

Teilspeicherkonzept weist geringsten Strombedarf auf

Weniger Arbeit mit Eisspeichern

Der Energiebedarf einer Kälteanlage mit Eisspeicher wird gewöhnlich über die Temperaturniveaus im Verdampfer und Verflüssiger abgeschätzt. Einfluss hat aber auch, wie lange die Kältemaschine mit Voll- und mit Teillast arbeitet. Die jeweiligen Anteile ändern sich deutlich durch den Einsatz eines Eisspeichers und durch das Betriebskonzept. Der Artikel zeigt, dass ein Teilspeicherkonzept sogar einen geringeren Strombedarf als eine Kältemaschine ohne Eisspeicher aufweisen kann.

Der Gefrierpunkt des Speichermediums Wasser liegt mit 0°C unter den üblicherweise in der Klimatechnik benötigten Temperaturen (z.B. $6/12^{\circ}\text{C}$). Zudem kann beim Laden eines Eisspeichers nur dann ein Wärmestrom aufrechterhalten werden, wenn die von der Kältemaschine gelieferte Sole mit einer Temperatur von circa -8 bis -3°C bereitgestellt wird. Die deutliche Absenkung der Verdampfungstemperatur führt zu einer verminderten Leistungszahl der Kältemaschine im Vergleich zum „klimatechnischen Normalbetrieb“.

Dieser Effekt wird häufig als Argument gegen den Einsatz von Eisspeichern angeführt. Zur Entlastung wird dagegen genannt, dass der Speicher nachts geladen wird, wenn die Umgebungstemperatur niedriger als tagsüber ist. Dadurch ergibt sich auf der Verflüssigerseite eine Entlastung der Kältemaschine, die aber den erstgenannten Effekt nicht kompensieren kann.

Die Betrachtung der beiden Temperaturniveaus in Verdampfer und Verflüssiger ist jedoch nur ein erster Ansatz zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer Eisspeicheranlage. Nachfolgend wird gezeigt,

dass sich die Anteile von Volllast- und Teillastbetriebszeit der Kältemaschine durch den Einsatz eines Eisspeichers und durch die Wahl des Betriebsmodus deutlich ändern. Dieser Einfluss auf die Leistungszahl der Kältemaschine wird ohne Einsatz eines Speichers mit der integrierten Leistungszahl [1] wiedergegeben.

Untersuchungsmethodik

Die beschriebenen Effekte und ihre Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit einer Eisspeicheranlage wurden auf Basis einer Gebäudesimulation über ein ganzes Jahr betrachtet, um alle auftretenden Kombinationen von Last- und Wetterdaten einzubeziehen und somit eine dem realen Betrieb nahe kommende Aussage über das Anlagenverhalten beim Einsatz in der Klimatechnik zu treffen.

Die thermische Simulation eines definierten Bürogebäudes (siehe Kasten) mit der Software TRNSYS [2] lieferte ein stundengenaues Jahreskühllastprofil [3] unter Nutzung realer Wetterdaten. Dieses Profil diente zur Dimensionierung von Kälteversorgungssystemen auf der Grundlage vier verschiedener Konzepte:

Referenzgebäude

Mit dem Simulationsprogramm TRNSYS können die jährlichen Temperatur- und Lastverläufe eines Gebäudes ermittelt werden. Das Referenz-Bürogebäude hat drei Etagen zu je 5080 m^2 Grundfläche [4]. Die Außenwände sind nach den vier Himmelsrichtungen orientiert, wobei die Nord- und Südfassaden mit je 3670 m^2 etwa 1,8-mal so groß sind wie die Ost- bzw. Westfassade mit jeweils 1990 m^2 . Der U-Wert der Außenwände beträgt $0,477\text{ W}/(\text{m}^2\text{ K})$ (Bauweise „schwer“). Die Fenster in Nord- und Südrichtung haben eine Fläche von je 720 m^2 . Die Ostfassade ist frei von Fenstern; auf der Westseite sind 400 m^2 Fensterfläche vorgesehen. Der U-Wert der Fenster ist mit $1,4\text{ W}/(\text{m}^2\text{ K})$ ebenso wie der g-Wert mit 0,622 einheitlich. Das Gebäude wird von Montag bis Freitag jeweils von 6 bis 18 Uhr von durchschnittlich 300 Personen mit je einem PC genutzt. Es wird eine Fläche von 12000 m^2 mit $10\text{ W}/\text{m}^2$ beleuchtet, wobei der konvektive Anteil der Beleuchtung 20% beträgt. Die Betriebszeit der Klimaanlage ist auf 5 bis 20 Uhr festgelegt. Es wird ein Luftvolumenaustausch von 10% des Gesamtgebäudevolumens pro Stunde durch Fugenlüftung angenommen. Die Simulation wurde mit den nach DIN 4710 ausgewerteten Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes für die Klimaregion 5 (Würzburg, Nürnberg) durchgeführt.

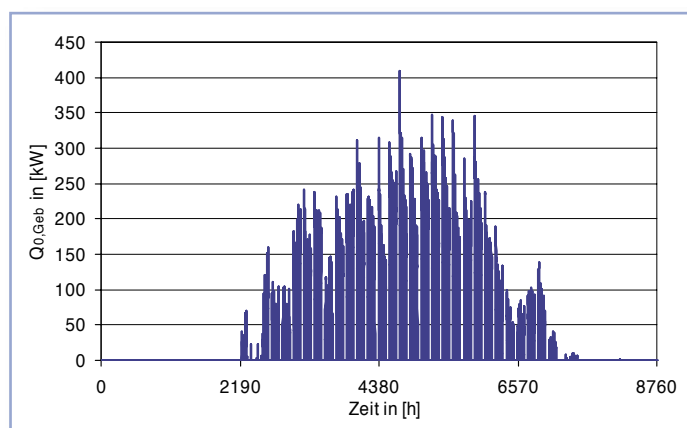


Bild 1 Verlauf der Gebäudekühllast [3]

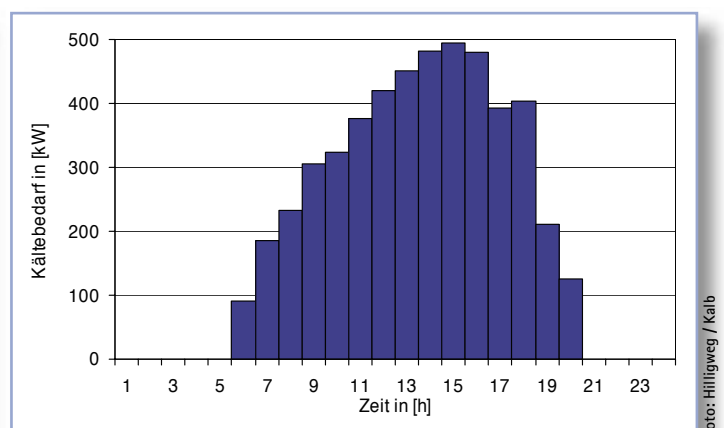


Bild 2 Typischer Verlauf des Kältebedarfs (15. Juni)

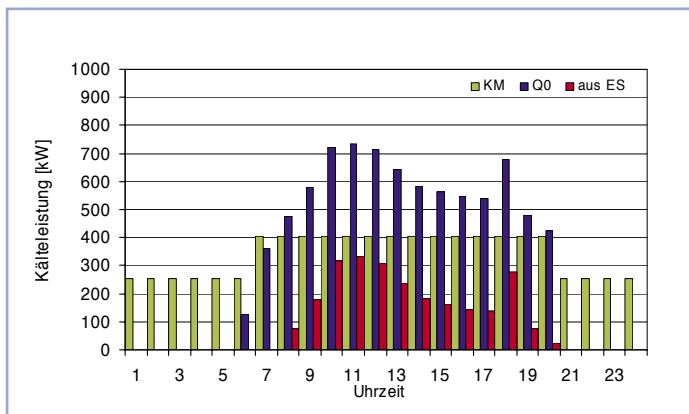


Bild 3 Lastdiagramm bei Teilspeicherung

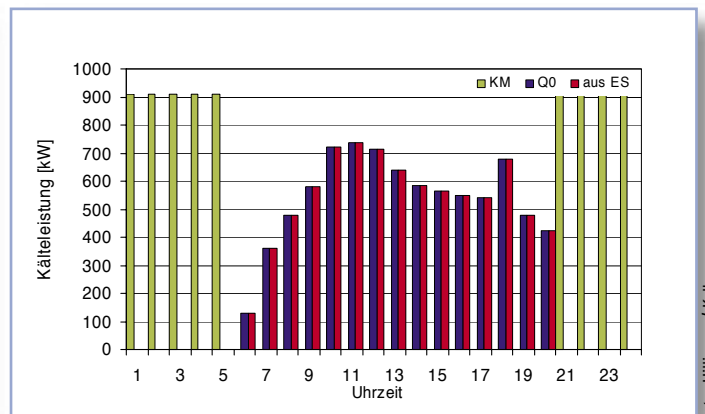


Bild 4 Lastdiagramm bei Vollspeicherung

- konventioneller Kaltwassersatz
- Kaltwassersatz im Verbund mit einem Eisspeicher für
 - Vollspeicherung,
 - Teilspeicherung und
 - modifizierte Teilspeicherung

Nach der Dimensionierung der Komponenten und ihrer Modellierung im Programm wurden die Betriebsdaten stundengenau berechnet [3].

Gebäudesimulation

In Bild 1 ist der berechnete Verlauf der Gebäudekühllast dargestellt. Bei der Modellierung der für das Gebäude vorgesehenen Vollklimaanlage wurde ein Wärmerückgewinner einbezogen. Der Kältebedarf zur Aufbereitung der Außenluft ist im Vergleich zur Gebäudekühllast meistens kleiner. Nur wenn hohe Entfeuchtungsleistungen zu erbringen sind, übersteigt der Kältebedarf die Gebäudekühllast [4], der Lastverlauf ähnelt aber dem in Bild 1.

Bild 2 zeigt den berechneten Kältebedarf am 15. Juni. An diesem zufällig ausgewählten Tag ist ein typischer Verlauf zu erkennen, der sich auch in Erfahrungs-

werten für die Auslegung von Kältespeichersystemen findet [5].

Kältespeicherkonzepte

Eine Erläuterung der möglichen Systeme [6], ihrer Vordimensionierung [7] oder ihrer Wirtschaftlichkeit in verschiedenen Einsatzbereichen [8] ist an anderer Stelle zu finden. Daher sind hier nur die beiden Hauptvarianten Teilspeicherung und Vollspeicherung in den Bildern 3 und 4 dargestellt.

Das Teilspeicherungskonzept zeichnet sich dadurch aus, dass die Kältemaschine im Idealfall den ganzen Tag betrieben wird. Nachts lädt sie den Eisspeicher, tagsüber stellt sie die Grundlast bereit und wird durch Abschmelzen des Eises unterstützt. Diese Art von Teilspeicherungskonzept wird ergänzend durch den Begriff „Kältemaschinen-Priorität“ gekennzeichnet.

Hier soll zusätzlich ein modifiziertes Teilspeicherungskonzept betrachtet werden. Dabei wird die Kältemaschine tagsüber abgeschaltet, wenn sich für die restliche Tageszeit ausreichend Eis im Speicher befindet. Dies wird während der Simulation unter der Annahme überprüft, dass der

Kältebedarf nach dem Maximum stetig abfällt. Mit dieser Strategie wird die jährliche Betriebszeit des Speichers deutlich erhöht [3].

Im Vollspeicherungskonzept arbeitet die Kältemaschine nur nachts und lädt dann den Speicher. Tagsüber wird die gesamte Kältearbeit aus dem Speicher entnommen (Bild 4).

Darstellung der Betriebszeiten

Mit Hilfe von Jahresdauerlinien können die Betriebszeiten von Kältemaschine und Eisspeicher näher untersucht werden. Bild 5 zeigt die Jahresdauerlinien der Kältemaschinen in den einzelnen Konzepten. Sie ergeben sich aus der Kühllast des Gebäudes, der benötigten Ladeleistung bzw. einer Kombination beider Anforderungen.

Die Jahresdauerlinie der Kältemaschine ohne Eisspeicher fällt stetig über der Zeit, beginnend mit der maximalen Kälteleistung von 736 kW. Der steile Abfall zu Beginn zeigt, dass sie nur wenige Stunden im Jahr ihre Auslegungs- bzw. Nominal-Kälteleistung liefern muss. Sie wird über die Hälfte der Zeit mit weniger als einem Drittel der Nominalleistung betrieben.

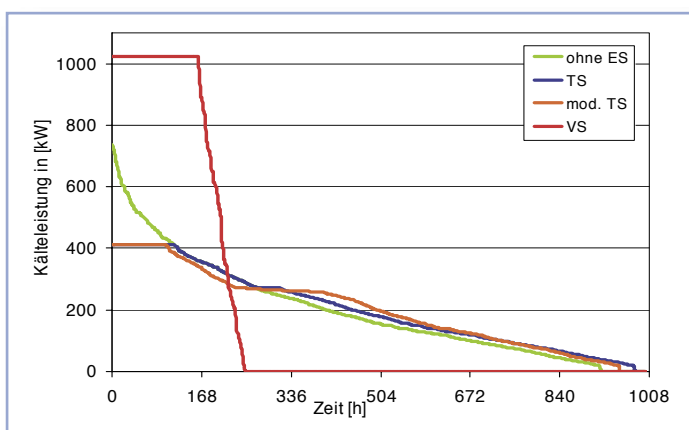


Bild 5 Jahresdauerlinien der Kältemaschinen

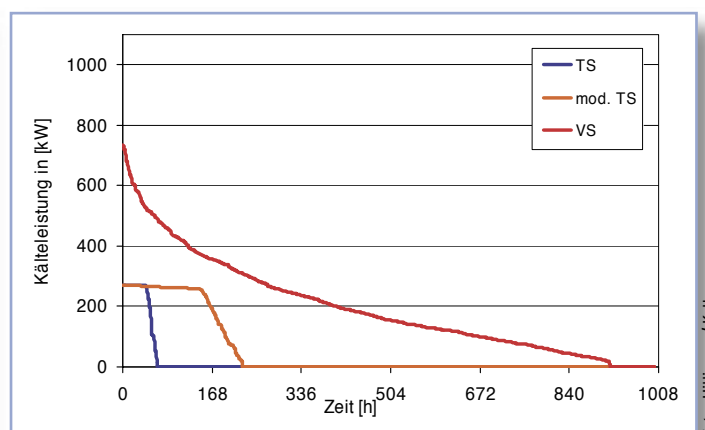


Bild 6 Jahresdauerlinien der Eisspeicherabschmelzleistung

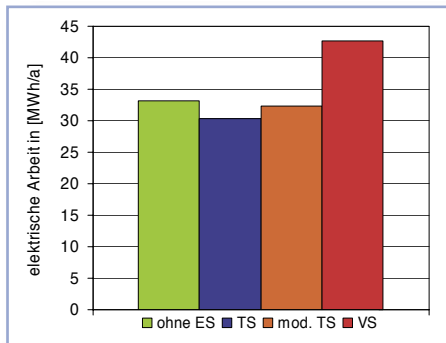


Bild 7 Jährlicher Strombedarf der vier Varianten

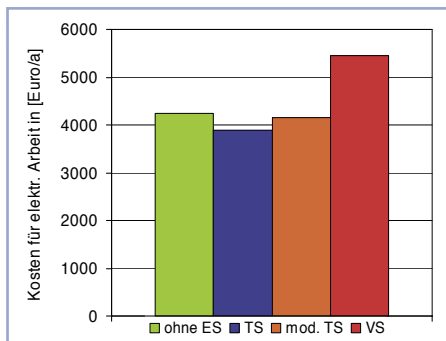


Bild 8 Jährliche Stromkosten (nur Arbeitspreis) bei Tarif A, ET = 12,8 ct/kWh

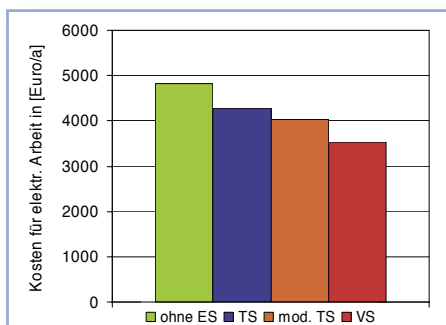


Bild 9 Jährliche Stromkosten (nur Arbeitspreis) bei Tarif A, HT = 4,6 ct/kWh, NT = 8,1 ct/kWh

Durch Einbezug eines Eisspeichers (Teilspeicherung) wird die maximale Kälteleistung der Kältemaschine auf 412 kW verringert. Da der Eisspeicher die Leistungsspitzen abdeckt, ist der Verlauf auf Höhe der maximalen Kälteleistung zunächst waagrecht, bis der Schnittpunkt mit der Kurve der Kältemaschine ohne Eisspeicher erreicht wird. Danach ist der Verlauf dem der Kältemaschine ohne Eisspeicher ähnlich. Er unterscheidet sich dadurch, dass bei etwa 60 bis 70% der Nennleistung die Kurve wieder etwas flacher wird, da in diesem Bereich der Eisspeicher geladen wird. Die Kältemaschine mit Teilspeicherung kommt auf den größten Volllaststundenanteil, da ihre Nennkälteleistung am kleinsten ist.

Im Betrieb mit modifizierter Teilspeicherung hat die Kältemaschine eine etwas geringere Laufzeit im kleinen Leistungsbereich, was durch das frühere Abschalten zustande kommt. Dadurch verlängert sich jedoch die Ladebetriebszeit, was am längeren waagerechten Kurvenverlauf bei wiederum etwa 60 bis 70% der Nennkälteleistung zu erkennen ist.

Die Kältemaschine im Vollspeichungskonzept arbeitet die längste Zeitspanne unter Volllast. Die gesamte am Tag benötigte Kälteleistung wird unter gleich bleibender Volllast in den Nachtstunden erzeugt. Dies führt zu einem zunächst waagerechten Verlauf der Kurve, dem ein steiler Abfall folgt. Die jährliche Gesamtbetriebszeit ist bei Vollspeicherung deutlich am kleinsten. Es muss daher eine Kältemaschine mit 1450 kW Nominalleistung (6/12 °C) installiert werden, um unter den Bedingungen am Auslegungstag die geforderte Ladeleistung liefern zu können.

In Bild 6 sind die Jahresdauerlinien der Speicherabschmelzleistung dargestellt. Zunächst überrascht die geringe Betriebszeit im klassischen Teilspeichungskonzept. Welchen großen Effekt der Einsatz des Speichers dennoch hat, zeigen die nachfolgenden Abbildungen. Mit der modifizierten Teilspeichungsstrategie kann die Speicherbetriebszeit signifikant erhöht werden. Es wird später deutlich, dass dies im Vergleich zur konventionellen Teilspeicherung nur geringe Beiträge zur Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems liefert.

Der Verlauf der Jahresdauerlinie des Eisspeichers mit Vollspeicherung ist identisch mit der Jahresdauerlinie der Kältemaschine ohne Eisspeicher, da in beiden Fällen dieselben Lasten abgedeckt werden. Die Nutzungsdauer des Speichers ist hier mit 917 h am größten, was aber nur unter bestimmten Randbedingungen von wirtschaftlichem Nutzen ist.

Bedarf an elektrischer Energie

Für den hier betrachteten Leistungsbereich wurde eine reale Kältemaschinenbaureihe ausgewählt. Die Leistungszahlen ϵ_{KM} der Kältemaschinen wurden in das Simulationsprogramm abhängig von Verdampfungs- und Verflüssigungstemperatur sowie Kälteleistung einbezogen.

$$\epsilon_{KM} = \epsilon_{KM}(\dot{Q}_0, t_v, t_k) \quad [\text{Gl. 1}]$$

Damit kann aus der abgefragten Kälteleistung die elektrische Antriebsleistung bestimmt werden. Durch Addition der stündlichen elektrischen Arbeiten ergibt

Formelzeichen und Abkürzungen

g:	Sonnenenergiedurchlassgrad
U:	Wärmedurchgangskoeffizient
$P_{el,i}$:	Elektrische Leistung
$\dot{Q}_0$:	Kälteleistung
$Q_{o,i}$:	Kältarbeit im Zeitintervall i
t_v :	Verdampfungstemperatur
t_k :	Verflüssigungstemperatur
Δt :	Zeitintervall (hier 1 Stunde)
ϵ_{KM} :	Leistungszahl Kältemaschine
$\bar{\epsilon}_{KM}$:	mittlere jährliche Leistungszahl
ES:	Eisspeicher
KM:	Kältemaschine
TS:	Teilspeicherung
VS:	Vollspeicherung
mod.:	modifiziert
ET:	Einheitstarif elektr. Energie
HT:	Hochtarif elektr. Energie
NT:	Niedertarif elektr. Energie

sich der in Bild 7 dargestellte jährliche Bedarf an elektrischer Energie.

Es ist zu erkennen, dass das System mit Vollspeicherung den größten Bedarf an elektrischer Energie hat. Die gesamte jährliche Kältarbeit wird nachts über das Ausfrieren von Eis bei tiefen Temperaturen zwischengespeichert. Die dabei erforderlichen niedrigen Verdampfungstemperaturen können über das Jahr gesehen nicht durch die nachts niedrigeren Verflüssigungstemperaturen oder den abschließlichen Volllastbetrieb kompensiert werden.

Bei der konventionellen Teilspeicherung kommt die deutliche Absenkung der Verdampfungstemperatur nicht so stark zum Tragen, da die Kältemaschine tagsüber bei üblichen, höheren Verdampfungstemperaturen betrieben wird. Im Vergleich dazu hat die modifizierte Teilspeicherung einen höheren Bedarf an elektrischer Energie. Das begründet sich durch den verlängerten Eisspeicher- bzw. Ladebetrieb.

Der im Simulationsprogramm betrachtete Kaltwassersatz ohne Eisspeicher arbeitet zwar nie im Ladebetrieb, doch vermindert sich seine mittlere jähr-

liche Leistungszahl durch den hohen Teillastanteil so stark, dass sie unter dem Wert für Teilspeicherung liegt. Dieser Effekt kann sich umkehren, wenn eine Kältemaschine im niedrigen Leistungsbereich hohe Leistungszahlen aufweist.

Es muss an dieser Stelle deutlich darauf hingewiesen werden, dass der jährliche Strombedarf der beiden Teilspeicherungskonzepte unter dem Strombedarf für die Kältemaschine ohne Speicher liegt. Die energetischen Verluste durch die abgesenkte Ladetemperatur werden in der hier betrachteten Konstellation durch Ausnutzen günstiger Lastpunkte der Kältemaschine kompensiert, so dass sich über das Jahr betrachtet kein Nachteil durch den Einsatz eines Kältespeichers ergibt.

Der unterschiedliche Strombedarf spiegelt sich auch in den mittleren jährlichen Leistungszahlen wider:

$$\bar{\epsilon}_{KM} = \frac{\sum Q_{0,i}}{P_{el,i} \cdot \Delta t} \quad [\text{Gl. 2}]$$

Diese betragen bei Vollspeicherung $\bar{\epsilon}_{KM} = 4,93$, bei der Kältemaschine ohne Eisspeicher $\bar{\epsilon}_{KM} = 5,59$, bei der modifizierten Teilspeicherung $\bar{\epsilon}_{KM} = 6,00$ und bei der konventionellen Teilspeicherung mit Kältemaschinen-Priorität $\bar{\epsilon}_{KM} = 6,27$.

Kosten für elektrische Energie

Zur Bestimmung der Stromkosten wird zunächst eine Tarifstruktur „A“ definiert, in der zum einen ein 24-h-Einheitstarif von $ET = 12,8 \text{ ct/kWh}$, alternativ tagsüber ein Hochtarif $HT = 14,6 \text{ ct/kWh}$ und nachts ein Niedertarif $NT = 8,1 \text{ ct/kWh}$ gelten soll.

Bild 8 zeigt die Stromkosten bei Einheits-tarif „A“. Es werden hier bewusst nur die Arbeitspreise betrachtet. Bei Einbezug eines Eisspeichers sinken auch die Strom-Bereitstellungskosten, was schon immer als Argument für seinen Einsatz gesehen wird. In der aktuellen Wettbewerbssituation im Energiemarkt fallen jedoch häufig nur geringe Leistungspreise an. Ein Eisspeicherkonzept sollte sich daher auch über Einsparungen beim Arbeitspreis tragen.

In Bild 9 sind die Ergebnisse dargestellt, die auf den oben genannten Tag- und Nachttarifen beruhen. Auch hier zeigt sich, dass der Einsatz eines Kältespeichers bei Teilspeicherung die Kosten für die elektrische Arbeit nicht erhöht. Durch ungünstigere Lastpunkte liegen auch in diesem Fall die Kosten ohne Eisspeicherung höher.

Die beiden Teilspeicherungskonzepte liegen nahe beieinander. Bei der modifizierten Teilspeicherung ist bedingt durch die längere Eisspeicherbetriebszeit die Nutzung eines NT/HT-Tarifs die günstigere Variante, während die konventionelle Teilspeicherung im zugrunde gelegten Einheitstarif niedrigere Jahreskosten aufweist. Trotz des größten Strombedarfs können die jährlichen Kosten bei der Vollspeicherung dann am geringsten sein, wenn ein günstiger Nachttarif genutzt werden kann.

An dieser Stelle sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass diese Vergleiche ohne Einbezug eines Leistungspreises gerechnet wurden. Fällt dieser in nennenswerter

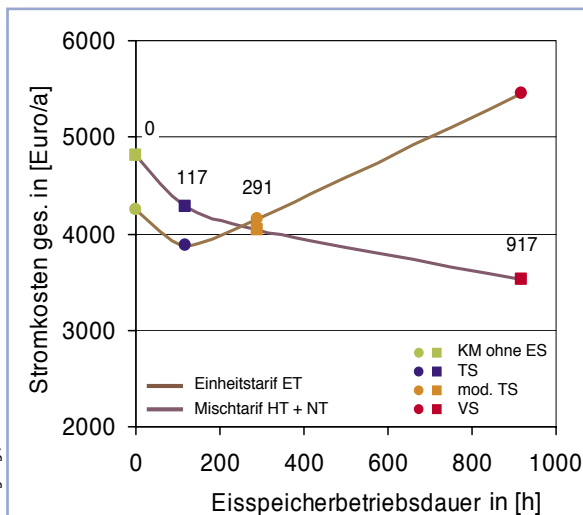
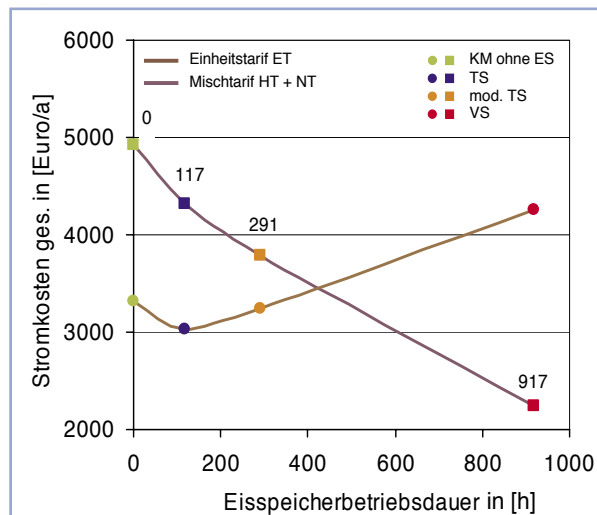


Bild 10 Jährliche Stromkosten (nur Arbeitspreis) über der Eisspeicherbetriebsdauer im Einheits- (ET) und im Mischtarif (HT/NT), Tarifstruktur A, HT = 14,6 ct/kWh, NT = 8,1 ct/kWh

Bild 11 Jährliche Stromkosten (nur Arbeitspreis) bei Tarifstruktur B (Sensitivitätsanalyse) mit ET = 10 ct/kWh, HT = 15 ct/kWh, NT = 5 ct/kWh



Höhe an, so ergibt sich der altbekannte prinzipielle Vorteil des Einbezugs eines Speichers in ein Kälteversorgungssystem.

Eine neue Darstellungsform wurde für Bild 10 gewählt. Hier sind die Stromkosten differenziert nach Einheits- (ET) oder Kombitarif (HT/NT) über der Eisspeicherbetriebsdauer aufgetragen. Jedes Kälteerzeugungskonzept ist mit je zwei Punkten vertreten, einer für den Einheitstarif, der andere für den Mischtarif (HT/NT). Die Punkte für die Kältemaschine ohne Eisspeicher sind bei einer Eisspeicherbetriebsdauer von 0 h zu finden. Die größte Eisspeicherbetriebszeit weist die Vollspeicherung mit 917 h auf. Bei 117 h ist die konventionelle Teilspeicherung zu finden, bei 291 h die modifizierte Teilspeicherung.

Da die Stromkosten im Variantenvergleich stark von der Tarifstruktur abhängen, wurde zum Vergleich in Tarifstruktur „B“ der Einheitstarif auf 10 ct/kWh gesenkt und beim Mischtarif für die Nachtzeit NT = 5 ct/kWh und für die Tageszeit HT = 15 ct/kWh angesetzt. Es ergeben sich die Kurvenverläufe in Bild 11. Die Kurve für den Mischtarif (HT/NT) verläuft umso steiler je größer der Unterschied zwischen Hoch- und Niedertarif ist.

Fazit

Die Simulation eines Referenzgebäudes lieferte dessen stundengenauen Kühllastbedarf über ein ganzes Jahr. Nach der Auslegung von vier Kälteversorgungskonzepten konnten deren Strombedarf und die mittlere jährliche Leistungszahl bestimmt werden.

Die betrachtete Kältemaschine weist dann die höchste mittlere jährliche Leistungszahl auf, wenn sie kombiniert mit einem Eisspeicher im Teilspeicherungskonzept

Literatur

- [1] Hartmann, K.: Integrierte Leistungszahl – Eine sinnvolle Rechenmethode zur Bestimmung von Teillast-Wirkungsgraden. KI 1990
- [2] University of Wisconsin – Madison (Solar Energy Laboratory): Introduction to TRNSYS with IISiBat
- [3] Kalb, A.: Vergleich von Kälteerzeugungsverfahren auf der Grundlage simulierter Jahreskühllastverläufe. Diplomarbeit im Fachbereich Maschinenbau und Versorgungstechnik, Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg, August 2002
- [4] Hilligweg, A., Kalb, A., Stephan, W.: Beurteilung von Kältespeicherkonzepten auf der Grundlage simulierter Kühllastverläufe, Tagungsbericht zur Deutschen Kälte- und Klimatagung 30 (2003), Band II.1, S. 169–84
- [5] Technische Unterlagen und Auslegungsprogramm für Eisspeicher, Fa. Fafco Deutschland, Leinfelden-Echterdingen
- [6] Hilligweg, A.: Kälteanlagen (in: Handbuch Facility Management, Hrsg. W. Lutz), Kap. III-3.2.3.2.3.1 (S. 1 – 24), ecomed Verlag, Landsberg 1998
- [7] Hilligweg, A., Hofmann, P.: Kennzahlgestützte Dimensionierung von Eisspeicheranlagen, KI Luft- und Kältetechnik, September 1999
- [8] Hilligweg, A., Sponsel, C.: Kostenstrukturen der Kälteversorgung in der Gebäudetechnik, KI Luft- und Kältetechnik, Januar 2002
- [9] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie: Daten zur bayerischen Energieversorgung, München 1998

betrieben wird. Daraus resultiert auch der geringste jährliche Strombedarf.

Beide vorgestellte Varianten der Teilspeicherung weisen einen geringeren jährlichen Strombedarf auf als ein Kaltwassersatz ohne Speicher. Dieses zunächst überraschende Ergebnis ist auf eine Verschiebung der Betriebspunkte der Kältemaschine im Jahresverlauf zu erklären. Durch einen deutlich höheren Anteil relativ größerer Kälteleistungen arbeiten die Kältemaschinen im Verbund mit einem Eisspeicher effizienter.

Dieser Effekt kompensiert die Absenkung der Leistungszahl, die sich aufgrund der im Mittel tieferen Temperaturen im Verdampfer ergibt. Die Auswirkungen der Temperaturniveaus müssen aber immer im Zusammenhang mit dem jeweiligen Lastzustand betrachtet werden, wenn eine Beurteilung eines Eisspeichersystems für einen bestimmten Anwendungsfall erfolgen soll. ➔



Prof. Dr.-Ing. Arnd Hilligweg vertritt im Fachbereich Maschinenbau und Versorgungstechnik der Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg die Lehrgebiete Technische Thermodynamik, Kältetechnik und Energiewirtschaft. E-Mail: arnd.hilligweg@fh-nuernberg.de



M.Eng. Andreas Kalb studierte Versorgungstechnik an der FH Nürnberg und absolvierte den gemeinsamen Masterstudiengang Gebäudetechnik der FH München und FH Nürnberg. Zurzeit ist er bei Kraftanlagen München beschäftigt.