



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr,
Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

Standardisierte Massnahme KA-04

Betriebsoptimierungen von Kälteanlagen durch Optimierung der Verdampfungstemperatur

Dokumentation

Massnahmennummer

KA-04

Version

1.0 (11.2024)



1 Vorwort

Mit dem Bundesgesetz über eine sichere Stromversorgung mit erneuerbaren Energien hat das Parlament in der Herbstsession 2023 eine neue Verpflichtung der Elektrizitätslieferanten zur Umsetzung von Stromeffizienzmassnahmen festgeschrieben. Gemäss Artikel 46b des Energiegesetzes (EnG; SR 730.0) müssen Elektrizitätslieferanten Massnahmen für Effizienzsteigerungen an bestehenden elektrisch betriebenen Geräten, Anlagen und Fahrzeugen bei schweizerischen Endverbraucherinnen und Endverbrauchern umsetzen oder entsprechende Nachweise erwerben, wenn Dritte die Massnahmen umsetzen. Das Bundesamt für Energie (BFE) bezeichnet jährlich eine Liste von standardisierten Massnahmen und deren anrechenbare Stromeinsparungen. Massnahmen, die nicht im Katalog der standardisierten Massnahmen enthalten sind, können dem BFE als sogenannte nicht standardisierte Massnahmen zur Zulassung vorgelegt werden.

Für jede standardisierte Massnahme stellt das BFE ein Einsparprotokoll zur Verfügung, mit dem Elektrizitätslieferanten die umgesetzten Massnahmen melden können. In der begleitenden Dokumentation wird die Methodik zur Bestimmung der anrechenbaren Stromeinsparungen nachvollziehbar erläutert. Die vorliegende Methodik schätzt pauschal die kumulierten Stromeinsparungen (Endenergie), welche durch die Umsetzung der entsprechenden Stromeffizienzmassnahme über die Wirkungsdauer ausgelöst werden können. Sie beruht auf einer Ex-ante-Berechnung und verwendet Annahmen und Faktoren, die durch geltende Normen, Marktstudien, die wissenschaftliche Literatur und Expertenbeiträge definiert werden konnten.

Die Dokumentation richtet sich an Elektrizitätslieferanten, Umsetzerinnen von Stromsparmassnahmen sowie an alle anderen Personen, die sich für die Stromeinsparungen im Rahmen der Effizienzsteigerungen nach Artikel 46b EnG interessieren.

2 Ziel

Das Ziel des vorliegenden Dokuments ist es, die Stromeinsparungen, welche durch die Anhebung der Verdampfungstemperatur von Kälteanlagen durch diverse Massnahmen ausgelöst werden, pauschal schätzen zu können.

3 Symbole, Begriffe und Einheiten

Lateinische Buchstaben

Symbol	Begriff	Einheit
E	Jährlicher Stromverbrauch	kWh/a
ΔE_{eco}	Anrechenbare Stromeinsparungen	MWh
f	Faktor	-
N_s	Standardwirkungsdauer	a
T	Temperatur	°C
\dot{Q}	Kühlleistung	kW
Q	Jährlicher Kältebedarf	kWh/a
t	Bin-Dauer	h/a
EER	Kälteleistungszahl	-

Griechische Buchstaben

Symbol	Begriff	Einheit
η	Nutzungsgrad	-

Indizes

x	Zustand (alt, neu)
i	Anwendungskategorie
j	Aussentemperatur



4 Beschreibung der Ex-ante-Berechnung

4.1 Anrechenbare Einsparungen

Die anrechenbaren Stromeinsparungen ΔE_{eco} der Massnahme berechnen sich aus der Differenz zwischen dem aktuellen (bestehender Zustand) E_{alt} und dem neuen (sanierter Zustand) Stromverbrauch E_{neu} über die Standardwirkungsdauer N_s .

Um die natürliche Erneuerungs- und Optimierungsrate von Geräten und Anlagen zu berücksichtigen, die ohne gesetzliche Verpflichtungen zu einer Senkung des Energieverbrauchs führt, werden die anrechenbaren Stromeinsparungen mit Hilfe eines Reduktionsfaktors f_{eco} von 0.75 reduziert.

$$\Delta E_{eco} = 0.001 \cdot (E_{alt} - E_{neu}) \cdot f_{eco} \cdot N_s$$

ΔE_{eco}	Anrechenbare Stromeinsparungen, in MWh
E_{alt}	Jährlicher Stromverbrauch des alten Zustandes, in kWh/a
E_{neu}	Jährlicher Stromverbrauch des neuen Zustandes, in kWh/a
f_{eco}	Reduktionsfaktor
N_s	Standardwirkungsdauer, in Jahren

4.2 Jährlicher Stromverbrauch

Der jährliche Stromverbrauch ergibt sich aus der Summe der Quotienten der Jahreskühllast und der Anlageneffizienz, die beide wiederum von Anwendung und den jeweiligen Betriebsbedingungen abhängen.

$$E_x = \sum_{j=1}^n \left(\frac{Q_j}{EER_{x,j}} \right)$$

E_x	Jährlicher Stromverbrauch, in kWh/a
Q_j	Kälteenergie in Abhängigkeit der Aussentemperatur, in kWh/a
EER_j	Kälteleistungszahl in Abhängigkeit der Aussentemperatur

Die Kälteenergie ist abhängig von der Anzahl Stunden, an welcher die Aussentemperatur T_j auftritt und dem Kälteleistungsbedarf bei gegebener Aussentemperatur T_j .

$$Q_j = t_j \cdot \dot{Q}_j$$

Q_j	Kälteenergie in Abhängigkeit der Aussentemperatur, in kWh/a
t_j	Anzahl Stunden nach BIN, an welcher die Aussentemperatur auftritt, in h/a
\dot{Q}_j	Kälteleistungsbedarf bei Aussentemperatur, in kW

Die Anzahl Stunden pro Jahr, an welcher die Aussentemperatur T_j auftritt wird mittels der BIN-Methode in Anlehnung an die SN EN 14825 ermittelt. Der Kälteleistungsbedarf in Abhängigkeit der Aussentemperatur wird mittels einer Leistungsangabe bei gegebener Aussentemperatur und einem hinterlegtem Lastprofil in Abhängigkeit der Kühlanwendung gemäss Tabelle 3 berechnet.

Die Kälteleistungszahl wird aus dem Produkt der Carnot-Leistungszahl und dem Carnot-Gütegrad (Nutzungsgrad) berechnet. Die Carnot-Leistungszahl ist abhängig von der Verflüssigungstemperatur T_C und der Verdampfungstemperatur T_0 , welche je nach Massnahme optimiert werden kann.

$$EER_{x,j} = \frac{T_{0,x,i} + 273.15}{T_{C,j} - T_{0,x,i}} \cdot \eta_{CG}$$

$EER_{x,j}$	Kälteleistungszahl in Abhängigkeit der Aussentemperatur, Einheitenlos
η_{CG}	Carnot-Gütegrad, Einheitenlos



$T_{0,x,i}$	Verdampfungstemperatur (Abhängig von der Kühlanwendung), in °C
$T_{C,j}$	Verflüssigungstemperatur (Abhängig von der Aussentemperatur), in °C

Die Verdampfungstemperatur $T_{0,x,i}$ ist abhängig von der Kühlanwendung und der zusätzlichen Temperaturdifferenz $\Delta T_{tot,0,x}$.

$$T_{0,x,i} = T_{0,i} + \Delta T_{tot,0,x}$$

$T_{0,i}$	Verdampfungstemperatur gemäss Anwendung, in °C
$\Delta T_{tot,0,x}$	Zusätzliche Temperaturdifferenz, in K

Die zusätzliche Temperaturdifferenz $\Delta T_{tot,0,x}$ beschreibt die Änderung durch die Optimierungsmassnahme, welche durch eine Änderung der Nutzungstemperatur und/oder durch die Reinigung der Luftkühler realisiert werden kann.

$$T_{tot,0,x} = \Delta T_{a,nutz} + \Delta T_{b,sch,x}$$

$\Delta T_{a,nutz}$	Temperaturdifferenz aufgrund der Anpassung der Nutzungstemperatur, in K
$\Delta T_{b,sch,x}$	Temperaturdifferenz aufgrund von Verschmutzung der Luftkühler, in K

Neben der Anpassung der Nutzungstemperatur und der Reinigung der Luftkühler kann als zusätzliche Massnahme auch die Überhitzung eingestellt werden. Dabei wird die Verdampfungstemperatur $T_{0,x,i}$ vor und nach dem Einstellen durch die Fachperson bestimmt und muss somit nicht berechnet werden.

- A. Die zusätzliche Temperaturdifferenz aufgrund der Anpassung der Nutzungstemperatur $\Delta T_{a,nutz,x}$ entspricht der Änderung der Nutzungstemperatur. Wird beispielsweise die Nutzungstemperatur eines Kühlmöbels (steckerfertig) von 1 °C auf 3 °C erhöht, so ändert sich auch die Verdampfungstemperatur der Kälteerzeugung um +2 K.

$$\Delta T_{a,nutz} = T_{nutz,neu} - T_{nutz,alt}$$

$T_{nutz,alt}$	Bisherige Nutzungstemperatur einer Anwendung, in °C
$T_{nutz,neu}$	Neu eingestellte Nutzungstemperatur einer Anwendung, in °C

Ausgeschlossen von dieser Massnahme sind Verbundanlagen, es sei denn, bei allen Kühlstellen wird die Nutzungstemperatur angepasst. In diesem Fall bestimmt die Kühlstelle mit der geringsten Änderung der Nutzungstemperatur den Betrag von $\Delta T_{a,nutz}$.

- B. Die zusätzliche Temperaturdifferenz aufgrund der Verschmutzung der Luftkühler kann nur für Anwendungen mit Luftkühlung angewendet werden. Ist der Luftkühler *sauber*, wird keine zusätzliche Temperaturdifferenz zur Verdampfungstemperatur berechnet. Ist der Luftkühler *verschmutzt*, wird eine zusätzliche Temperaturdifferenz $\Delta T_{b,sch,x}$ zur Verdampfungstemperatur addiert. Für die Anwendung Prozesskälte kann die Massnahme nicht angewendet werden, da Flüssigkeitskühler nicht in dieser Massnahme berücksichtigt werden.
- C. Durch die korrekte Einstellung der Überhitzung kann die Verdampfungstemperatur erhöht werden. Bei dieser Massnahme muss die tatsächliche Verdampfungstemperatur T_0 vor der Massnahme und nach der Massnahme angegeben werden. Diese kann teilweise schon kurz nach der Einstellung festgestellt werden und teilweise (z.B. bei Verbundanlagen) erst nach einigen Wochen. Bei der Einstellung der Überhitzung muss beachtet werden, dass die Betriebssicherheit immer gewährleistet sein muss.



Die Verflüssigungstemperatur $T_{C,j}$ ist abhängig von der jeweiligen Umgebungstemperatur T_j und der gesamten Temperaturdifferenz $\Delta T_{tot,c}$.

$$T_{C,j} = T_j + \Delta T_{tot,c}$$

Es muss beachtet werden, dass die Verflüssigungstemperatur keinesfalls tiefer als den Schwellenwert $T_{C,min}$ sein kann.

$$T_{C,j} = \begin{cases} T_{C,j}, & T_{C,j} \geq T_{C,min} \\ T_{C,min}, & T_{C,j} < T_{C,min} \end{cases}$$

Zudem darf die Temperaturspreizung von $T_{0,x,i}$ und $T_{C,j}$ nie kleiner als $\Delta T_{0,C,min}$ sein, auch wenn die Aussentemperatur und das $T_{C,min}$ dies zulassen würden.

$$T_{C,j} = \begin{cases} T_{C,j}, & T_{C,j} - T_{0,x,i} \geq \Delta T_{0,C,min} \\ T_{0,x,i} + \Delta T_{0,C,min}, & T_{C,j} - T_{0,x,i} < \Delta T_{0,C,min} \end{cases}$$

$T_{C,j}$	Verflüssigungstemperatur, in °C
T_j	Aussentemperatur, in °C
$\Delta T_{tot,c}$	Gesamte Temperaturdifferenz, in K
$T_{C,min}$	Minimale Verflüssigungstemperatur, in °C
$\Delta T_{0,C,min}$	Minimale Temperaturdifferenz, in K

Die gesamte Temperaturdifferenz $\Delta T_{tot,c}$ setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Erstmals muss unterschieden werden, ob es sich um eine Direktverflüssigung (Luft / Direktverflüssiger) oder Flüssigkeitsgekühlt (Rückkühler mit Sekundärkreislauf) handelt.

4.2.1 Direktverflüssigung (Luft / Direktverflüssiger)

Im Fall einer Direktverflüssigung (Luft) ergibt sich die totale Temperaturdifferenz aus dem ΔT der Verflüssigungstemperatur und der Aussentemperatur (ΔT_{c-j}).

$$\Delta T_{tot,c} = \Delta T_{c-j}$$

$\Delta T_{tot,c}$	Gesamte Temperaturdifferenz, in K
ΔT_{c-j}	Temperaturdifferenz der Verflüssigungs- zur Aussentemperatur, in K

4.2.2 Flüssigkeitsgekühlt (Rückkühler mit Sekundärkreislauf)

Im Fall eines Rückkühlers mit Sekundärkreislauf ergibt sich die totale Temperaturdifferenz aus dem ΔT der Verflüssigungstemperatur und der Eintrittstemperatur des Sekundärkreislaufs Verflüssiger ($\Delta T_{c-sek,ein}$) und dem ΔT der Eintrittstemperatur des Sekundärkreislaufs Verflüssiger und der Umgebungstemperatur ($\Delta T_{sek,ein-j}$).

$$\Delta T_{tot,c} = \Delta T_{c-sek,ein} + \Delta T_{sek,ein-j}$$

$\Delta T_{tot,c}$	Gesamte Temperaturdifferenz, in K
$\Delta T_{c-sek,ein}$	Temperaturdifferenz der Verflüssigungs- zur Eintrittstemperatur, in K
$\Delta T_{sek,ein-j}$	Temperaturdifferenz der Eintritts- zur Umgebungstemperatur, in K



4.2.3 Free-Cooling IT-Server

Falls Free-Cooling bei den Kühlanwendungen *IT-Server* vorhanden ist, entfällt ab einer gewissen (Feuchtkugel) Aussentemperatur die Kühllast. Dieser Schwellenwert ist von der Anwendungstemperatur abhängig.

$$\dot{Q}_j = \begin{cases} \dot{Q}_j, & T_j > T_{fc,min} \\ 0, & T_j \leq T_{fc,min} \end{cases}$$

\dot{Q}_j	Kälteleistungsbedarf, in kW
T_j	Aussentemperatur, in °C
$T_{fc,min}$	Schwellenwert für die Anwendung von Free-Cooling, in °C

4.2.4 Anzahl Betriebsstunden Prozesskühler

Da gewisse *Prozesskühler* keinen 24 Stunden pro Tag Betrieb haben, kann für diese Kühlanwendung die Anzahl Betriebsstunden $h_{pr.}$ pro Tag angepasst werden. Somit verkürzen sich die Betriebsstunden nach BIN.

$$t_j = \begin{cases} t_j, & h_{pr.} = 24 \\ t_j \cdot \frac{t_{pr.}}{24}, & h_{pr.} < 24 \end{cases}$$

t_j	Anzahl Stunden nach BIN, in h/a
$t_{pr.}$	Anzahl Betriebsstunden pro Tag bei Prozesskühlern.

5 Eingabevariablen

Allgemein

- Typ der Kälteanwendung (*Mehrfachauswahl*)
- Typ der Wärmeabgabe (*Zweifachauswahl*)
- Kälteleistungsbedarf in kW (*Kommazahl*)

Nach Anwendung

- Das Vorhandensein von Free-Cooling, bei *IT-Server* (*Zweifachauswahl*)
- Anzahl Betriebsstunden pro Tag, bei *Prozesskühlung* (*ganze Zahl*)

Nach Massnahme

- Anpassung der Nutzungstemperatur in °C (*Kommazahl*)
- Reinigung Luftkühler (*Zweifachauswahl*)
- Einstellung der Überhitzung in °C (*Kommazahl*)

6 Annahmen und Daten

Allgemein

- Die Aussentemperatur, bei welcher der Kälteleistungsbedarf definiert ist, beträgt 35 °C.
- Die minimale Verflüssigungstemperatur $T_{c,min}$ und Temperaturspreizung $\Delta T_{0,C,min}$ betragen 25 °C.
- Die BIN-dauern entsprechen den Standardwerten der Klimastation Zürich gemäss dem SIA-Merkblatt 2028 [2].
- Der Carnot-Gütegrad η_{CG} beträgt 0.45 [3,4].



- v. Die Temperaturdifferenzen ΔT_{c-j} , $\Delta T_{c-sek,ein}$ und $\Delta T_{sek,ein-j}$ werden in der Tabelle 2 definiert [1].
- vi. Free-Cooling kommt zum Einsatz, wenn die Feuchtkugelmperatur der Aussenluft um 15 K tiefer ist $T_{fc,min}$ als die Anwendungstemperatur (21 °C resp. 28 °C) [1]. Als Grenze für Free-Cooling wird dafür die entsprechende Aussentemperatur bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % angewendet.

Tabelle 2 Bestimmung des ΔT_{c-j} , $\Delta T_{c-sek,ein}$ und $\Delta T_{sek,ein-j}$

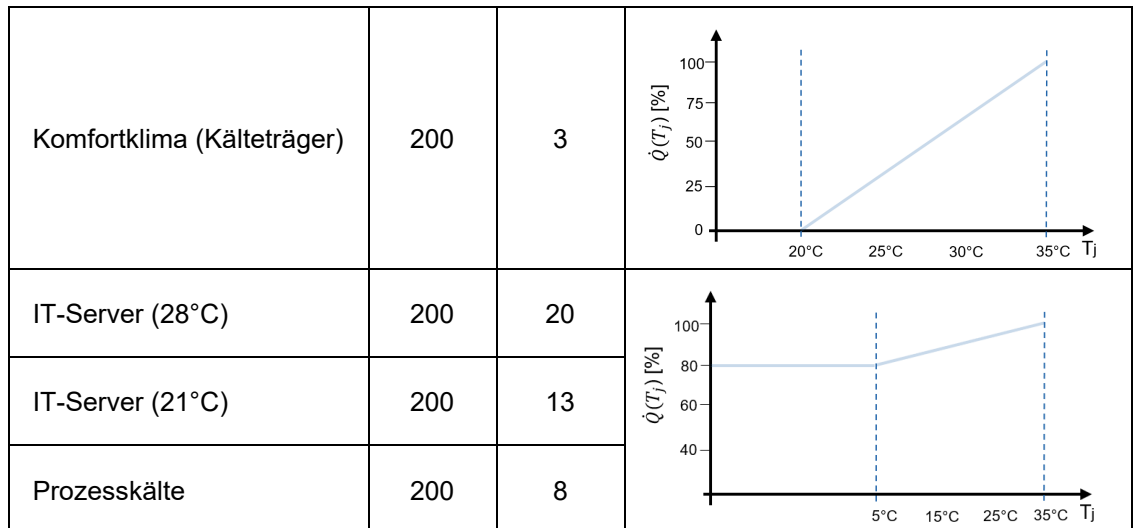
Verflüssiger / Rückkühler	ΔT -Berechnung	ΔT [K]
Luft (Direktverflüssiger): Minuskühlung-Anwendung	$\Delta T_{c-j} = T_c(\text{Verflüssigungstemperatur}) - T_{luft}(\text{Eintritt Verflüssiger})$	10
Luft (Direktverflüssiger): Restliche Anwendungen	$\Delta T_{c-j} = T_c(\text{Verflüssigungstemperatur}) - T_{luft}(\text{Eintritt Verflüssiger})$	13
Wasser (Rückkühler)	$\Delta T_{c-sek,ein} = T_c(\text{Verflüssigungstemp.}) - T_{Wärmeträger}(\text{Eintritt Verflüssiger})$	9
Wasser (Rückkühler)	$\Delta T_{sek,ein-j} = T_{Wärmeträger}(\text{Eintritt Verflüssiger}) - T_j(\text{Aussentemp.})$	6

Nach Anwendung

- vii. Die Verdampfungstemperatur $T_{0,i}$ ist abhängig von der Anwendung gemäss Tabelle 3. Dadurch wird ebenfalls das Lastprofil definiert [1].
- viii. Die beschriebene Methode ist, abhängig von der Anwendung, nur bis zu einem gewissen Kälteleistungsbedarf \dot{Q}_{max} gültig. Die jeweiligen Werte sind in der Tabelle 3 definiert.

Tabelle 3 Verdampfungstemperatur und Lastprofil nach Anwendung

Kühlanwendung	\dot{Q}_{max} [kW]	$T_{0,i}$ [°C]	Lastprofil
Pluskühlung	40	-10	
Minuskühlung	30	-30	
Komfortklima (Direktverdampfung)	80	7	



Nach Massnahme

- ix. Die Standardnutzungsdauer N_s der Massnahmen für die Anpassung der Nutzungstemperatur (A) und Reinigung der Luftkühler (B) beträgt jeweils 1 Jahr.
- x. Die Standardnutzungsdauer N_s der Massnahme für die Einstellung der Überhitzung (C) beträgt 3 Jahre.
- xi. Für die Massnahmen Anpassung der (A) Nutzungstemperatur und (C) Einstellung der Überhitzung sind alle Wärmeübertrager als *sauber* angenommen.
- xii. Die Massnahme Einstellung der Überhitzung (C) kann nur eingegeben werden, wenn zuvor die Massnahmen (A) und (B) durchgeführt wurden.
- xiii. Die zusätzliche Temperaturdifferenz aufgrund der Verschmutzung der Luftkühler kann nur für Anwendungen mit Luftkühlung angewendet werden. Ist der Luftkühler sauber, wird keine zusätzliche Temperaturdifferenz zur Verdampfungstemperatur (gem. Tabelle 3) berechnet. Ist der Luftkühler verschmutzt, wird eine zusätzliche Temperaturdifferenz $\Delta T_{b,sch,x}$ zur Verdampfungstemperatur addiert, gemäss Tabelle 1 [1].

Tabelle 1 Senkung der Verdampfungstemperatur durch Verschmutzung der Luftkühler

Anwendung	Verschmutzung	$\Delta T_{b,sch,x}$ [K]
Komfortklima (Direktverdampfung und Kälteträger)	sauber	0.0
	verschmutzt	-2.0
Pluskühlung, Minuskühlung	sauber	0.0
	verschmutzt	-0.4
IT Server (21 °C), IT Server (28 °C)	sauber	0.0
	verschmutzt	-2.0

7 Resultate

Angesichts der präsentierten Annahmen und Daten werden die anrechenbaren Stromeinsparungen für jede Kälteanlage in Bezug auf die festgelegten Eingabevariablen ermittelt. Dafür wird die öffentlichen zugänglichen Monitoringlisten KA-04 benutzt.



8 Beispiel

Szenario A: Kühlmöbel für Pluskühlung werden gereinigt. Die Kühlleistung beträgt insgesamt 20 kW, der Lebensmittelhändler ist in Zürich.

Anwendung	Eingabevariablen	Werte		Anrechenbare Stromeinsparung
		alt	neu	[MWh]
Pluskühlung	Standort	Zürich		
	Auslegungskühlbedarf, kW	20		
	Wärmeabgabe	Luft (direkt)		
	Nutzungstemperatur, °C	1.0	1.0	
	Verschmutzung Luftkühler	verschmutzt	sauber	
Summe				0.3

Szenario B: Komfortklimatisierung mit Kälteträgernetz in Locarno. Kühlleistung am Auslegungspunkt bei 35 °C beträgt 120 kW. Vorgängig wurde bei der Kälteanlage bereits die Nutzungstemperatur eingestellt (8 °C) und die Luftkühler gereinigt. Nun wurde anschliessend die Überhitzung eingestellt. Vor dem Einstellen betrug die Verdampfungstemperatur 1 °C, nach dem Einstellen 4 °C.

Anwendung	Eingabevariablen	Werte		Anrechenbare Stromeinsparung
		alt	neu	[MWh]
Komfortklima (Kälteträger)	Standort	Locarno		
	Auslegungskühlbedarf, kW	120		
	Wärmeabgabe	Luft (direkt)		
	Nutzungstemperatur, °C	8.0	8.0	
	Verschmutzung Luftkühler	sauber	sauber	
	Verdampfungstemperatur vor/nach Einstellung ÜH, °C	1.0	4.0	
Summe				3.7

9 Quellen

- [1] Experten-Workshop, Erfahrungswerte.
- [2] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, *Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik*, SIA 2028, 2010.
- [3] BITZER Kühlmaschinenbau GmbH, *Online-Programm zur Auswahl von Bitzer-Kompressoren - Bitzer Software Version 6.5.0*, <https://www.bitzer.de/websoftware/Default.aspx>, zuletzt besucht am 12. August 2024.
- [4] Tecumseh Products Company LLC, *Online-Programm zur Auswahl von Tecumseh-Kompressoren - Version 4.0*, http://www.tecumseh.com/de/Europe/Sel_Soft_V4_0, zuletzt besucht am 12. August 2024.