

Vordimensionierung von Kältespeichern auf der Grundlage von Gebäudelastprofilen

Prof. Dr.-Ing. Arnd Hilligweg

Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg
Fachbereich Maschinenbau und Versorgungstechnik

Dipl.-Ing.(FH) Peter Hofmann

Landis & Staefa GmbH, Nürnberg

Abstract

For the exact design of a cooling supply system with ice bank the knowledge of the cooling load profile is a necessity. In many cases the cooling load profile must be estimated quite roughly during early design stages. It will be shown that even on the basis of this rough estimation statements about the dimension of an ice storage system can be made. For this purpose dimensionless characteristic numbers are defined, which are independent of the type of storage equipment or type of the chiller. They are only based on the cooling load profile. Especially for HVAC applications a shortcut method is proposed that can be used in early design stages.

Zur exakten Auslegung von Kälteversorgungssystemen mit Kältespeichern (i.a. Eisspeicher) ist die Kenntnis des Kühllastprofils notwendig. Durch Aufsummierung und Bilanzierung über der Zeit können Aussagen über die Größen des Speichers und der Kälteanlage getroffen werden. Vielfach müssen aber in frühen Planungsphasen vereinfachte Annahmen über den Verlauf der Kühllast getroffen werden. Es wird gezeigt, daß sich schon auf der Basis dieser Annahmen Aussagen über die Größe von Eisspeicheranlagen treffen lassen. Dazu werden dimensionslose Kennzahlen eingeführt, die unabhängig von der Art des Speichersystems und der Art der Kälteanlage nur über das Kühllastprofil definiert sind. Im Speziellen wird für Auslegungen in der Technischen Gebäudeausrüstung ein verkürztes Abschätzungsverfahren dargestellt, das in einem frühen Planungsstand verwendet werden kann.

1. Einleitung

Grundlage der Auslegung eines Kälteversorgungssystems ist der Kältebedarf eines Prozesses oder Gebäudes. Dieser ist im Regelfall nicht konstant, sondern weist zeitliche Schwankungen auf, die nahelegen, über den Einsatz eines Kältespeichers, i. bes. eines Eisspeichers nachzudenken /1/. Erste Fragen gelten dabei der Größe des Speichers und der möglichen Reduzierung der Kältemaschinenleistung.

Rechenprogramme zur Dimensionierung von Eisspeicheranlagen /2/ benötigen die Eingabe der Kühllast in vorgegebenen Zeitschritten oder gehen von Erfahrungswerten für den Kühllastverlauf aus.

Daß eine ausreichende Entladeleistung fast immer dann zur Verfügung steht, wenn die Kapazität richtig dimensioniert ist, konnte durch Beispielrechnungen anhand von Entladungsdiagrammen /2/ belegt werden. Zielgrößen der Untersuchung waren somit die Kapazität des Eisspeichers, bezeichnet mit Q_{ES} , und die Kälteleistung der Kältemaschine, bezeichnet mit \dot{Q}_0 .

Um von der absoluten Höhe der Kühllast unabhängig zu sein, werden im weiteren die nachstehend definierten Kennzahlen verwendet:

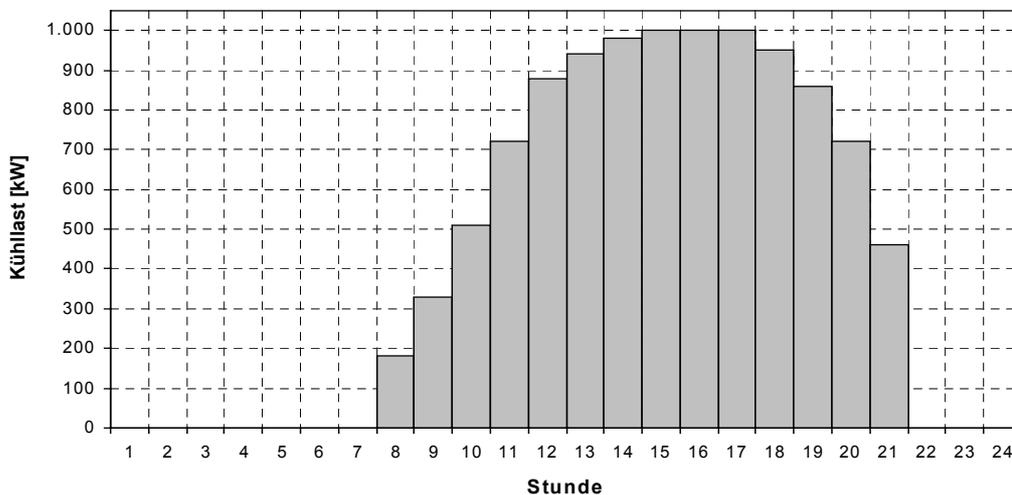


Bild 1: Typisches Lastprofil eines Verwaltungsgebäudes

Im Bereich der technischen Gebäudeausrüstung ändert sich in frühen Planungsphasen die erwartete Kühllast häufig, da architektonische Varianten oder verschiedene Nutzerwünsche diskutiert werden. Der Einsatz von Rechenprogrammen scheint in dieser Phase nicht angemessen. Eine graphische Darstellung grundlegender Abhängigkeiten wäre hier praktikabel, um die Größe des Eisspeichers rasch bestimmen zu können.

2. Festlegung der Zielgrößen

Ein Eisspeicher-/Kältemaschinensystem wird durch folgende Basisgrößen bestimmt:

- Kälteleistung der Kältemaschine [kW]
- Kapazität des Eisspeichers [kWh]
- Entladeleistung des Eisspeichers [kW]

- Das **Auslegungsverhältnis** r_{AL}

$$r_{AL} \equiv \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_{Kmax}} \cdot 100 \% \quad [\%]$$

Die Kälteleistung der Kältemaschine im Verbund mit einem Eisspeicher wird hier ins Verhältnis gesetzt zur maximalen Kühllast, d.h. zur Kältemaschinenleistung im konventionellen System.

- Die äquivalente **Vollast-Entladezeit** t_{VE}

$$t_{VE} \equiv \frac{Q_{ES}}{\dot{Q}_{Kmax}} \quad [h]$$

Sie stellt die Zeitdauer dar, die bei Entladung des Speichers mit konstanter Entladeleistung \dot{Q}_{Kmax} verstreichen würde.

3. Kühllastprofile

Der Verlauf der prognostizierten Kühllast über der Zeit wird Kühllastprofil $Q_k(t)$ genannt. Wenn es darum geht, ein Eisspeichersystem zu dimensionieren, können auf den ersten Blick recht unterschiedliche Kühllastprofile zu gleichen Ergebnissen führen. Die Basisdimensionierung sollte daher auf der Grundlage von Kennzahlen möglich sein, die sich aus dem Lastprofil ableiten lassen. Zum Auffinden dieser Kennzahlen und möglicher Abhängigkeiten wurden die Zielgrößen mit Hilfe eines Rechenprogramms für unterschiedliche Lastprofile bestimmt [3]. Zwei Arten von Lastprofilen wurden dabei verwendet.

- Realitätsnah verteilte Profile:
Sie beruhen auf Erfahrungswerten für Gebäude bestimmter Art und Nutzung
- Idealisierte Profile:
Sie wurden anhand bestimmter Kriterien konstruiert, z.B. Rechteckprofile o. Dreieckprofile

Es wurden fünf Klassen von Lastprofilen untersucht, innerhalb derer die Betriebsdauer und die Kühllastspitze (in acht Stufen von 200 kW bis 2.500 kW) variiert wurden. Insgesamt wurden 320 Varianten zur Dimensionierung und anschließenden Analyse erstellt, für die jeweils die Kapazität des Eisspeichers und die Kälteleistung der Kältemaschine bestimmt wurden.

Ergänzend wurden aus den der Berechnung zugrunde gelegten Lastprofile charakteristische Eigenschaften herausgearbeitet. Diese wurden durch Kennzahlen quantitativ dargestellt; drei davon stellten sich als besonders markant heraus. Ihre Definitionen können anhand des in Bild 1 dargestellten Lastprofils nachvollzogen werden.

Als Maß für die Kühllastdauer am Auslegungstag wird das **Zeitverhältnis** τ wie folgt definiert:

$$\tau \equiv \frac{t_B}{24h}$$

In welchem Grad ein gegebenes Lastprofil einem Rechteckprofil mit derselben Betriebsdauer ähnlich

ist, wird durch die Kennzahl α , die Ähnlichkeit des Kühllastprofils zum Rechteck, quantifiziert.

$$\alpha \equiv \frac{\frac{1}{t_B} \cdot \sum_{i=1}^{24} Q_{Ki}}{\dot{Q}_{Kmax}}$$

Zur Erfassung der zeitlichen Verteilung der Kühllast über den ganzen Auslegungstag wird abschließend die **Gleichmäßigkeit** γ des Kühllastprofils definiert:

$$\gamma \equiv \frac{\frac{1}{24h} \cdot \sum_{i=1}^{24} Q_{Ki}}{\dot{Q}_{Kmax}}$$

Zwischen den Kennzahlen besteht der Zusammenhang:

$$\gamma = \tau \cdot \alpha$$

4. Randbedingungen und Anlagentechnik

Für die Berechnungen und Untersuchungen wurden folgende Festlegungen getroffen:

- Der Eisspeicher wird immer dann geladen, wenn keine Kühllast abzufahren ist. Damit gilt:
 $t_L = 24 h - t_B$
- Die Abdeckung einer Grundlast ist nicht Gegenstand der Untersuchung
- Die Kälteerzeugung erfolgt mit einer Kompressionskälteanlage. Damit ist die Kälteleistung beim Laden ($< 0 \text{ }^\circ\text{C}$) kleiner als im Normalbetrieb. Hier wurde angenommen, daß beim Laden 70 % der Nominalleistung erbracht werden.

5. Darstellung der Ergebnisse

Die Eisspeicherkapazität Q_{ES} , in Bild 2 dargestellt als äquivalente Vollast-Entladezeit t_{VE} , zeigt eine plausible Abhängigkeit vom Zeitverhältnis τ , der am einfachsten zu bestimmenden Kennzahl. Für die Grenzfälle „Dauerbetrieb“ ($\tau = 1$) und „keine Kühllast“ ($\tau = 0$) ist der Einsatz eines Eisspeichers nicht sinnvoll. Die einzelnen Profilgruppen können nach der Ähnlichkeit α geordnet werden.

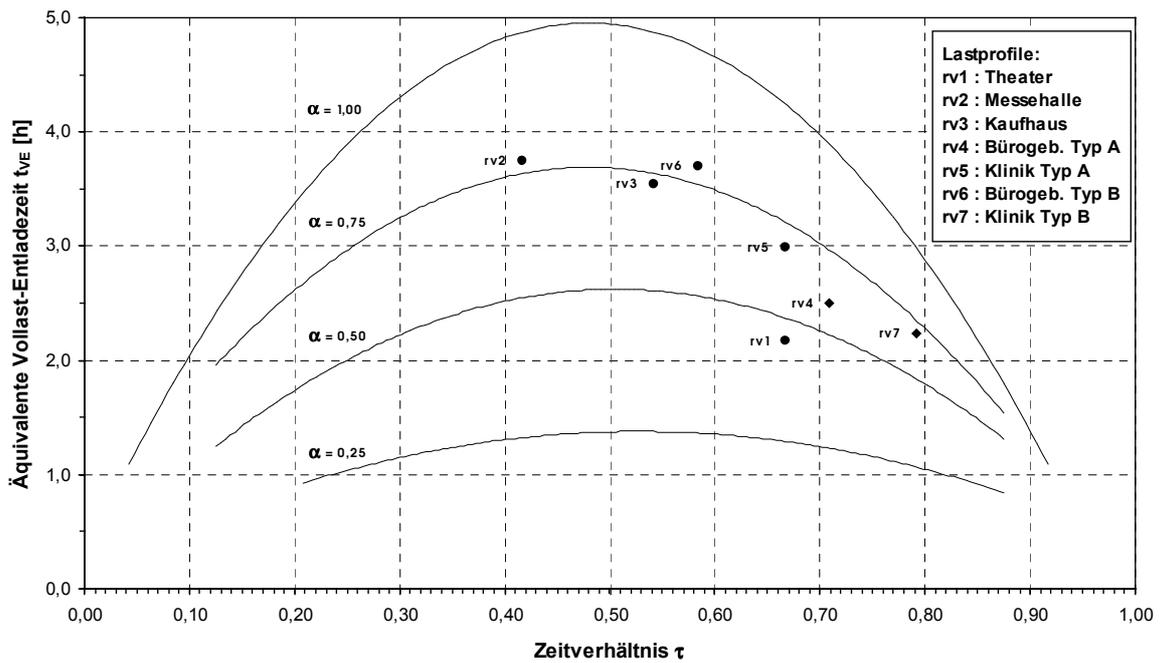


Bild 2: Äquivalente Vollast-Entladezeit t_{VE} über Kennzahl τ

Die Ergebnisse auf der Grundlage realitätsnaher Profile sind in Bild 2 gesondert eingezeichnet. Sie liegen mehr oder weniger dicht bei der Kurve für $\alpha = 0,75$. Die stärkste Abweichung davon ergibt sich auf der Grundlage des Lastprofils eines Theaters, da dieses eine ungleichmäßige Lastverteilung mit deutlichem Schwerpunkt gegen Ende der Entladezeit aufweist.

Für die untenstehende Beispielrechnung läßt sich vorwegnehmen, daß sich γ damit vereinfacht aus der Kühllastdauer bestimmen läßt zu $\gamma \approx \tau \cdot 0,75$. Die Kühllastdauer, bzw. das Zeitverhältnis τ , ist die grundlegende Startgröße einer ersten Vordimensionierung.

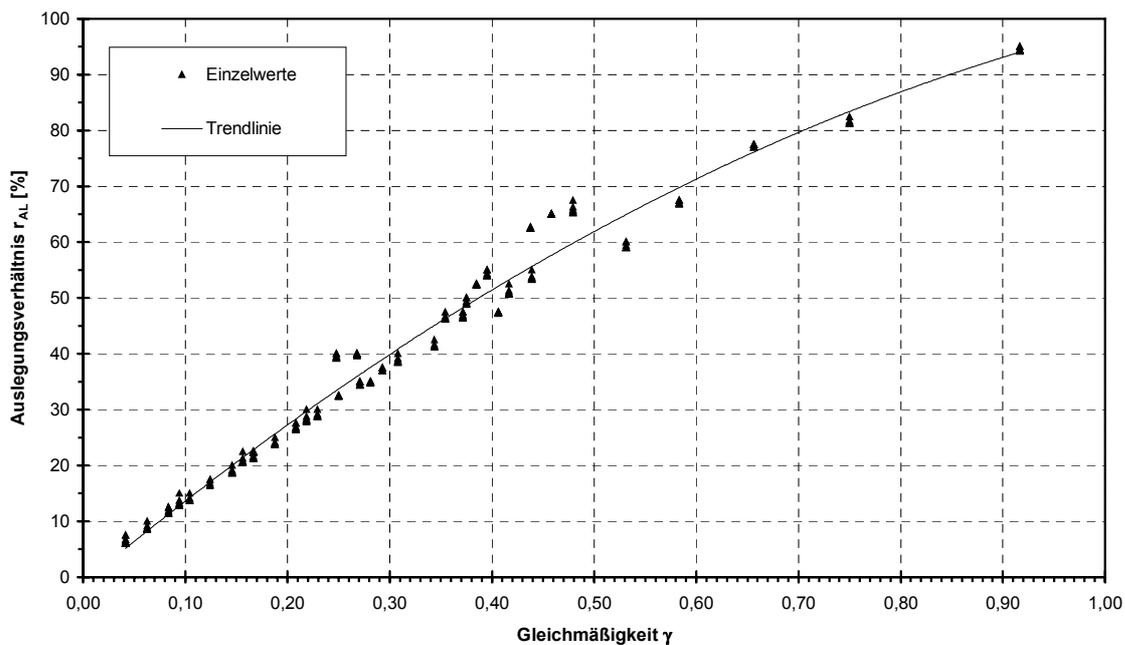


Bild 3: Auslegungsverhältnis r_{AL} über der Kennzahl γ

In Bild 3 zeigt sich ein klarer Zusammenhang zwischen den beiden aufgetragenen Größen. Die relative Kälteleistung einer Kältemaschine im Verbund mit einem Eisspeicher kann im Vergleich zum konventionellen System abgelesen werden, nachdem die Gleichmäßigkeit des Kühllastprofils bestimmt wurde. (Entweder aus dem Lastprofil oder über die erste Abschätzung $\gamma \approx \tau \cdot 0,75$.)

6. Auslegung mit Hilfe der Kennzahl diagramme

Es ergeben sich zwei Wege der Vordimensionierung /4/:

- Ohne Kenntnis des Lastprofils: Vereinfachtes Auslegungsverfahren für die technische Gebäudeausrüstung.
- Bei Vorliegen eines Lastprofils: Verbesserte Vordimensionierung unter Annahme des Gebäudeverhaltens.

Die Auslegungsstrategie zur Vordimensionierung stellt sich wie in Bild 4 gezeigt dar.

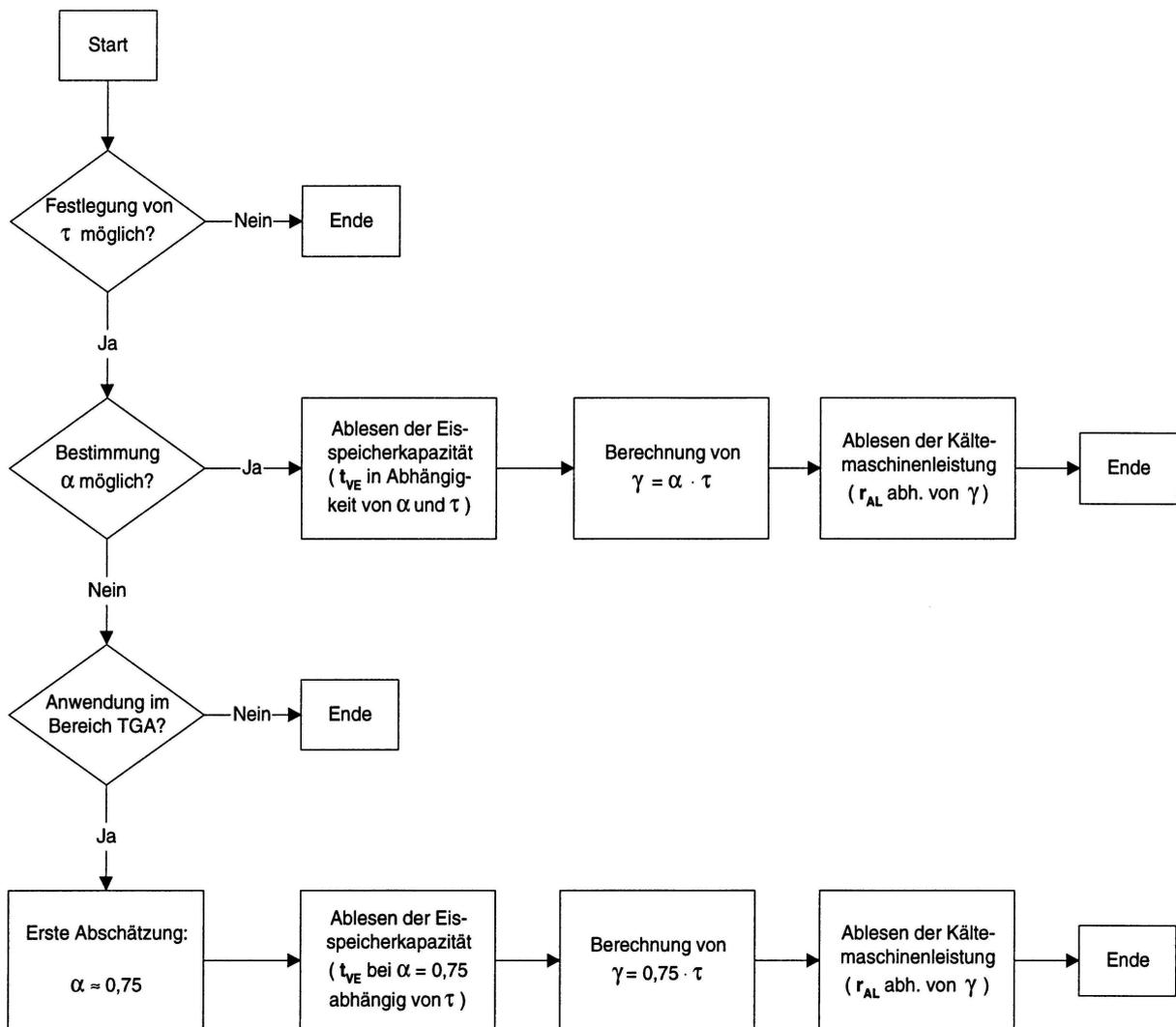


Bild 4: Ablaufschema einer Eisspeicher-Vordimensionierung

7. Vereinfachte Beispielrechnung für TGA-Anwendungen

Angenommen werde ein Bürogebäude, für das täglich über 10 Stunden eine Kühlleistung mit einer Lastspitze von 1000 kW bereitgestellt werden soll. Das Lastprofil ist noch nicht bekannt.

Zunächst wird das Zeitverhältnis zu $\tau = 10 \text{ h} / 24 \text{ h} = 0,42$ bestimmt. Wie beschrieben kann bei TGA-Anwendungen im ersten Ansatz $\alpha \approx 0,75$ gesetzt werden, so daß sich $\gamma \approx 0,42 \cdot 0,75 = 0,32$ ergibt. Damit kann abgelesen werden:

- Die äquivalente Vollast-Entladezeit beträgt
 $t_{VE} \approx 3,6 \text{ h}$
 d.h. die Eisspeicherkapazität ergibt sich zu
 $Q_{ES} \approx 3,6 \text{ h} \cdot 1.000 \text{ kW} = 3.600 \text{ kWh}$
- Das Auslegungsverhältnis beträgt
 $r_{AL} \approx 43 \%$
 d.h. die Kälteleistung ergibt sich zu
 $\dot{Q}_0 \approx 0,43 \text{ h} \cdot 1.000 \text{ kW} = 430 \text{ kW}$

In diesem Beispiel ist in erster Näherung zu erwarten, daß durch den Einsatz eines Eisspeichers mit einer Kapazität von 3.600 kWh die Kälteleistung um 570 kW gesenkt werden kann – von 1000 kW bei konventioneller Kälteanlage auf 430 kW bei Einbezug eines Eisspeichers!

Abschließend sei zum einen noch einmal auf die Randbedingung $t_L = 24 \text{ h} - t_B$ hingewiesen, die eingeführt wurde, um die kleinstmögliche Kältemaschinenleistung zu erhalten. Zum anderen sei angemerkt, daß bei Vorliegen eines Lastprofils immer der genaue Wert der Ähnlichkeit α bestimmt werden sollte.

8. Fazit

Zur Abschätzung der Größe von Eisspeichern in Kälteversorgungssystemen reichen wenige Kennzahlen aus, die ausschließlich aus dem Kühllastprofil abgeleitet werden können. Eine Festlegung auf die Speicherbauart oder ein Anlagenkonzept ist nicht notwendig. Im Bereich der technischen Gebäudeausrüstung /5/ lassen sich viele Einsatzfälle zusammenfassen, was eine frühe Tendenzaussage über die Dimensionierung möglich macht.

9. Formelzeichen

\dot{Q}_{Kmax}	Kühllastspitze	[kW]
Q_{Ki}	Kältearbeit während der Stunde i	[kWh]
Q_0	Kälteleistung der Kältemaschine	[kW]
Q_{ES}	Speicherkapazität	[kWh]
t_L	Ladezeit	[h]
t_B	Betriebszeit, Kühllastdauer	[h]

10. Literatur

- Hilligweg, A.: Kälteanlagen (*in* Handbuch Facility Management, Hrsg. W. Lutz), ecomed Verlag, Landsberg 1998
- Grandegger, K.: Rechenprogramm und technische Unterlagen zur Dimensionierung von Eisspeichern, Fa. FAFCO Deutschland
- Hofmann, P.: Dimensionslose Kennzahlen zur Bewertung der Kälteversorgung von Gebäuden, Diplomarbeit im Fachbereich Maschinenbau und Versorgungstechnik, Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg, 1999
- Hilligweg, A., Hofmann, P.: Kennzahlgestützte Dimensionierung von Eisspeicheranlagen, KI Luft- und Kältetechnik 9/99, S. 450 - 453
- Hilligweg, A.: KI-Forum „Welches Einsatzpotential haben Eisspeicher in der Gebäudetechnik?“, KI Luft- und Klimatechnik 11/99, S. 595-598