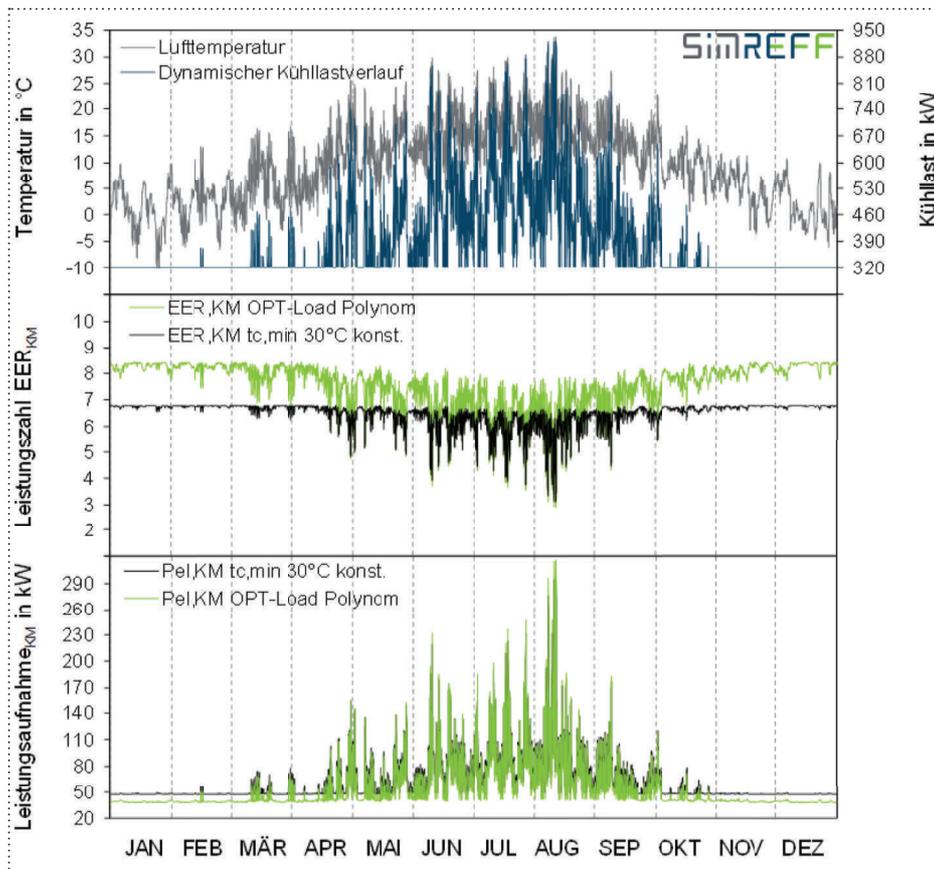


Abbildung 6: Dynamischer Produktionskühlprozess: Außentemperatur und Vergleich von Leistungszahl und Leistungsaufnahme der Prozesskälteanlage im Jahresverlauf über 8760 h/a

Teillastverhältnisse, der Verdichter-Polynome, der Wärmeübertrager-Kennzahlen, der Druckverluste im Kältekreislauf und Energieverbräuche der Prozesswasserpumpen wurde eine Jahressimulation durchgeführt. Aufbauend auf diesem Modell wurden aus der Jahressimulation optimierte Regelstrategien abgeleitet und mit Energiebilanzen ausgewertet. Die für den Standort und entsprechend dem Lastprofil effizienteste Variante wurde identifiziert und daraus ein neues gesamtes spezifisches SiMREFF-Kälteanlagen-Polynom erzeugt. Das sogenannte SiMREFF-OPT-Load-Polynom wurde letztendlich in die speicherprogrammierbare Regelung (SPS) der realen Combitherm-Kälteanlage implementiert, siehe Abbildung 5.

Ein Vergleich zwischen einer Regelstrategie mit konstanter Verflüssigungstemperatur ( $t_{c, \min \text{ konst.}}$ ) und der optimierten SiMREFF-Regelstrategie (OPT-Load-Polynom) zeigt Tabelle 2 und Abbildung 6. Die statische Regelstrategie regelt die Verflüssigungstemperatur auf konstant 30 °C, während die dynamische Regelstrategie eine variable Verflüssigungstemperatur von minimal 25 °C

zulässt. Eine variable Verflüssigungstemperatur führt zu einer Betriebsweise, die die Komponenten, Verdichter und Verflüssigungsventilatoren in einem energetisch optimalen Gleichgewicht hält. Dies wiederum ermöglicht einen energetisch optimierten Betrieb der Gesamtkälteanlage unter schwankenden Lastanforderungen und Außentemperaturen. Es ergeben sich Einsparungen an elektrischer Energie von ca. 63 MWh/a und der ermittelte mittlere EER über 8760 h/a steigt um ca. 15 % von 6,49 auf 7,60 an. Ein Vergleich der Leistungszahlen für die beiden Betriebsweisen ist in Abbildung 6 dargestellt. Durch diese regelungstechnische Optimierung an der Kältemaschine ergibt sich eine Einsparung von ca. 12 % bzw. 11.676 €/a (Strompreis 0,16 Ct/kWh). Die Ergebnisse zeigen, dass die Anwendung des spezifisch erstellten SiMREFF-OPT-Load-Polynoms, ermittelt aus der Simulationsberechnung, ein beachtliches Optimierungspotential birgt (vgl. Abbildung 6). Dies setzt allerdings präzise Kenntnisse des Lastverlaufs auf Betreiberseite voraus. In Unkenntnis eines Lastprofils hat die statische Regelstrategie nach wie vor ihre Berechtigung.

## Fazit

Die angewandte Methodik SiMREFF zeigt am Beispiel des Praxisobjekts, dass bedingt durch eine optimierte Betriebsweise ohne einen Austausch von Komponenten, Einsparungen von bis zu 12 % bei einem Return-on-Investment (ROI) von sechs Monaten möglich sind. Dieses Ergebnis deckt sich mit den möglichen Effizienzsteigerungspotenzialen, wie in Abbildung 1 dargestellt. Die Auswertung von Monitoringdaten an dieser Anlage und ein erster Vergleich von Einzelergebnissen aus der Simulation mit aktuellen Anlagendaten zeigt, dass das SiMREFF-OPT-Load-Polynom erfolgreich in die Anlagenregelung implementiert wurde. Die Gesamtprozessoptimierung und die Effizienzsteigerung können erst durch die dynamische Systemsimulation und eine ganzheitliche Betrachtung des Anwender-, Kälte- und Wirtschaftlichkeitsprozess erreicht werden.

Das Effizienzsteigerungspotenzial für Kälteprozesse liegt je nach Anlage und Standort im Bereich von 10-40 % und es gilt dieses individuell zu identifizieren. Innovative Kälteprozesse können im SiMREFF-Modell abgebildet und neutral verglichen werden. Die Ergebnisse können daher auch zur softwaregestützten Energieberatung für Kälteanlagen im Rahmen eines BAFA-Energieaudits herangezogen werden.

## Literatur

- [1] Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein, 2002. Energiebedarf für die technische Erzeugung von Kälte. Statusbericht des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins Nr. 22. ILK, FKW Uni Essen, Stuttgart.
- [2] Daten aus Arnemann et al: Kältetechnologien in Deutschland, Studie, Hochschule Karlsruhe, Projektträger Jülich 2013
- [3] Positionspapier des Forschungsrats Kältetechnik e.V., 2012. Klimaschutzbeitrag von Kälte- und Klimaanlageanlagen, Verbesserung der Energieeffizienz, Verminderung von treibhausrelevanten Emissionen. Verfügbar unter [http://fkt.com/fileadmin/user\\_upload/Positionspapier/Positionspapier\\_Klimaschutzbeitrag.pdf](http://fkt.com/fileadmin/user_upload/Positionspapier/Positionspapier_Klimaschutzbeitrag.pdf) [26.01.2017].
- [4] Deutsches Institut für Normung e.V., 2013. DIN EN 12900: Kältemittel-Verdichter – Nennbedingungen, Toleranzen und Darstellung von Leistungsdaten des Herstellers. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [5] Verein Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA), 2011. VDMA 2427-2: Energieeffizienz von Kälteanlagen Teil 2: Anforderungen an das Anlagenkonzept und die Komponenten. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

