

Betriebsoptimierung von Kältezentralen

Einsparpotentiale durch situationsabhängige Einsatzregeln

Eckardt Augenstein,
perpendo,
Aachen

Die Einsatzregelung von Kältemaschinen in größeren Kältezentralen mit mehreren Maschinen erfolgt derzeit meist nach empirischen Erfahrungswerten. Übergeordnete Regelungen sind zwar gelegentlich vorhanden, die Wahl der Parameterwerte, die jeweils einen hinsichtlich der Effizienz optimalen Betrieb der gesamten Kältezentrale garantieren würden, ist meist jedoch nicht offensichtlich. Eine typische Einsatzregelung ist die Kontrolle der Auslastung der jeweils aktiven Kältemaschinen über einen Wärmemengenzähler mit entsprechendem Zu- oder Abschalten der nächsten Maschine bei festen Belastungswerten (z. B. Zuschalten, bei Belastung größer 90 % für 10 min.). Zusätzlich wird lediglich noch eine Schaltreihenfolge der Maschinen festgelegt, um die gesamte Einsatzregelung zu definieren.

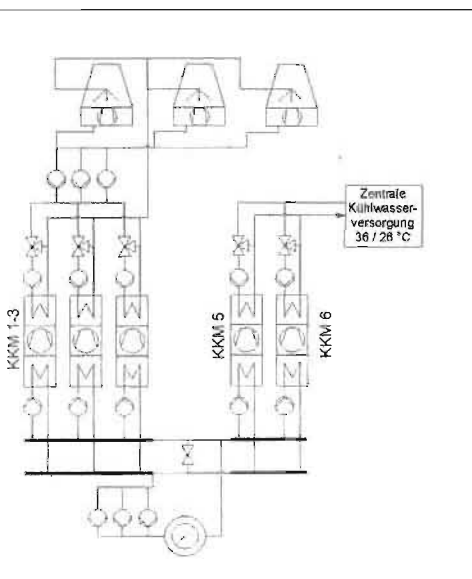


Bild 1: Struktur der betrachteten Kältezentrale

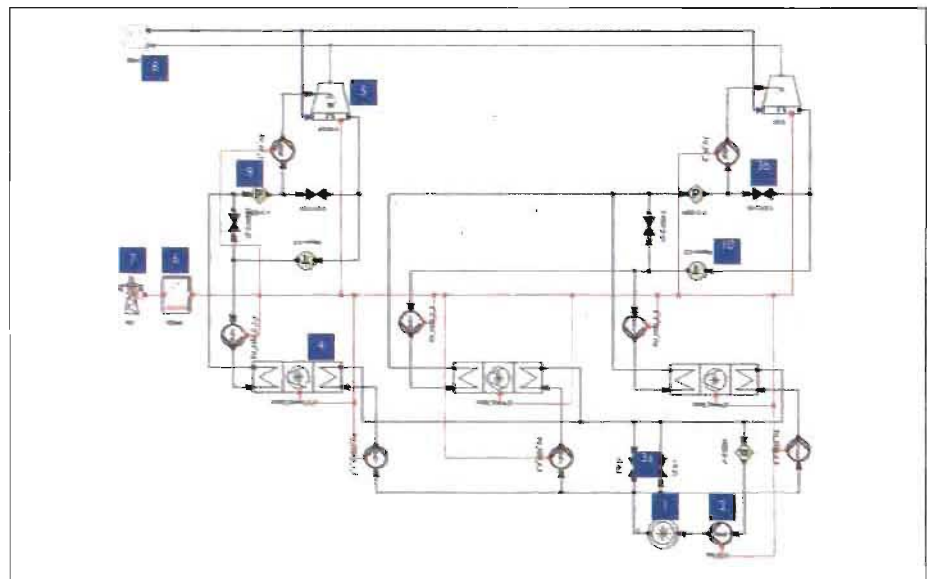


Bild 2: Darstellung des Simulationsmodells

Insbesondere bei historisch gewachsenen Kältezentralen mit Maschinen unterschiedlichen Typs und unterschiedlichen Leistungen ist die optimale Betriebsstrategie nicht so einfach zu beschreiben. Verschiedene Teillastverhalten, die Dynamik des Kältebedarfs und unterschiedliche Betriebsrandbedingungen der einzelnen Kaltwassersätze sind nur einige der Parameter, die aus dem Wunsch nach einer optimalen Einsatzregelung ein komplexes mathematisches Problem machen. In Folgenden werden die möglichen Lösungswege verschiedener Simulationsansätze sowie die Anforderungen an die entsprechenden mathematischen Modellierungen und der Nutzen an einem konkreten Beispiel beschrieben.

Beschreibung des untersuchten Systems | Betrachtet wird hier die Kältezentrale eines großen metallverarbeitenden Betriebes. Der Kältebelastungsgang der Anlage lag als Messreihe vor und ist durch einen großen prozessbedingten Grundlastanteil geprägt. Leistungsspitzen bis zu 3500 kW entstehen im Wesentlichen durch die gewünschte Gebäudekühlung. Insgesamt fünf wassergekühlte Kompressionskältemaschinen erzeugen Kaltwasser mit einer Vorlauftemperatur von 6 °C, welches über geregelte Netzpumpen an die verschiedenen Verbraucher im Werk verteilt wird. Der Einsatz der Maschinen geschieht wie oben beschrieben nach einer festgelegten Zuschaltreihenfolge, wobei das Zuschalten der jeweils nächsten Maschine erfolgt, wenn die

Kältebelastung für 10 min. 95 % der aktuell verfügbaren Kälteleistung übersteigt. Ebenso wird die jeweils letzte Maschine abgeschaltet, wenn über 15 min. weniger als 85 % der aktuell verfügbaren Kälteleistung benötigt wurden. Die Rückkühlung der Maschinen erfolgt über zwei verschiedene Kühlwassersysteme mit offenen Verdunstungskühltürmen. Die Kältemaschinen und Rückkühlwerke können dabei in zwei Gruppen unterteilt werden. Während die erste Gruppe von drei baugleichen Maschinen (KKM 1 bis 3) über ein eigenes Kühlturmsystem mit drei offenen Verdunstungskühlern verfügt, ist die zweite Gruppe bestehend aus zwei Kältemaschinen (KKM 4 und 5) an ein größeres Rückkühlsystem angeschlossen, welches zusätzlich verschie-

	Typ	Kältenennleistung
KKM 1 bis 3	Kaltwassersatz mit 4 Schraubenverdichtern	je 1250 kW
KKM 4	Kaltwassersatz mit Schraubenverdichter	1323 kW
KKM 5	Kaltwassersatz mit Turboverdichter	1800 kW

Tabelle 1: Leistungsdaten der Kältemaschinen

dene Produktionseinrichtungen mit Kühlwasser versorgt. Die Verschaltung des Systems ist in Bild 1 dargestellt. Die Leistungsdaten der Maschinen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Der Rücklauf des Kühlwassers aus den Kühltürmen wird in beiden Gruppen mit Hilfe von Dreiwegemischern auf 26 °C nach unten begrenzt. Verdampfer und Verflüssiger der Kältemaschinen werden im Betrieb durch je eine Primärkreispumpe mit einem konstanten Volumenstrom versorgt. Ungleichgewichte in den Volumenströmen zwischen Kälte- bzw. Kühlturmnetz und den Verdampfer bzw. Verflüssiger der Kältemaschinen werden durch entsprechende hydraulische Weichen ausgeglichen.

Einflüsse auf die Effizienz von Kaltwassersätzen

Die hier modellierten Kaltwassersätze finden in der Industrie breite Anwendung zur Versorgung von Produktionsprozessen und Klimaanlage mit Kaltwasser. Dementsprechend sind diese Maschinen in einem weiten Leistungsbereich und verschiedenen Bauartvarianten verfügbar. Zwar ist die Einbindung in das Versorgungssystem bei allen Maschinen nahezu identisch, je nach Ausführung der Verdichter sowie der Verdampfer- und Verflüssigereinheit ergibt sich für jedes Modell jedoch ein individuelles Teillastverhalten, welches für die hier betrachteten Maschinen in Bild 3 dargestellt ist. Dabei ist die Leistungszahl des Kaltwassersatzes über die Lastanforderung aufgetragen. Die KKM 4 und 5 weisen dabei eine zu hohen Leistungen ansteigende Leistungszahl auf, die im oberen Teillastbereich ihr Maximum erreicht und zur Volllast hin wieder leicht abfällt. Im Gegensatz dazu weist die Teillastkurve der KKM 1 bis 3 Sprünge auf, wobei ihr Maximum im unteren Teillastbereich bei ca. 40 % Last auftritt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese Maschine mit vier Verdichtern ausgestattet ist, die von der internen Regelung einzeln zugeschaltet werden. Neben den Auswirkungen des Teillastbetriebs haben die durch die Kalt- und Kühlwassertemperaturen bestimmten Verdampfungs- bzw. Verflüssigungstemperaturen einen erheblichen Einfluss auf die Leistungszahl der Maschinen. Je weiter die Temperaturen

auseinander liegen, umso höher ist das durch den Verdichter zu erbringende Druckverhältnis und damit die spezifische Leistungsaufnahme der Maschine. Während Kühlwassertemperatur und -spreizung durch die Anforderungen der Kälteverbraucher nach oben begrenzt sind, wird die Kühlwassertemperatur durch die Möglichkeiten der Rückkühlung nach unten begrenzt. Zusätzlich erfordern Expansionsventile und Verdichter der Kaltwassersätze zumeist ein Mindestdruckverhältnis für einen störungsfreien Betrieb, so dass bei konstanter Kühlwassertemperatur die Rückkühltemperatur abhängig vom Maschinentyp durch Regeleinrichtungen nach unten zu begrenzen ist. In die Gesamteffizienz der Kälteanlage geht darüber hinaus der Strombedarf für den Pumpenbetrieb ein, wobei der spezifische Aufwand für den Energietransport mit abnehmender Temperaturspreizung steigt. Ebenso ist der Energie- und ggf. nicht unerhebliche Wasserbedarf der Rückkühler zu berücksichtigen.

Vorgehensweisen zur Optimierung von Regelstrategien

Während Optimierungen in der Struktur eines Systems (z. B. Austausch von Komponenten) oft mit hohen Investitionen verbunden sind, können Verbesserungen in der Regelstrategie zumeist mit geringem Aufwand umgesetzt werden. Allerdings stellt sich die Frage, wie eine optimierte Regelstrategie zu ermitteln ist. Kann dies bei einfach strukturierten Systemen noch durch

„scharfes Hinsehen“ erfolgen, so erfordern zahlreiche Einflussgrößen und gegenläufige Effekte in komplexen Systemen eine systematische Herangehensweise.

„Interaktiver“ Ansatz Zur Ermittlung einer verbesserten Einsatzstrategie mit Hilfe von Simulationsverfahren sind grundsätzlich zwei Ansätze denkbar. Der erste Ansatz beruht auf einer interaktiven Vorgehensweise, bei der die ausführende Person zunächst ein Berechnungsmodell entwickelt, welches aus definierten Einsatzregeln und einer gegebenen Kältelast den Betriebszustand der Kältezentrale bestimmt und daraus den Energiebedarf des Systems ermittelt. Hierbei wird es sich in der Regel um ein Modell auf Basis einer einschlägigen Simulationsumgebung handeln, in der das physikalische Modell der Kältezentrale mathematisch durch ein algebraisches oder, wenn Trägheiten im System zu berücksichtigen sind, ein differentiell-algebraisches Gleichungssystem abgebildet wird. Anschließend werden mögliche Verbesserungen in der Einsatzstrategie durch entsprechende Variationen des Modells nachgebildet und quantifiziert. Anhand der Ergebnisse erfolgt eine Bewertung der Maßnahme und eine Festlegung weiterer „Verbesserungsversuche“, bis die gefundene Einsatzstrategie als nicht mehr weiter verbesserbar – also optimal – angesehen wird. Wie in Bild 4 dargestellt, ist diese Vorgehensweise zu wesentlichen Teilen von „Handarbeit“ geprägt (Blau hinterlegt: Arbeitsschritte). Die Güte des Ergebnisses hängt im Wesentlichen davon ab, in wie weit die durchführende Person die Zusammenhänge überblickt und in der Lage ist, durch Veränderungen in der Einsatzstrategie gezielt Verbesserungen herbeizuführen. Ein Nachweis, tatsächlich das Optimum erreicht zu haben, wird sich bei komplexen Sys-

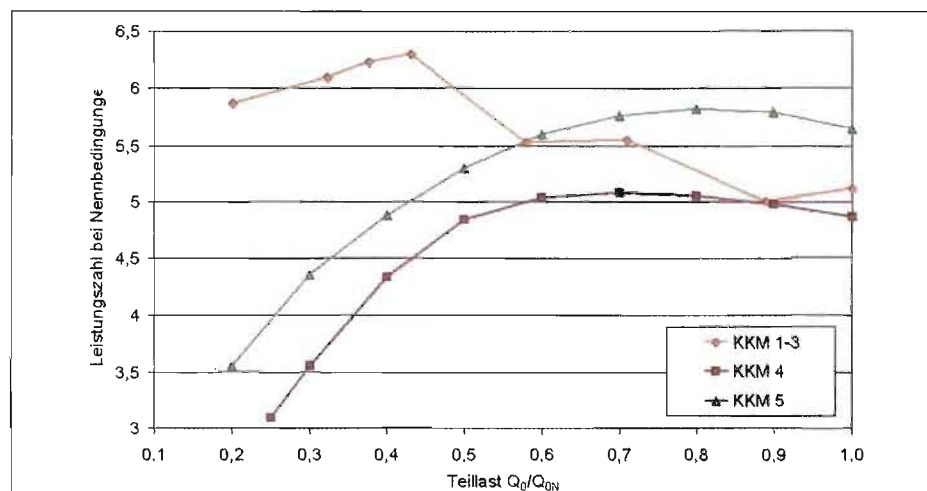


Bild 3: Teillastverhalten der untersuchten Kältemaschinen

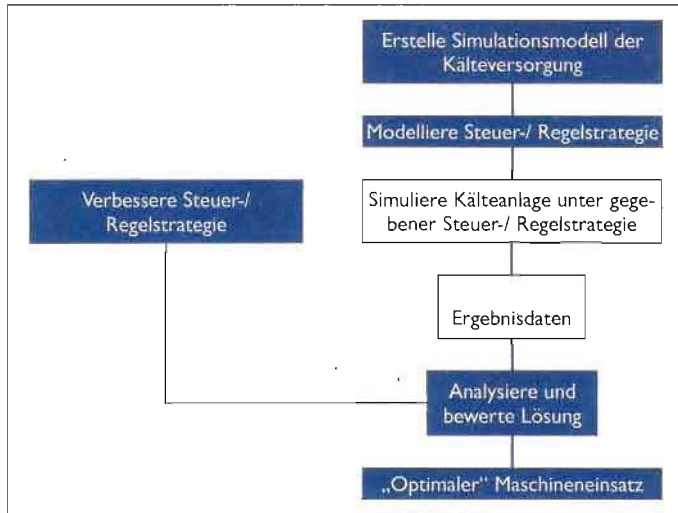


Bild 4: Ablaufschema bei der „interaktiven Optimierung“ mit Hilfe einer Simulation der Kältezentrale

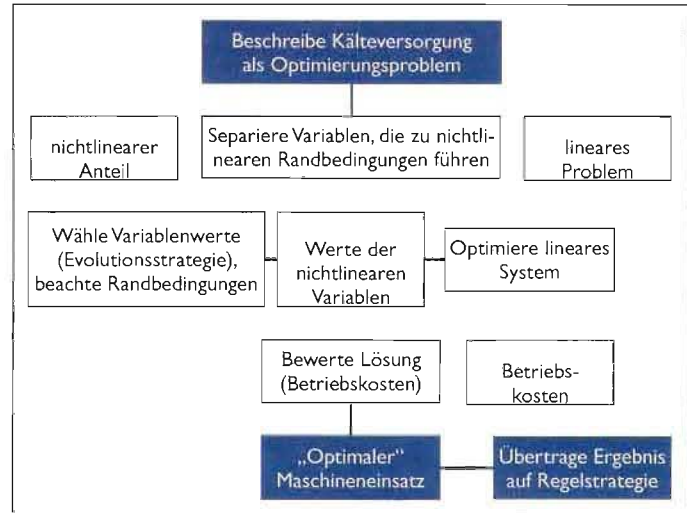


Bild 5: Ablaufschema der Betriebsoptimierung auf Grundlage des vorgestellten Optimierungsverfahrens

temen in der Regel nicht führen lassen. Dennoch findet diese Mischung aus menschlicher Kreativität und technischer Rechenleistung in der Praxis vielfache Anwendung und führt in vielen Fällen zu deutlichen Verbesserungen der ursprünglichen Situation.

Einsatzoptimierung für Anlagen der Kälteerzeugung

Der zweite Ansatz beruht auf der Idee einer „klassischen“ Einsatzoptimierung, wie sie zum optimalen Einsatz von Kraftwerksparks verwendet wird. Dabei ist das betrachtete System (hier die Kältezentrale) als Optimierungsproblem zu beschreiben, bei dem die Summe der Energiekosten als Zielfunktion formuliert wird, welche es zu minimieren gilt. Die technischen Eigenschaften des Systems wie z. B. Leistungsgrenzen und Umsetzungsgrade (COP) der Komponenten stellen dabei die Randbedingungen (Constraints) des Optimierungsproblems dar. Der verwendete Optimierungsalgorithmus hat also die Aufgabe, im „Raum“ der möglichen Betriebszustände, welcher durch die Randbedingungen beschrieben wird, denjenigen Betriebszustand zu finden, bei welchem die Zielfunktion (also die Energiekosten) minimal werden.

Anforderungen an das Optimierungsverfahren

Das klassische numerische Verfahren, welches zur Lösung solcher Optimierungsprobleme eingesetzt wird, ist die „gemischt ganzzahlig lineare Programmierung“ (GGLP). Neben kontinuierlichen Variablen können hierbei auch ganzzahlige Variablen eingesetzt werden, welche u. a. zur Abbildung von Schaltvorgängen (z.B. Maschine ein aus) notwendig sind. Nachteil dieses Verfahrens ist es, dass nur lineare Zusammenhänge zwischen

Variablen abgebildet werden können. Zwar können auch nichtlineare Funktionen durch stückweise Linearisierung angenähert werden, sodass etwa die Abbildung einer Teillastkennlinie möglich wird, die Beschreibung zweier gekoppelter Bilanzen kann allerdings nicht realisiert werden. In Kaltwassersystemen ist jedoch der Energietransport sowohl vom Volumenstrom als auch der Temperaturspreizung bestimmt, Massen- und Energiebilanz sind also gekoppelt. Zusätzlich ist die Umwandlungseffizienz der Kaltwassersätze von der Kalt- sowie den Kühlwassertemperaturen abhängig. Für eine hinreichend genaue Beschreibung von Kaltwassersystemen ist ein lineares Modell demnach im Allgemeinen nicht geeignet.

Stochastische Optimierungsverfahren

Nichtlineare Systeme, die zusätzlich ganzzahlige Variablen zur Abbildung von „Schaltvorgängen“ beinhalten, stellen jedoch ausgesprochen schwierige Optimierungsprobleme dar, die im Allgemeinen nur durch stochastische Verfahren behandelt werden können. Diese Methoden beruhen letztendlich auf zufallsbasierten Suchverfahren, denen eine mehr oder weniger dem Problem angepasste Suchstrategie zugrunde liegt. Mit Hilfe der Suchstrategie wird ausgehend von einem Startpunkt ein konkreter Satz von Werten für die frei wählbaren Optimierungsvariablen ermittelt und einem (im Prinzip beliebigen) Berechnungsverfahren zur Bestimmung des Zielfunktionswerts übergeben. Der an den Optimierer zurückgegebene Zielfunktionswert (hier Energiekosten) wird gegenüber den Zielfunktionswerten anderer Wertesätze bewertet und dient, so er einen „Fortschritt“ darstellt, als Ausgangspunkt für die Fortsetzung

der Suchstrategie. Im Gegensatz zu gradientenbasierten Verfahren können diese Methoden mit den durch die ganzzahligen Variablen verursachten „Sprüngen“ in der Zielfunktion gut umgehen, jedoch stehen diesem Vorteil zwei wesentliche Nachteile gegenüber: Erstens kann das Erreichen des „globalen Minimums“ – also des tatsächlichen Optimums – weder garantiert werden, noch ist es möglich, die Qualität der erreichten Lösung abzuschätzen. Streng genommen handelt es sich also nicht um eine „Optimierung“ sondern um eine „Verbesserung“. Für die praktische Anwendung kann freilich auch eine deutliche Verbesserung der Einsatzstrategie bereits von Wert sein, sodass dieser Nachteil durchaus hinnehmbar ist. Zweitens erfordern diese Methoden naturgemäß eine hohe Anzahl von Zielfunktionsberechnungen. D. h. für jeden „ausprobieren“ Satz von Werten der Optimierungsvariablen (eingeschaltete Maschinen, eingeregelt Medientemperaturen, etc.) muss eine Simulation des Kälteerzeugungssystems erfolgen, um die mit dem Betriebszustand verursachten Kosten bestimmen zu können. Letztendlich ist das Vorgehen mit dem oben beschriebenen interaktiven Ansatz vergleichbar, nur dass nun ein mehr oder weniger „intelligenter“ Algorithmus dem Fachmann die Suche nach dem Optimum abnimmt. Die Zahl der notwendigen Zielfunktionsberechnungen steigt dabei exponentiell mit der Anzahl der frei wählbaren Optimierungsvariablen. Die Durchführbarkeit dieses Ansatzes hinsichtlich einer akzeptablen Rechenzeit hängt also wesentlich davon ab, dass die „Dimension des Suchraums“, also die Anzahl der Variablen, mit denen das stochastische Suchverfahren operiert, klein gehalten wird.

Zerlegung des Optimierungsproblems

Das hier verwendete Verfahren basiert auf dem Grundgedanken, nur die Optimierungsvariablen an das stochastische Optimierungsverfahren zu übergeben, die zu einer Nichtlinearität des Optimierungsproblems führen (vgl. Bild 5). Ein sehr kleiner Satz dieser Variablen ergibt sich z.B., wenn dazu die variablen Massenströme im Kalt- und Kühlwassernetz sowie die Freigaben der Kaltwassersätze und ihrer Primärkreisumpen gewählt werden. Die Anzahl dieser Variablen wird zusätzlich dadurch verringert, dass sie teilweise durch Massenbilanzen und Freigabeverkettungen untereinander gekoppelt sind. Werden diese Größen für jeden Berechnungslauf durch das stochastische Optimierungsverfahren gesetzt, verbleibt ein gemischt ganzzahlig lineares Problem, dessen Variablen vorwiegend Temperaturen und Leistungsgrößen darstellen. Dieses kann nun durch die GGLP behandelt werden, welche dann die Betriebskosten bei optimaler Wahl der verbleibenden Variablen berechnet.

Konkrete Umsetzung und Anwendung auf das Beispiel

Der beschriebene Ansatz wurde in der an der RWTH Aachen entwickelten Toolbox TOP-Energy (<http://top-energy.ttt.rwth-aachen.de>) umgesetzt, welche verschiedene Werkzeuge zur Analyse und Konzeption von industriellen Energiesystemen enthält. Zwar befindet sich das Projekt noch in der Entwicklung, so dass insbesondere noch keine konsistenten Modellbibliotheken vorliegen, dennoch können Fälle wie der oben beschriebene bereits behandelt werden. Zum Einsatz kommt hier das Modul „eSim“. Bild 2 zeigt das im Flussschemaeditor zusammengestellte Systemmodell. Zur besseren Orientierung wurden einzelne Modelle zusätzlich mit nummerierten Markierungen versehen. Die einzelnen im Modell verwendeten Modellkomponenten wurden aus der Vorlagenbibliothek in das Schema eingefügt und anschließend parametrisiert und durch Netze zu einem Systemmodell verbunden. Das Modell ist ähnlich einem gängigen Anlagenschema zu lesen, es enthält allerdings nur die für die energetische Betrachtung relevanten Komponenten. Der Aufwand für den Transport des Wassers in den verschiedenen Kreisläufen wird durch Pumpenmodelle erfasst (2). Die Funktion der hydraulischen Weichen zur Trennung der Primär- und Sekundärkreisläufe (3a) sowie der Regelventile zur Begrenzung der Verflüssigervorlauftemperatur (3b) wurde durch Ventilmodelle nachgestellt. Welcher Massenstrom sich schließlich über das Ventil

ergibt, ist Ergebnis der Optimierungsrechnung und hängt z.B. von den gesetzten Minimal- oder Maximaltemperaturen und der geforderten Übertragungsleistung des Netzes ab. Die Kaltwassersätze werden durch insgesamt drei Modellkomponenten abgebildet. Die drei baugleichen Maschinen sind in einer Komponente zusammengefasst (4), was neben der besseren Übersichtlichkeit des Schemas auch eine Vereinfachung des mathematischen Modells und damit eine Verkürzung der Rechenzeit zur Folge hat. Auch die drei baugleichen Rückkühlwerke der Kältemaschinen 1-3 wurden in einer Modellkomponente zusammengefasst (5). Zur Abbildung der wirtschaftlichen Randbedingungen dient das Modell des Strombezugstarifs (6). Schließlich enthält das Systemmodell weitere Komponenten zur Definition verschiedener Randbedingungen: Zu nennen ist hier insbesondere das Umgebungsmodell (8), welches die zeitlich veränderlichen Temperatur- und Feuchtigkeitswerte der Außenluft liefert und darüber hinaus zur Bilanzierung der an die Umgebung abgegebenen Abwärme dient. Da für die Kaltwassersätze kein vollständiges Kennfeld vorliegt, welches die Leistungszahl für alle Betriebsituationen enthält, muss die Abhängigkeit der Leistungszahl von den Kalt- und Kühlwassertemperaturen über ein Ersatzmodell beschrieben werden. Als Ansatz eignet sich die Annahme eines hinsichtlich der Temperaturverhältnisse konstanten thermodynamischen Gütegrades der Maschinen. Dieser Gütegrad beschreibt das Verhältnis zwischen realer Leistungszahl und der Leistungszahl der idealen Kältemaschine. Zur Berücksichtigung seiner Abhängigkeit von Belastung der Maschine werden die in Bild 2 dargestellten Teillastkennlinien herangezogen. Zur Abbildung des Ist-Falls, also der bisherigen Regelstrategie, wurden die verwendeten Schaltpunkte sowie die Schaltreihenfolge als zusätzliche Randbedingungen in der Modellierungssprache des Moduls umgesetzt. Für die Ermittlung der optimalen Einsatzstrategie wurden diese Constraints aus dem Modell entfernt und die Wahl der eingesetzten Maschinen dem Optimierungsalgorithmus überlassen. Neben der Optimierung der Regelstrategie wurde die Simulation zur Quantifizierung der Auswirkungen weiterer Maßnahmen genutzt. Dies betraf insbesondere die Absenkung der Kühlwassersolltemperatur der Maschinen 1 bis 3 auf den bei Einsatz von elektronisch geregelten Expansionsventilen minimalen Wert. Bei den Maschinen 4 und 5 war dies nicht möglich, da die Kühlwassertemperaturregelung mit Rücksicht auf die weiteren Verbraucher im Netz nicht verändert werden

sollte. Herauszuheben ist dabei, dass sich die optimale Einsatzstrategie infolge dieser Maßnahme erheblich verändert, die Maßnahme ohne die Anpassung der Einsatzsteuerung das mögliche Einsparpotential also nicht vollständig ausgeschöpft hätte. Während zur Quantifizierung der Maßnahmeneffekte der real gemessene Lastgang zur Anwendung kam, wurde die zu implementierende, optimierte Einsatzstrategie in Form einer in die Anlagensteuerung einprogrammierbaren Schaltreihenfolge aus der Simulation bei verschiedenen Außenbedingungen (Sommer / Winter) abgeleitet. Wie Bild 5 zeigt, wird die notwendige „Handarbeit“ durch das eingesetzte Werkzeug auf die einmalige Modellierung des Systems und die Übertragung des Ergebnisses auf eine in der SPS umsetzbare Form reduziert. Allerdings ist dieser Vorteil mit einem erheblichen Aufwand in der Rechenzeit zu bezahlen.

Nutzen der Einsatzoptimierung

Durch die Optimierung der Einsatzstrategie ohne weitere Verbesserungsmaßnahmen konnte eine Reduzierung des Strombedarfs für die Kältezentrale um 11 % nachgewiesen werden. Weitere 6 % bezogen auf den Strombedarf des Ist-Falls ergaben sich aus der Anpassung von Volumenströmen, wobei diese Maßnahme mit dem Austausch von Pumpen verbunden ist. Schließlich kann durch die Absenkung der Kühlwassersolltemperatur eine weitere Einsparung von 17 % erreicht werden.

Zusammenfassung

Das Beispiel zeigt, dass die Optimierung der Regelstrategie und der Einsatzstrategie bei mehreren Kaltwassersätzen nennenswerte Potentiale birgt. Auch bei Kälteanlagen, deren Regelungsstrategie bei der Inbetriebnahme sorgfältig auf die Betriebsbedingungen abgestimmt wurde, ergibt sich durch Veränderung der Randbedingungen im Laufe der Zeit eine Abweichung vom Optimum. Wie bei anderen Versorgungssystemen auch ist also eine regelmäßige Prüfung der Regelstrategie auf Aktualität sinnvoll. Welche Vorgehensweise zur Überprüfung und Verbesserung der Regelstrategien geeignet ist, wird maßgeblich von den Möglichkeiten der durchführenden Personen und den ihnen zur Verfügung stehenden Simulationswerkzeugen abhängen. Das hier dargestellte Werkzeug hat sich für die Betriebsoptimierung von Kältezentralen als geeignet erwiesen, ist in der gegenwärtigen Form aber noch nicht für den „kommerziellen“ Einsatz geeignet. Die hohe Rechenzeit wird allerdings ein Nachteil bleiben, auch wenn durch neue Hard- und Software eine Verbesserung zu erwarten ist.