

Sigrid Wenzel & Tim Peter (Hrsg.)

# Simulation in Produktion und Logistik 2017

Kassel, 20.-22. September 2017



kassel  
university



press

Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. Sigrid Wenzel

Universität Kassel

Fachgebiet Produktionsorganisation und Fabrikplanung

Kurt-Wolters-Straße 3

34125 Kassel

[sekretariat-pfp@uni-kassel.de](mailto:sekretariat-pfp@uni-kassel.de)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-7376-0192-4 (print)

ISBN 978-3-7376-0193-1 (e-book)

DOI: <http://dx.medra.org/10.19211/KUP9783737601931>

URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0002-401934>

© 2017, kassel university press GmbH, Kassel

[www.upress.uni-kassel.de](http://www.upress.uni-kassel.de)

# Prädiktive simulationsgestützte Optimierung von Kältemaschinen im Verbund

## *Predictive Simulation-based Optimization of Cooling Systems*

Ron-Hendrik Peesel, Florian Schlosser, Chris Schaumburg, Henning Meschede,  
Universität Kassel, Kassel (Germany), peesel@upp-kassel.de,  
schlosser@upp-kassel.de, cschaumburg@student.uni-kassel.de,  
meschede@upp-kassel.de

**Abstract:** Prerequisite for an efficient cooling energy system is the knowledge and the optimal combination of different operating conditions of individual compression chillers. The performance of cooling systems depending on its part load performance and its condensing temperature are often unknown. Recorded energy data remains unused and manufacturers' data differs significantly from the real performance. For this purpose, manufacturer and real data are combined and continuously adapted to form partial load curve models. A predictive optimization algorithm calculates the optimal operating conditions of multiple chillers. The set points from the optimization are continuously validated by a dynamic simulation on the reaction and feedback effects of the system. Finally, a case study of a meat processing plant evaluates different scenarios against the status quo. Applying an optimal chiller loading and condensing temperature increases energy efficiency of up to 24 %.

## 1 Einleitung

Auf dem Weg zu 80 % weniger Treibhausgasemissionen und 50 % weniger Primärenergieverbrauch bis 2050 setzt die Bundesregierung (2010) insbesondere auf die Steigerung der Energieeffizienz. Der zunehmende Vernetzungsgrad im digitalen Zeitalter ermöglicht den automatisierten und optimierten Betrieb von Versorgungsanlagen. Eine hohe Systemeffizienz ist nur durch ein effizientes und flexibles Versorgungssystem zu erzielen. Voraussetzung dafür ist die stärkere Vernetzung von Querschnittstechnologien, Prozessen und Prozessleittechnik durch das Erfassen und Auswerten von Daten. Im Rahmen der Einführung von Energiemanagementsystemen ist die energetische Ausgangssituation in Unternehmen durch ein Energiedatenerfassungssystem (EDS) aufzunehmen und über geeignete Kennzahlen zu bewerten. Anhand dieser ist die energiebezogene Leistung im kontinuierlichen Verbesserungsprozess zu steigern (ISO 50001 2011). Häufig werden die entsprechenden Produktions- und Energiedaten mittels eines Energiemonitoringsystems oder über die

Gebäude- oder Prozessleittechnik erfasst. Neben der Visualisierung von Energieströmen und der Zuordnung von Energieverbräuchen zu ihren Verursachern ermöglicht ein EDS, die Energieeffizienz von Anlagen durch die Einführung geeigneter Kennzahlen im Rahmen von über- und innerbetrieblichen Benchmarks zu bewerten.

Weiterführende Datenanalysen finden oftmals nicht statt. So werden große Datenmengen ungenutzt in Datenbanken abgelegt und zur Speicherentlastung zu kleineren Zeitaufösungen (Tages-, Wochen- oder Monatswerten) aggregiert. Dabei beschreiben die Energiedaten das Verhalten der Anlagen in ihrem Betriebsbereich genau. Demgegenüber stehen Hemmnisse vor der Umsetzung von Effizienzmaßnahmen, weil Wechselwirkungen mit der Produktion und die genaue Kosteneinsparung nicht belastbar prognostizierbar sind. Effizienzpotenziale bleiben unerschlossen.

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) geht davon aus, dass durch Effizienztechnologien im Bereich der Gewerkekälte 30-50 % Energieeinsparungen möglich sind (Reinhardt 2016). Dazu bedarf es intelligenter Regelungen, welche einen Verbund aus Einzelanlagen zur Kälteerzeugung unter Berücksichtigung ihrer dynamischen Wechselwirkungen und mit äußeren Randbedingungen im optimalen Betriebspunkt betreiben. Kältemaschinen weisen einen individuellen Betriebsbereich auf, der in Zusammenhang mit Verflüssigungstemperatur und Teillast steht (Yu und Chan 2008). Die Absenkung der Verflüssigungstemperatur hat eine Erhöhung des Coefficient of Performance (COP) um etwa 3 % pro Kelvin zur Folge (Roth 2007). In vielen Fällen sind Kältemaschinen mit unterschiedlichen Betriebseigenschaften zu einer Kältezentrale zusammengeschaltet. Herkömmliche Regelungen sind nicht imstande, selbstständig eine optimale Kombination für unterschiedliche Betriebszustände zu finden. Vor allem die Mitbeachtung der Leistungsaufnahme der Pumpen und Rückkühlssysteme macht die Kältezentrale zu einem komplexen Optimierungsproblem (Yu und Chan 2008).

## 2 Stand der Wissenschaft

Zum Erschließen des Energieeffizienzpotenzials ist die optimierte Betriebsweise von Kälteerzeugungseinheiten im Verbund mit Hilfe eines Regelalgorithmus umzusetzen. Dynamische Simulationen unterstützen sowohl die Validierung von Effizienzkonzepten vor der Umsetzung als auch die modellbasierte Optimierung (VDI 3633 Blatt 12 2016). Clausen et al. (2015) zeigen, dass die Kopplung von Optimierung und Simulation von Paketsortieranlagen zu Effizienzsteigerungen führt. Diese Methodik ist auf die Effizienzsteigerung von Energieversorgungsanlagen übertragbar. Praktisch umsetzbar ist dies mit einer Modellprädiktiven Regelung (MPC). Diese ermöglicht zum einen die modellgestützte Vorhersage des Systemverhaltens und zum anderen die Implementierung eines Optimierungsalgorithmus, der die optimierten Steuergrößen berechnet. Augenstein (2009) erörtert, dass durch eine einmalige lineare Optimierung der Einsatzstrategie von Kältemaschinen sich der Strombedarf um 11 % reduzieren lässt. Gleichzeitig wird dargestellt, dass sich auch für spezifisch angepasste Expertenregelungsstrategien bei der Inbetriebnahme von Kälteanlagen Optimierungspotenziale ergeben. Veränderungen der Randbedingungen verschieben das Betriebsoptimum einer Anlage im Laufe ihres Lebenszyklus. Das der MPC zugrundeliegende Prognosemodell kann auf Basis der Daten des EDS selbstlernend gestaltet werden (Lautenschlager und Lichtenberg 2016). Hovgaard et al. (2012) zeigen am Beispiel

einer Supermarkt-Kälteversorgung, dass mit Hilfe von MPC Einsparungen von 9-32 % durch die Nutzung eines thermischen Speichers, Vorhersagen der wechselnden Last und unter Berücksichtigung variierender Energiepreise möglich sind. Olson und Liebmann (1990) beschreiben einen mathematischen Ansatz zur Verteilung der Lasten auf mehrere Kältemaschinen zur Minimierung der Energiekosten. In der simulanten Optimierung von Kältemaschinen und Kühltürmen werden auch Mehrzieloptimierungen mit Genetischen Algorithmen angewendet (Sayyaadi und Nejatolahi 2011). Verschiedene Methoden zur Optimierung der Teillastregelung sind in der Literatur beschrieben, wie zum Beispiel die Branch-and-Bound Methode (Chang et al. 2005a), Dynamische Programmierung (Chang 2006), Gradientenmethode (Chang et al. 2010), Genetische Algorithmen (Chang et al. 2005b), Evolutionäre Algorithmen (Chang 2007), Simulated Annealing (Chang und Yung-Chung 2006) und Particle Swarm Optimierung (Lee und Lin 2009). Unbeachtet bleibt die Abhängigkeit des Wirkungsgrades einer Kältemaschine von Teillastzustand und Rückkühltemperatur für einen Zeithorizont von mehreren Stunden. Bisherige Untersuchungen auf diesem Gebiet widmen sich der Erstellung von Fahrplänen für die Einschaltreihenfolge von Kälteverbundsystemen auf Basis eines linearen Optimierungsalgorithmus (Brenner et al. 2014).

Der Innovationsgrad dieses Beitrages besteht in der Betrachtung der Wechselwirkungen von optimaler Verflüssigertemperatur und Teillastwirkungsgrade der Kältemaschinen mithilfe von Energiedaten. Auf dieser Grundlage ermöglicht die Kopplung von Optimierung und energetischer Simulation des Systems eine energieeffiziente Versorgung von Kühlprozessen.

### 3 Methodik und Modellierung

Dieser Abschnitt beschreibt die Methodik und die Modellierung der Systeme unter Verwendung einer modellbasierten prädiktiven Optimierung unter Berücksichtigung des individuellen Betriebsverhaltens und des dynamischen Verhaltens eines Kälteversorgungssystems.

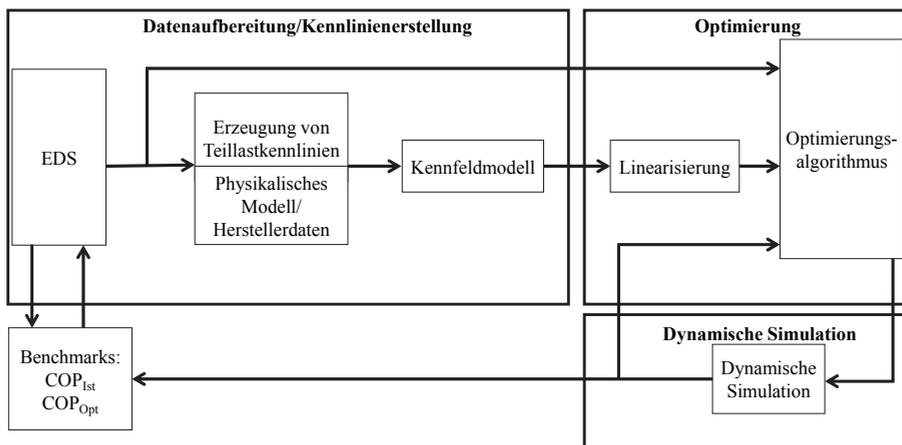
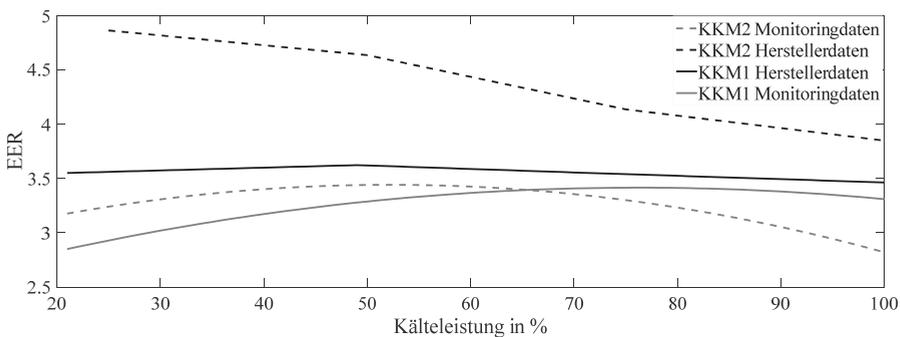


Abbildung 1: Methodik der simulationsgestützten Optimierung mit Realdaten

In Abbildung 1 ist die Vorgehensweise, unterteilt in die Bereiche Datenaufbereitung/Kennlinienerstellung, Optimierung und dynamische Simulation, dargestellt. Die Teilbereiche werden im Folgenden näher beschrieben.

### 3.1 Datenaufbereitung und Kennlinienerstellung

Ein EDS sammelt Informationen über das Verhalten eines Energieversorgungssystems über die vorliegenden Betriebsbereiche. Mithilfe einer geeigneten Schnittstelle werden relevante Betriebszustände und -größen der Kältemaschinen und Umgebungsdaten abgerufen. Die Bildung der Kennfelder erfolgt durch die Zuordnung des gemessenen COP zu variierenden Teillastzuständen und den entsprechenden Verflüssigertemperaturen. Diese Kennfelder bilden bei konstanter Betriebsführung lediglich einen Auszug des gesamten Betriebsbereichs der Anlage ab und beinhalten nur selten den optimalen Betriebspunkt. Ebenso bilden die Herstellerangaben nur das Anlagenverhalten in bestimmten Betriebspunkten unter Standardtestbedingungen, z. B. im Auslegungspunkt, ab. In Abbildung 2 ist die Leistungszahl in Abhängigkeit des Teillastverhaltens für die Herstellerdaten in schwarz und für die realen Anlagendaten in grau dargestellt.



**Abbildung 2:** Teillastverhalten von Kältemaschinen bei konstanter Kondensations-temperatur von 26 °C

Die Abweichung im Betriebsverhalten unterstreicht die Notwendigkeit für die Integration von Realdaten zur modellbasierten Optimierung der Einsatzregelung eines bestehenden Systems. In der Realität zeigt sich, dass selbst zwei baugleiche Maschinen am gleichen Aufstellungsort ein unterschiedliches Leistungsverhalten aufweisen können (Brenner et al. 2014). Daher besteht der Bedarf an einem physikalischen Modell, welches auf teilempirischen Beschreibungsformeln beruht. Die Parameter des Modells werden sowohl über die vorliegende Datenbasis als auch durch die extrahierten Teillastkennlinien adaptiert. Die Kopplung der Datenbank des EDS mit der Modellierung ermöglicht die fortlaufende Aktualisierung der Kennfelder und steigert somit die Güte der Modelle.

### 3.2 Mathematische Modellierung

Die Optimierung ist als gemischt ganzzahliges lineares Programm formuliert. Ausschlaggebend für die Wahl dieser Art von Optimierung sind die Betriebszustände

der Kältemaschinen, die sich nur diskret ansteuern lassen und somit ganzzahlige Lösungen voraussetzen. Im ersten Schritt erfolgt eine eigenständige Optimierung der elektrischen Leistungsaufnahme des Trockenkühlers in Abhängigkeit der Rückkühltemperatur. Die Wahl der Rückkühltemperatur stellt einen Kompromiss zwischen erhöhter Leistungsaufnahme des Kühlturmgebläses zur Erhöhung des Wärmeübergangs und der elektrischen Leistungsaufnahme des Verdichters dar, um auf eine entsprechende Kondensationstemperatur zu verdichten. Im zweiten Schritt ist eine geeignete Aufteilung der Kälteleistung für die optimalen Betriebszustände der Kältemaschinen im Verbund das Ziel.

Die allgemeine Formulierung der Kostenfunktion lautet:

$$\min c^T x \quad (1)$$

Vektor  $x$  enthält ausschließlich binäre Einträge, die wiedergeben, welche in Vektor  $c$  definierten Zustände aktiv sind.

In Bezug auf die erste Optimierung wird dem Vektor  $c$  die elektrische Leistungsaufnahme des Trockenkühlers und der Kältemaschinen zugeordnet. Die Gesamtsumme der elektrischen Leistungsaufnahmen gilt es zu minimieren. Jede Kältemaschine erhält zu jeder potenziell möglichen Kühlwassertemperatur einen Eintrag der elektrischen Leistung in  $c$ . Die weiteren Einträge entfallen auf die elektrischen Leistungsaufnahmen des Trockenkühlers bei unterschiedlichen zu erbringenden Kühlwassertemperaturen.

Die elektrischen Leistungen des Trockenkühlers für unterschiedliche Kühlwassertemperaturen werden einer Kennlinie entnommen, die auf Daten des EDS basiert. Die Berechnung der elektrischen Leistungsaufnahmen der Kältemaschinen basiert auf folgendem modifizierten Zusammenhang von Yu und Chan (2005).

$$\Delta P_{el} = \frac{CC}{a \cdot PLR^b \cdot \Delta T_{cd}} \quad (2)$$

Darin sind Kälteleistung ( $CC$ ), Teillastpunkt ( $PLR$ ) und Kühlwassertemperatur ( $T_{cd}$ ) enthalten. Die Koeffizienten  $a$  und  $b$  werden individuell auf Basis der Daten des EDS angepasst.

Aus dem Ergebnis der Optimierung lässt sich die für den aktuellen Zeitpunkt optimale Kühlwassertemperatur ableiten.

Die zweite Optimierung minimiert den Gesamtenergieverbrauch der Anlage bei der vorher bestimmten Kühlwassertemperatur durch Berechnung einer Folge der optimalen Betriebszustände eines Kältemaschinenverbunds mit  $J$  Anlagen für  $N$  zeitdiskrete Berechnungsschritte. Vektor  $c$  ordnet hier jedem Betriebszustand einer jeden Kältemaschine eine elektrische Leistung zu. Die Betriebszustände der Kältemaschinen können dabei in Ein-Prozent-Schritten im Bereich von 0-100 % gewählt werden. Der minimale Prozentwert ist von der jeweiligen Kältemaschine abhängig. Zusätzlich werden für jeden Berechnungsschritt Startkosten für jede Kältemaschine berücksichtigt, um den höheren Strombedarf häufiger Schaltzyklen zu berücksichtigen. Der in Summe in allen  $N$  Zeitschritten zu erbringende Kältebedarf wird der Optimierung als Bedingung vorgegeben.

### 3.3 Simulationsmodell

Für die Implementierung der in Abbildung 1 visualisierten Methodik wird auf MATLAB®/SIMULINK®, welches sich durch die problemlose Kopplung zwischen Optimierung und Simulation auszeichnet, zurückgegriffen. SIMULINK® bietet die Möglichkeit, eine dynamische Simulation auf Basis von grafischen Blöcken durchzuführen. Die Simulation baut auf den erstellten Kennlinienmodellen auf und stellt ein Abbild der Realität dar. Die Ergebnisse der Optimierung werden als Sollwerte der Regelgrößen an die Simulation übermittelt und somit die Reaktion und die Rückkopplungseffekte des Systems überprüft. Bestehend aus zwei Kältemaschinenmodellen, einem thermischen Kaltwasserspeichermodell und einem Ventilmodell berücksichtigt die Simulation die dynamischen Wechselbeziehungen zwischen den Anlagen, thermische Trägheiten und das Anfahrverhalten. Auf diese Weise werden die Einschränkungen der linearen Optimierung kompensiert. Für die nächsten Prädiktionen werden die aktuellen Maschinenzustände und der Speicherstand aus der Simulation rollierend an die Optimierung übergeben und Abweichungen im Verhalten der Anlagen korrigiert.

## 4 Fallstudie

Zur Anwendung und Validierung der Optimierung und des Simulationsmodells wird auf die EDS-Daten eines fleischverarbeitenden Betriebes zurückgegriffen. Es handelt sich um einen mittelständischen Betrieb in Deutschland mit einer jährlichen Produktionsmenge von 1200 t. Es werden Roh-, Koch- und Brühwurst hergestellt. Hierzu wird das Rohmaterial in passende Stücke geschnitten und kalt gelagert. Anschließend erfolgt die Weiterverarbeitung, je nach Endprodukt, mittels Kutter oder Fleischwolf. Darauffolgend werden die Fleischerzeugnisse gekocht oder direkt im Reiferaum gereift. Vor dem Verpacken und Versenden der Ware werden alle Wurstprodukte im Kühlraum gelagert. Zur Lagerung der Fleischprodukte ist eine Kaltwassertemperatur von  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$  vorgegeben, welche nicht angepasst werden kann. Die Kältezentrale setzt sich aus zwei Kältekompressionsmaschinen unterschiedlicher Leistung, einem Trockenkühler zur Rückkühlung der Kältemaschinen und einem Kaltwasserspeicher als hydraulische Weiche zusammen. Die drehzahlvariablen Kältemaschinen weisen eine Kälteleistung von 210 kW und 170 kW im Auslegungspunkt auf. Die Kältemaschine mit der größeren Leistung wird konstant in Volllast betrieben. Für die Kältemaschinen mit 170 kW wird die Kältebereitstellung an den variierenden Kältebedarf angepasst. Zusätzliche Anwendung findet die Kältebereitstellung in der Raumkühlung, Klimatisierung und Prozesskühlung.

## 5 Szenarien und Ergebnisse

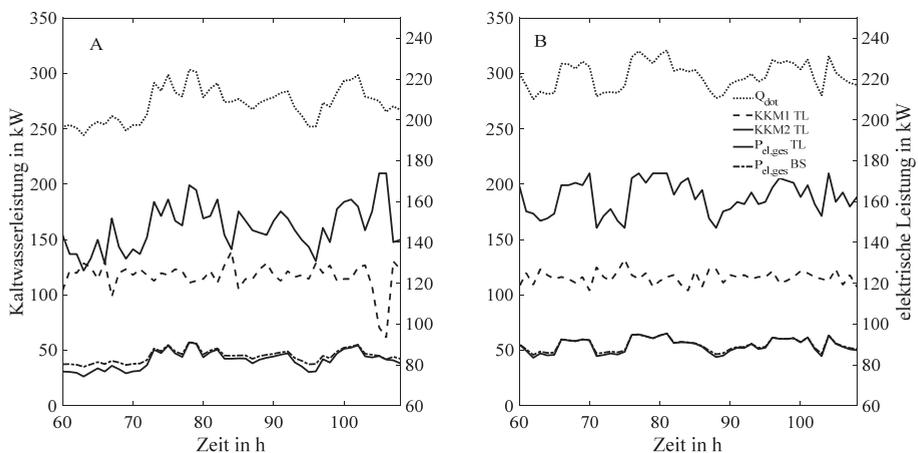
Zur Ermittlung des Einflusses der Teillast und der Rückkühltemperatur für die Optimierung sind die drei Szenarien Basisszenario (BS), Teillastoptimierung (TL) und Teillastoptimierung mit Rückkühloptimierung (RTL) definiert. Zur Berücksichtigung von unterschiedlichen Außentemperaturen werden die Simulationen in allen drei Szenarien für einen kühlen und einen warmen Zeitraum von einer Woche im Jahr durchgeführt. Alle Optimierungen haben einen Prädiktionshorizont von fünf Stunden. In Tabelle 1 sind die Unterschiede der Szenarien beschrieben und die Einsparungen der

prädiktiven simulationsgestützten Optimierung von Kältemaschinen im Verbund zusammengefasst. Die Einsparungen der Szenarien beziehen sich auf das Basisszenario BS.

**Tabelle 1:** Definition der Szenarien und Ergebnisse

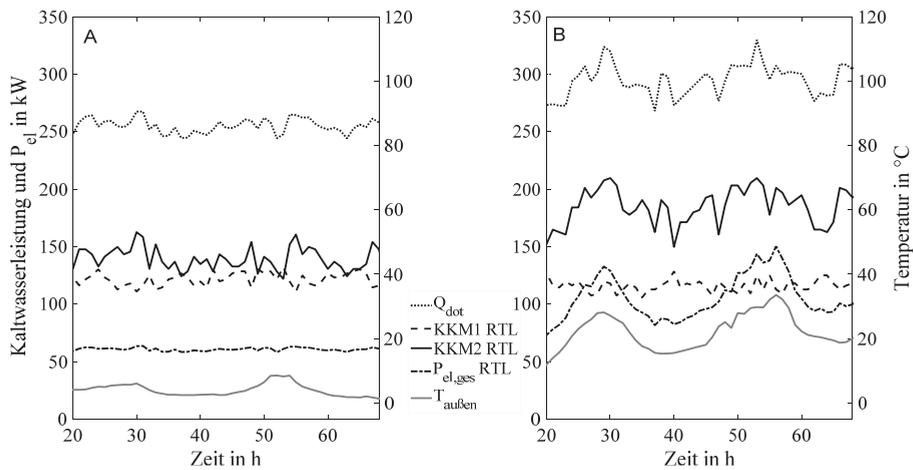
	Szenario BS	Szenario TL	Szenario RTL
Rückkühltemperatur	konstant 26 °C	konstant 26 °C	außentemperaturabhängig
Lastverteilung	KKM2 konstant KKM1 variabel	teillastoptimiert	teillastoptimiert
Energieeinsparungen	-	0,9-2,9 %	-20-23,79 %

In Abbildung 3 sind exemplarisch für einen Zeitraum von 48 Stunden und das Szenario TL der Kältebedarf und die entsprechende Modulation der Kältemaschinen bei konstanter Außentemperatur dargestellt. Zusätzlich ist die elektrische Leistung beider Kältemaschinen für das Basisszenario und die Optimierung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass durch die Optimierung der Teillastzustände in den kalten Monaten eine höhere Energieeinsparung erzielt wird. Im kalten Zeitraum ist der Kältebedarf geringer und somit arbeiten die verwendeten Kältemaschinen häufiger mit einer optimalen Leistungszahl. Die prozentualen Einsparungen belaufen sich für einen kalten Zeitraum auf 2,9 % und für einen warmen Zeitraum auf 0,9 %.



**Abbildung 3:** Teillastoptimierung mit konstanter Rückkühltemperatur 26 °C für einen kalten Zeitraum (A) und einen warmen Zeitraum (B)

Je nach Verdichterart und -anzahl variiert die Lage des Betriebsoptimums, und es ergeben sich andere Energieeinsparpotenziale. In der folgenden Abbildung 4 wird analog zu Abbildung 3 die außentemperaturabhängige Teillastoptimierung dargestellt.



**Abbildung 4:** Außentemperaturabhängige Teillastoptimierung für einen kalten Zeitraum (A) und einen warmen Zeitraum (B)

Aufgrund des starken Einflusses der Rückkühltemperatur auf die Effizienz der Kältemaschinen ist das Energieeinsparpotenzial mit 23,8 % im kalten Zeitraum am größten, wohingegen in den warmen Monaten keine Einsparungen erzielt werden. Zeitweise ist ein erhöhter elektrischer Energieverbrauch möglich. Die Anpassung der Rückkühltemperatur führt zu einer Effizienzsteigerung, welche an der geringeren elektrischen Leistungsaufnahme des Verdichters beim Verdichten auf die entsprechende Kondensationstemperatur liegt. In der kalten Periode wird fast dauerhaft eine optimale Rückkühltemperatur von 18 °C erreicht. In der warmen Periode steigt bei hohen Außentemperaturen die Rückkühltemperatur an und reduziert die Effizienz der Anlage. Das Einsparpotenzial der außentemperaturabhängigen Teillastoptimierung ist stark von der Außentemperatur abhängig.

## 6 Fazit und Ausblick

Im vorgestellten Kälteversorgungssystem aus mehreren Kältemaschinen besteht ein Energieeinsparpotenzial von 23,79 % mittels der Teillastoptimierung und der Anpassung der Rückkühltemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur. Die prädiktive simulationsgestützte Optimierung eignet sich zur Erschließung des Einsparpotenzials unter Berücksichtigung des dynamischen Verhaltens eines Kälteversorgungssystems. Die starken Abweichungen der Leistungsdaten der Kältemaschinen bedingen die Verwendungen von Realdaten eines Energiedatenerfassungssystems. Vorteilhaft für die Implementierung der Optimierungsstrategie in einem industriellen Versorgungssystem ist, dass nur eine Anpassung der Regelung notwendig ist. Im Weiteren ist der Einfluss eines größeren Speichersystems auf das Energieeinsparpotenzial der Optimierung zu prüfen. Die Erprobung weiterer Optimierungsalgorithmen zur Bestimmung des optimalen Verhältnisses von Genauigkeit und Rechenaufwand ist der Fokus zukünftiger Arbeiten. Vor der tatsächlichen Implementierung der Optimierungsstrategie ist diese auf einer Laboranlage zu erproben.

## Danksagung

Die Autoren danken der Rud. Otto-Meyer-Umwelt-Stiftung für die Förderung der Forschungsarbeit mit Finanzmitteln für dieses Projekt.

## Literatur

- Augenstein, E.: Betriebsoptimierung von Kältezentralen – Einsparpotentiale durch situationsabhängige Einsatzregeln. KKA Kälte Klima Aktuell Sonderausgabe Großkältetechnik (2009), S. 4.
- Brenner, A.; Kausch, C.; Kirschbaum, S.; Lepple, H.; Zens, M.: Effizienzsteigerung in einem komplexen Kühlwassersystem (2014), S. 1-6.
- Bundesregierung, 2010: Ziele der Energiepolitik der Bundesregierung. Hg. v. Bundesregierung.  
[https://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Fragen-Antworten/1\\_Allgemeines/1\\_warum/\\_node.html#doc605764bodyText2](https://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Fragen-Antworten/1_Allgemeines/1_warum/_node.html#doc605764bodyText2). Letzter Zugriff am 28.02.2017.
- Chang; Yung-Chung: An innovative approach for demand side management—optimal chiller loading by simulated annealing. *Energy* 31 (2006) 12, S. 1883–1896.
- Chang, Y.-C.: An Outstanding Method for Saving Energy—Optimal Chiller Operation. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 21 (2006) 2, S. 527–532.
- Chang, Y.-C.: Optimal chiller loading by evolution strategy for saving energy. *Energy and Buildings* 39 (2007) 4, S. 437–444.
- Chang, Y.-C.; Chan, T.-S.; Lee, W.-S.: Economic dispatch of chiller plant by gradient method for saving energy. *Applied Energy* 87 (2010) 4, S. 1096–1101.
- Chang, Y.-C.; Lin, F.-A.; Lin, C.H.: Optimal chiller sequencing by branch and bound method for saving energy. *Energy Conversion and Management* 46 (2005a) 13-14, S. 2158–2172.
- Chang, Y.-C.; Lin, J.-K.; Chuang, M.-H.: Optimal chiller loading by genetic algorithm for reducing energy consumption. *Energy and Buildings* 37 (2005b) 2, S. 147–155.
- Clausen, U.; Diekmann, D.; Baudach, J.; Pötting, M.: Mathematischen Optimierung und Simulation von Paketsortieranlagen – Bessere Lösungen durch Kopplung der beiden komplementären Methoden. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): *Simulation in production and logistics 2015*. Stuttgart: Fraunhofer 2015, S. 279–288.
- Hovgaard, T.G.; Larsen, L.F.; Edlund, K.; Jørgensen, J.B.: Model predictive control technologies for efficient and flexible power consumption in refrigeration systems. *Energy* 44 (2012) 1, S. 105–116.
- ISO 50001: DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Deutsche Norm: Energiemanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung; Deutsche Fassung EN ISO 50001:2011*. Berlin: Beuth 2011.
- Lautenschlager, B.; Lichtenberg, G.: Data-driven Iterative Learning for Model Predictive Control of Heating Systems. *IFAC-PapersOnLine* 49 (2016) 13, S. 175–180.
- Lee, W.-S.; Lin, L.-C.: Optimal chiller loading by particle swarm algorithm for reducing energy consumption. *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 8-9, S. 1730–1734.

- Olson, R.T.; Liebmann, J.S.: Optimization of a chilled water plant using sequential quadratic programming. *Engineering Optimization* 15 (1990) 3, S. 171–191.
- Reinhardt, S., 2016: Die Nationale Klimaschutzinitiative: Förderung der Kälte- und Klimatechnik zur Erreichung der Klimaschutzziele. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.
- Roth, P.: Energieeinsparung auf der Hochdruckseite einer Kälteanlage. Hg. v. Güntner AG & Co. KG, 2007.
- Sayyaadi, H.; Nejatolahi, M.: Multi-objective optimization of a cooling tower assisted vapor compression refrigeration system. *International Journal of Refrigeration* 34 (2011) 1, S. 243–256.
- VDI 3633 Blatt 12: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Simulation und Optimierung. Entwurf. Berlin: Beuth 2016.
- Yu, F.W.; Chan, K. T.: Experimental determination of the energy efficiency of an air-cooled chiller under part load conditions. *Energy* 30 (2005) 10, S. 1747–1758.
- Yu, F.W.; Chan, K. T.: Optimization of water-cooled chiller system with load-based speed control. *Applied Energy* 85 (2008) 10, S. 931–950.