

12. Juni 2024

# Energetischer Vergleich von steckerfertigen und zentralgekühlten Kühlsystemen im Supermarkt



## **Autoren**

Manuel Diem, ZHAW, IEFE Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering, Winterthur  
Christian Stahel, ZHAW, IEFE Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering, Winterthur  
Silvan Steiger, ZHAW, IEFE Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering, Winterthur  
Mirco Ganz, ZHAW, IEFE Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering, Winterthur  
Frank Tillenkamp, ZHAW, IEFE Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering, Winterthur

Diese Studie wurde mit Unterstützung von EnergieSchweiz erstellt.  
Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

## Impressum

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften  
School of Engineering  
IEFE Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering  
Technikumstrasse 9  
CH-8401 Winterthur

[www.zhaw.ch/iefe](http://www.zhaw.ch/iefe)  
[info.iefe@zhaw.ch](mailto:info.iefe@zhaw.ch)

Alle Rechte vorbehalten  
© Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Winterthur, 2024  
IEFE ist ein Institut der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

## Projektpartner

Das Projekt wurde von folgenden Partnern mitbearbeitet:

- Sandro Stefanutti                      Leplan AG
- Thomas Lang                              zweiweg GmbH

## Experten

Die Untersuchungen und Ergebnisse in diesem Bericht wurden durch folgende Experten unterstützt:

- Jonas Schönenberger                  Frigo-Consulting AG
- Andreas Zolliker                          Kältering AG
- Gerald Heinzmann                      Baumgartner Kühlanlagen AG
- Stefan Struschka                         Carrier Kältetechnik AG

## Danksagung

Unser Dank geht an die Projektpartner Sandro Stefanutti und Thomas Lang, sowie an die mitwirkenden Experten Jonas Schönenberger, Andreas Zolliker, Gerald Heinzmann und Stefan Struschka für die wertvolle Unterstützung und die vielen konstruktiven Anregungen. Zudem möchten wir uns bei den Initianten und Förderer dieser Untersuchung, Eva Geilinger und Simone Marchesi (beide BFE), sowie Marco von Wyl und Rolf Löhner (beide SVK) für das entgegengebrachte Vertrauen und die konstruktive Zusammenarbeit bedanken.

## Zusammenfassung

Kühlmöbel für Supermärkte haben eine Energieetikette, welche unter anderem jeweils die Effizienzklasse (A – G) sowie eine jährliche Verbrauchsangabe zum jeweiligen Kühlmöbel angibt. Diese Angaben eignen sich jedoch nicht, um ein steckerfertiges Kühlmöbel mit einem zentralgekühlten Kühlmöbel zu vergleichen. Dies liegt an der Prüfnorm, welche einerseits steckerfertige und nicht steckerfertige Kühlmöbel in der Beurteilung unterscheidet und andererseits die Kühlmöbel bei fixen Umgebungsbedingungen prüft und somit keine saisonalen Unterschiede berücksichtigt. Weiterhin wird für die Energieetikette nur das Kühlmöbel untersucht. Dabei wird aber nicht berücksichtigt, welchen Einfluss der Wärme- oder Kälteeintrag auf das Raumklima im Supermarkt hat. Das Ziel dieser Studie ist ein energetischer Vergleich von steckerfertigen und zentralgekühlten Kühlsystemen mit Berücksichtigung des ganzen Supermarktbetriebs und den unterschiedlichen klimatischen Bedingungen anhand der Jahreszeiten und verschiedenen Standorten.

Dafür wurden drei unterschiedliche Supermarkt-Varianten für Kühlsysteme untersucht: Ein Supermarkt mit ausschliesslich konventionellen steckerfertigen Kühlmöbeln, welche alle einen effektiven Wärmeeintrag haben. Ein zweiter Supermarkt mit hybriden steckerfertigen Kühlmöbeln. Diese können die Abwärme entweder über einen Sekundärkreis an die Umgebung abgeben oder bei Bedarf direkt in den Ladebereich eintragen. Der dritte Supermarkt hat eine zentrale Kälteversorgung für die Kühlmöbel mit einer CO<sub>2</sub>-Kältemaschine, welche eine Wärmenutzung integriert hat. Für alle Varianten wurde der Supermarktbetrieb über ein Jahr simuliert, für drei unterschiedliche Schweizer Standorte (Zürich, Lugano, Davos), um unterschiedliche Umgebungstemperaturprofile zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse zeigen, dass Supermärkte, welche nur mit konventionellen steckerfertigen Kühlmöbeln ausgerüstet sind, den höchsten Strombedarf haben. Unter anderem deshalb, da bei dieser Variante ein hoher Klimatisierungsbedarf entsteht. Hybride steckerfertige Kühlsysteme sind deutlich effizienter als konventionelle steckerfertige Kühlsysteme, da die Wärme an die Aussenluft abgegeben wird und nur bei Bedarf in den Supermarkt geht. Das effizienteste Kühlsystem für einen Supermarkt ist über eine zentrale Kälteversorgung, da die Kälteerzeugung meistens effizienter ist als bei steckerfertigen Kühlmöbeln und weil die Wärme bei der Erzeugung ebenfalls genutzt werden kann (mit einer CO<sub>2</sub>-Booster Kältemaschine). Des Weiteren kann festgestellt werden, dass Kühlmöbel, bei welchen die Effizienz der Kälteerzeugung von der Aussen-temperatur abhängig ist (z.B. zentralgekühlte und wassergekühlte Kühlmöbel), eine grössere Abweichung im jährlichen Verbrauch zur Energieetikette haben als konventionelle steckerfertige Kühlmöbel.

Anhand der Ergebnisse kann festgestellt werden, weshalb steckerfertige und zentralgekühlte Kühlmöbel nicht mit der Energieetikette verglichen werden können und welche Aspekte bei einem umfassenden Vergleich berücksichtigt werden müssen. Dies sind die Gründe, weshalb ein Vergleich der Kühlmöbel anhand der Energieetikette nicht möglich ist:

- Die Interaktion des Kühlmöbels mit dem Supermarkt (Wärmeabgabe resp. -entzug) wird nicht berücksichtigt.
- Kühlmöbel werden an einem fixen Betriebspunkt geprüft. Zentralgekühlte und wassergekühlte Kühlmöbel werden damit nicht saisonal (abhängig von der Aussentemperatur) abgebildet.
- Die Bauart der Kühlmöbel wird in der EU-Verordnung 2019/2018 unterschieden. So wird bei allen steckerfertigen Kühlmöbeln der EEI (Energieeffizienzindex) automatisch um 10% verbessert [1].
- Bei zentralgekühlten Kühlmöbeln ist der COP der Erzeugung (abgebildet durch den REC) vorgegeben, als Funktion der Verdampfungstemperatur des Kühlmöbels. Die Verflüssigungstemperatur ist auf 35 °C festgelegt. Da fast ausschliesslich CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen als zentrale Kälteerzeuger verwendet werden (inkl. Wärmenutzung), sind die getroffenen Annahmen ungeeignet, um die Effizienz der Erzeugung abzubilden.
- Die Warenpräsentationsfläche hat einen grossen Einfluss auf den EEI. Dies führt dazu, dass z.B. durch eine Verglasung der Seitenwände der EEI erheblich verbessert werden kann, auch wenn dadurch der Stromverbrauch des Kühlmöbels sogar etwas grösser wird.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>7</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>8</b>
<b>1. Einleitung und Ausgangslage</b> .....	<b>11</b>
1.1 Hintergrund .....	11
1.2 Ziel der Studie .....	11
<b>2. Methodik</b> .....	<b>12</b>
2.1 Untersuchte Supermarkt-Varianten .....	12
2.1.1 Variante 1: Steckerfertig .....	12
2.1.2 Variante 2: Steckerfertig hybrid .....	13
2.1.3 Variante 3: Zentralgekühlt .....	13
2.2 Konfigurationen der Kühlgeräte .....	14
2.2.1 Aufstellung der Kühlmöbel .....	14
2.2.2 Kühlaggregate für Kühlräume .....	15
2.3 Standorte .....	16
2.4 Randbedingungen für die Supermarkt-Simulation .....	16
2.5 Modellierung Kühlmöbel .....	17
2.5.1 Faktor Tag/Nacht .....	17
2.5.2 Faktor Kunden .....	18
2.5.3 Faktor Ladentemperatur .....	18
2.5.4 Faktor Luftfeuchtigkeit .....	19
2.6 Simulationsaufbau .....	20
2.6.1 Allgemeiner Simulationsaufbau .....	20
2.6.2 CO <sub>2</sub> -Booster Kälteanlagen Simulation .....	23
<b>3. Resultate der Simulationen</b> .....	<b>24</b>
3.1 Vergleich der Varianten .....	24
3.1.1 Supermarkt M340 in Zürich .....	25
3.1.2 Supermarkt M1250 in Zürich .....	25
3.1.3 Vergleich der Standorte .....	26
3.2 Monatliche Übersicht .....	28
3.2.1 Variante 1: Steckerfertig - Supermarkt M1250 in Zürich .....	28
3.2.2 Variante 2: Steckerfertig hybrid – Supermarkt M1250 in Zürich .....	29
3.2.3 Variante 3: Zentralgekühlt – Supermarkt M1250 in Zürich .....	29
3.3 Wärmebilanz für die Verkaufsfläche im Tagesverlauf .....	30
3.3.1 Variante 1: Steckerfertig .....	31
3.3.2 Variante 2: Steckerfertig hybrid .....	31
3.3.3 Variante 3: Zentralgekühlt .....	32
3.4 Plausibilisierung .....	33
<b>4. Sensitivitätsanalyse</b> .....	<b>35</b>
4.1 Resultate .....	35
4.2 Weiterführende Erkenntnisse .....	36

<b>5. Vergleich der Kühlmöbel mit der Energieetikette.....</b>	<b>38</b>
5.1 TEC: Vergleich Datenblatt vs. Simulation .....	38
5.2 EEI Bewertung der verwendeten Kühlmöbel .....	40
<b>6. Wirtschaftlichkeitsanalyse.....</b>	<b>42</b>
6.1 Berechnungsgrundlage .....	42
6.1.1 Kapitalkosten .....	42
6.1.2 Instandhaltungskosten .....	43
6.1.3 Betriebskosten .....	43
6.2 Kostenvergleich.....	43
6.3 Vor- und Nachteile der verschiedenen Kühlsysteme .....	45
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>46</b>
<b>Anhang A Weitere Resultate.....</b>	<b>47</b>
<b>Anhang B Schemas.....</b>	<b>60</b>
<b>Anhang C Lastprofile .....</b>	<b>63</b>
<b>Anhang D Wirtschaftlichkeitsanalyse: Weitere Resultate und Details .....</b>	<b>64</b>
<b>Anhang E Details Berechnung Variante 1: Steckerfertig.....</b>	<b>67</b>
<b>Anhang F Details Berechnung Variante 2: Steckerfertig hybrid.....</b>	<b>77</b>
<b>Anhang G Details Berechnung Variante 3: Zentralgekühlt.....</b>	<b>90</b>
<b>Anhang H Details zur Simulation der CO<sub>2</sub>-Booster Kälteanlage .....</b>	<b>97</b>

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl Kälteperformance)
EEI	Energieeffizienzindex
ETV	Elektro-Thermo-Verstärkungsfaktor
KWM	Kälte-Wärme-Maschine
Lfm	Laufmeter
M340	Supermarkt M340 (340 m <sup>2</sup> Verkaufsfläche)
M1250	Supermarkt M1250 (1250 m <sup>2</sup> Verkaufsfläche)
MK	Minuskühlung
PK	Pluskühlung
REC	Refrigeration daily electrical energy consumption
SM	Supermarkt
TEC	Total daily electrical energy consumption
WT	Wärmetauscher
WN	Wärmenutzung (CO <sub>2</sub> Kältemaschine)
WRG	Wärmerückgewinnung (Lüftung)

## Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	SI-Einheit
$A$	Fläche	$m^2$
$b$	Breite	$m$
$c_p$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$\frac{J}{kgK}$
$EER$	Energy Efficiency Ratio	-
$ETV$	Elektro-Thermo-Verstärkungsfaktor	-
$f$	Faktor zur Umrechnung von Grössen bei Standardbedingungen (SN EN ISO 23953-2) zu Realbedingungen	-
$h$	Höhe	$m$
$hTEC$	Stündliche TEC	kWh
$l$	Länge	$m$
$n$	Anzahl	-
$P$	elektrische Leistung	$W$
$\dot{q}$	spezifischer Wärmestrom	$\frac{W}{m^2}, \frac{W}{Person}$
$\dot{Q}$	Wärmestrom	$W$
$t$	Zeit	$s$
$T$	Temperatur	$^{\circ}C$
$TEC$	Total Daily Energy Consumption (SN EN ISO 23953-2)	kWh
$\dot{v}$	spezifischer Volumenstrom	$\frac{m^3}{s Person}$
$V$	Volumen	$m^3$
$\dot{V}$	Volumenstrom	$\frac{m^3}{s}$
$\Delta$	Differenz	-
$\mu$	spezifische elektrische Leistung	$\frac{W}{m^3/s}$
$\eta$	Anteil (an Volllast), Wirkungsgrad	-
$\rho$	Dichte	$\frac{kg}{m^3}$

### Index

### Beschreibung

0	Verdampfung, Kälteleistung
A	Aussen
AK	Aktionskühler
bed	Bedarf
BF	Bürofläche
C	Verflüssigung
CO2	zentrale CO <sub>2</sub> -Kälteanlage
d	Design, am Auslegungspunkt

<b>Index</b>	<b>Beschreibung</b>
<i>disp</i>	Warenpräsentationsfläche
<i>EER</i>	Energy Efficiency Ratio
<i>EGM</i>	einfacher gleitender Mittelwert
<i>EH</i>	Enthitzer
<i>FL</i>	Frischluft
<i>GK</i>	Gaskühler
<i>hd</i>	Heizdraht
<i>heiz</i>	heizen
<i>hyb</i>	hybrid
<i>i</i>	Zählerindex
<i>inf</i>	Infiltration
<i>int</i>	intern
<i>kühl</i>	kühlen
<i>KK</i>	Klimakälte
<i>KR</i>	Kühlräume
<i>KS</i>	Kühlsystem
<i>KüMö</i>	Kühlmöbel
<i>KWM</i>	Kälte-Wärme-Maschine
<i>L</i>	Luft
<i>m</i>	Mittelwert
<i>max</i>	Maximum
<i>mIA</i>	Mittelwert Innen- zu Aussenbedingungen
<i>MK</i>	Minuskühlung
<i>MKR</i>	Minuskühlraum
<i>MKVG</i>	Minuskühlmöbel vertikal geschlossen
<i>ÖS</i>	öffnen-schliessen
<i>PK</i>	Pluskühlung
<i>PKR</i>	Pluskühlraum
<i>PKVG</i>	Pluskühlmöbel vertikal geschlossen
<i>PKVO</i>	Pluskühlmöbel vertikal offen
<i>real</i>	bei Realbedingungen
<i>ref</i>	Referenz
<i>RF</i>	relative Feuchte
<i>RK</i>	Rückkühler
<i>sens</i>	sensibel
<i>std</i>	bei Standardbedingungen (nach SN EN ISO 23953-2)
<i>sum</i>	Summe
<i>SM</i>	Supermarkt
<i>temp</i>	temporär
<i>tot</i>	Total
<i>trans</i>	Transmission
<i>T0</i>	Abhängig von der Verdampfungstemperatur

<b>Index</b>	<b>Beschreibung</b>
<i>T<sub>c</sub></i>	Abhängig von der Verflüssigungstemperatur
<i>T<sub>std</sub></i>	Temperatur bei Standardbedingungen (nach SN EN ISO 23953-2)
<i>vent</i>	Ventilator, Ventilation
<i>verd</i>	Verdichter
<i>vert</i>	Verteilung
<i>VF</i>	Verkaufsfläche
<i>WP</i>	Wärmepumpe
<i>WRG</i>	Wärmerückgewinnung

# 1. Einleitung und Ausgangslage

## 1.1 Hintergrund

Die Kälteerzeugung für Kühlmöbel und Kühlräume in einem Supermarkt kann übergeordnet in zwei unterschiedliche Systemlösungen unterteilt werden: Eine zentrale und eine dezentrale Kälteversorgung.

Bei der zentralen Kälteversorgung werden die Kühlmöbel und die Kühlräume von einer zentralen Kälteanlage über ein Direktverdampfungssystem mit Kälte versorgt. Gleichzeitig stellt die zentrale Kälteanlage Wärme für das Heizsystem zur Verfügung.

Bei einer dezentralen Systemlösung verfügen alle Kühlgeräte in einem Supermarkt über einen eigenen Verflüssigungssatz. Diese Kühlgeräte werden «steckerfertig» genannt. Dabei gibt es zwei wesentliche Unterschiede. Entweder wird die Abwärme am Verflüssiger direkt in den Raum abgegeben oder über einen Sekundärkreislauf abgeführt.

Grundsätzlich verfügt jedes Kühlmöbel über eine Energieetikette. Auf dieser ist unter anderem auch ein Energieeffizienz-Label angegeben. Mit dieser Angabe können jedoch nur Kühlmöbel vom selben Typ miteinander verglichen werden. Ein Vergleich von unterschiedlichen Systemlösungen ist mit den gegebenen Angaben nicht möglich. Weshalb das so ist, wird in Kapitel 5 genauer beschrieben. Somit fehlt für die Planung von einem Supermarkt eine Grundlage zum Vergleich, um eine gesamtenergetisch sinnvolle Lösung zu wählen. Deshalb soll diese Untersuchung zum erwähnten Hintergrund einen Beitrag leisten.

## 1.2 Ziel der Studie

Das Ziel der Studie ist, eine Methodik für den energetischen Vergleich von modernen zentralen und dezentralen Systemen unter gleichen Rahmenbedingungen zu entwickeln. Die Schwierigkeit der Untersuchung liegt darin, die unterschiedlichen Systemlösungen neutral zu vergleichen.

Mit einer Simulation soll der Betrieb eines Supermarkts mit unterschiedlichen Kälteversorgungs-Lösungen untersucht und die verschiedenen Systemlösungen verglichen werden. Dabei soll auch untersucht werden, welchen Einfluss die Kühlmöbel auf den Energieverbrauch des Supermarkts haben und welche Unterschiede die Kühlmöbel im Vergleich zur Prüfnorm und zur Energieetikette haben.

Anhand der Ergebnisse soll gezeigt werden, welche Systemlösung unter den festgelegten Rahmenbedingungen am effizientesten ist. Dabei liegt der Fokus der Studie auf der Energieeffizienz. Zudem soll eine Wirtschaftlichkeitsanalyse die Kosten der Kühlsysteme abschätzen. Weitere wichtige Aspekte, wie zum Beispiel der Platzbedarf für technische Anlagen (Maschinenraum), betriebliche Unterschiede im Störfall oder die Flexibilität der Kühlmöbelaufstellung werden in der Simulation nicht berücksichtigt und einzig in Kapitel 6.3 zur Übersicht aufgelistet. Zudem wird der Raumkomfort (Wärme und Kälte am richtigen Ort) nur vereinfacht betrachtet.

## 2. Methodik

Mittels Simulationen in Python (beschrieben in Kap. 2.6 Simulationsaufbau) wird ein Rahmen geschaffen, um unterschiedliche Supermarkt-Systemlösungen unter gleichen Randbedingungen zu vergleichen. Anlagenspezifische Unterschiede wie z.B. lokale Aussentemperatur, Nutzungsprofil und bauliche Unterschiede sind somit ausgeschlossen. Um den Einfluss verschiedener Kühlmöbelkonfigurationen detaillierter zu beleuchten, werden Variationen der Supermarktgrösse, der Supermarktvariante sowie des Standorts vorgenommen, wie in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Variation der Simulationen.

<b>Supermarktvariante</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Variante 1: Steckerfertig</li><li>• Variante 2: Steckerfertig hybrid</li><li>• Variante 3: Zentralgekühlt</li></ul>
<b>Supermarktgrösse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 340 m<sup>2</sup> (Supermarkt M340)</li><li>• 1250 m<sup>2</sup> (Supermarkt M1250)</li></ul>
<b>Standort</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Zürich</li><li>• Lugano</li><li>• Davos</li></ul>

In Kombination der Variationen ergeben sich somit 18 einzelne Simulations-Konfigurationen. Um saisonale Unterschiede der Umgebungsbedingungen im und um den Supermarkt zu berücksichtigen, wurde jede Simulations-Konfiguration über ein Jahr simuliert.

Die Prüfnorm SN EN ISO 23953 [2] kann nur den Betrieb des Kühlmöbels untersuchen, jedoch wird dabei nicht berücksichtigt, welchen Einfluss der Wärme- oder Kälteeintrag eines Kühlmöbels auf den Supermarkt hat. Die Systemgrenze der Untersuchung umfasst dementsprechend den ganzen Supermarkt, da nicht nur der Betrieb der Kühlmöbel, sondern auch der Betrieb des gesamten Supermarkts analysiert werden soll.

### 2.1 Untersuchte Supermarkt-Varianten

Im Rahmen dieser Studie werden drei unterschiedliche Varianten von Systemlösungen für die Kälteversorgung in einem Supermarkt untersucht: Eine dezentrale Kälteversorgung mit konventionellen steckerfertigen Kühlmöbeln und eine weitere dezentrale Kälteversorgung mit hybriden steckerfertigen Kühlmöbeln mit einem Sekundärkreis-System. Als dritte Vergleichsvariante wird eine zentrale Kälteversorgung für die Kühlmöbel und die Kühlräume untersucht.

#### 2.1.1 Variante 1: Steckerfertig

Bei der steckerfertigen Variante wird der Supermarkt ausschliesslich mit konventionellen steckerfertigen Kühlmöbeln ausgerüstet. Steckerfertige Kühlmöbel haben einen integrierten Verflüssigungssatz und arbeiten dementsprechend unabhängig. Die Abwärme des Verflüssigers wird direkt in den Raum resp. in den Ladenbereich abgegeben. Da aufgrund des Kältekreis-Prozesses jeweils mehr Wärme- als Kälteleistung erbracht wird, resultiert immer ein effektiver Wärmeeintrag (entspricht der el. Stromaufnahme des Verdichters) in den Supermarkt durch eine konventionelles steckerfertiges Kühlmöbel. Dies ist vereinfacht in Abbildung 1 dargestellt. Ein detailliertes Schema zur Variante 1 ist im Anhang B in Abbildung 50 zu sehen.

Wird dem Supermarkt durch die Kühlmöbel mehr Wärme zugeführt als durch die Umgebung entzogen wird, muss aktiv gekühlt werden. Die Wärmebilanz der Verkaufsfläche ist getrennt von der Wärmebilanz des Büros resp. der Hinterräume. Bei Bedarf kann jedoch die Kälte-Wärme-Maschine (KWM) gleichzeitig die Verkaufsfläche kühlen und die Büroräume heizen, über einen Kaltwasser- resp. einen Heizungs-Kreislauf.

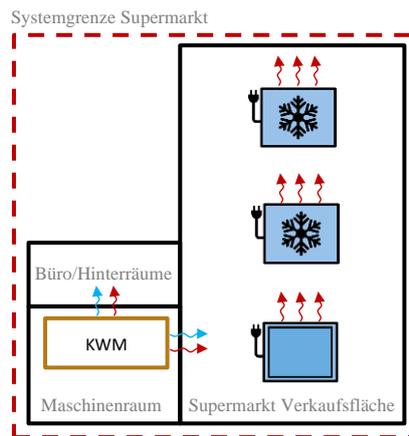


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung der Variante 1: Steckerfertig. Die Kühlmöbel wärmen die Verkaufsfläche auf. Die Verkaufsfläche und die Bürofläche müssen aktiv gekühlt oder geheizt werden.

### 2.1.2 Variante 2: Steckerfertig hybrid

In Variante 2 werden hybride steckerfertige Kühlmöbel verwendet. Diese haben ebenfalls einen integrierten Verflüssigungssatz. Im Gegensatz zu konventionellen steckerfertigen Kühlmöbeln (Variante 1) sind hybride Kühlmöbel zusätzlich an einem Sekundärkreis angeschlossen, welcher die entstehende Wärme über einen Rückkühler an die Umgebung abgeben kann. In diesem Fall ist die Verflüssigungstemperatur der Kühlmöbel abhängig von der Umgebungstemperatur. Die hybriden Kühlmöbel sind zudem umschaltbar (die Kühlräume nicht). Je nach Bedarf im Verkaufsbereich kann die Wärme direkt in den Raum oder per Sekundärkreislauf an die Umgebung abgegeben werden. Als grosser Vorteil gegenüber Variante 1 kann die Abwärme der Kühlmöbel zwischen Abgabe an Raum und Aussenluft aufgeteilt werden, wie dies in Abbildung 2 dargestellt ist. Ein detailliertes Schema zur Variante 2 ist im Anhang B in Abbildung 51 zu sehen.

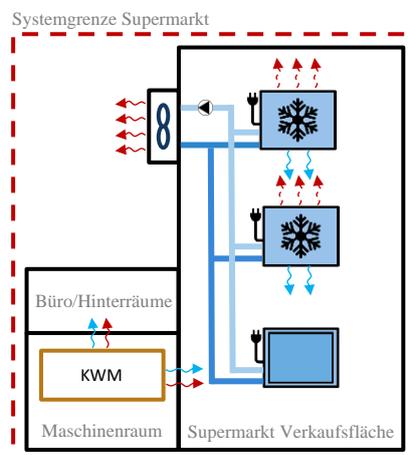


Abbildung 2: Vereinfachte Darstellung der Variante 2: Steckerfertig hybrid. Die Abwärme der Kühlmöbel kann wahlweise über ein Sekundärkreis an die Umgebung oder direkt in den Verkaufsbereich abgegeben werden.

An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass es mehrere Lösungen von hybriden Kühlsystemen mit steckerfertigen Kühlmöbeln gibt. Beispielsweise kann eine Wärmenutzung auch über das Sekundärmedium (direkt oder als Wärmequelle für eine Wärmepumpe) erfolgen. Im Rahmen dieser Studie wird jedoch nur eine mögliche Lösung von hybriden Kühlsystemen untersucht.

### 2.1.3 Variante 3: Zentralgekühlt

Der zentralgekühlte Supermarkt enthält eine zentrale CO<sub>2</sub>-Booster Kälteanlage, welche über ein Direktverdampfungssystem den Kühlmöbeln Kälte bereitstellt (siehe Abbildung 3, nächste Seite). In diesem Fall entziehen die Kühlmöbel dem Supermarkt immer Wärme. Wird dem Supermarkt mehr Wärme entzogen als durch den Betrieb und die Umgebung Wärme eingebracht wird, muss aktiv geheizt werden. Ein detailliertes Schema zur Variante 3 ist im Anhang B in Abbildung 52 dargestellt.

Die CO<sub>2</sub> Kältemaschine kann Wärme, welche über den Wärmetauscher für Wärmenutzung abgegeben wird, zum Heizen und für die Erwärmung von Frischluft nutzen. Reicht die erzeugte Wärme der Kältemaschine

nicht für den Bedarf des Supermarkts, wird mit einer zusätzlichen Wärmepumpe der restliche Wärmebedarf gedeckt. Muss im Supermarkt gekühlt werden, wird die Kälte über einen separaten Klimakälte-Verdampfer von der CO<sub>2</sub>-Kältemaschine bereitgestellt. Die Modellierung der CO<sub>2</sub>-Booster Kälteanlage ist in Kapitel 2.6.2 beschrieben.

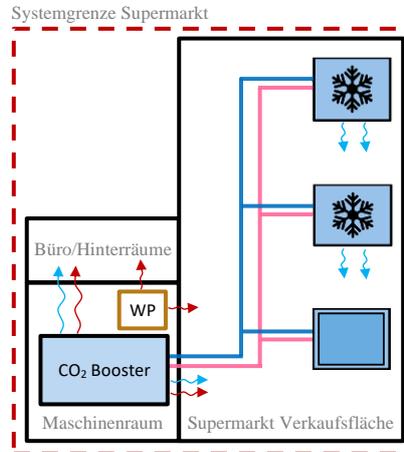


Abbildung 3: Vereinfachte Darstellung der Variante 3: Zentralgekühlt. Eine zentrale CO<sub>2</sub>-Booster Kälteanlage versorgt die Kühlmöbel und kann durch Abwärmenutzung den Supermarkt wiederum beheizen.

## 2.2 Konfigurationen der Kühlgeräte

Um mögliche Unterschiede bezüglich der Grösse des Supermarkts zu berücksichtigen, werden zwei unterschiedliche Supermärkte simuliert. Ein Supermarkt mit 340 m<sup>2</sup> Verkaufsfläche (Supermarkt M340) und ein Supermarkt mit 1250 m<sup>2</sup> Verkaufsfläche (Supermarkt M1250). Grundsätzlich werden beim Supermarkt M340 und beim Supermarkt M1250 dieselben Komponenten verwendet. Im Gegensatz zum Supermarkt M340 verfügt jedoch der Supermarkt M1250 über keine offenen Kühlmöbel. Für die Simulation werden die Supermärkte mit drei resp. vier unterschiedliche Kühlmöbel ausgestattet:

- PK Kühlmöbel, offen, vertikal (nur im Supermarkt M340)
- PK Kühlmöbel, geschlossen, vertikal
- MK Kühlmöbel, geschlossen, vertikal
- PK Kühlmöbel, geschlossen, horizontal (Aktionskühler, immer steckerfertig)

Alle Kühlmöbel und Kühlaggregate in der Simulation werden anhand von kommerziell verfügbaren Produkten auf dem Markt modelliert, so dass ein praxisnaher Betrieb abgebildet werden kann. Im Hinblick der (zukünftigen) Kältemittelregulierungen und im Sinne des neutralen Vergleichs werden nur Kühlgeräte mit einem natürlichen Kältemittel verwendet. Bei der zentralgekühlten Variante 3 wird mit einer CO<sub>2</sub> Kälteanlage gekühlt, bei den steckerfertigen Varianten werden nur Kühlmöbel und Kühlaggregate mit Propan als Kältemittel verwendet.

### 2.2.1 Aufstellung der Kühlmöbel

In der Tabelle 2 sind die verwendeten Kühlmöbel für die Simulationen der Supermärkte M340 und M1250 aufgeführt. Anhand der Laufmeter (Lfm) im Supermarkt im Verhältnis zur Länge pro Möbel lässt sich erkennen, wie viele der Möbel im jeweiligen Supermarkt verwendet werden. Grundsätzlich wurde darauf geachtet, ähnliche Kühlmöbel bezüglich der Hersteller, der Bauart, der Grösse und des EEI zu verwenden. Die Aktionskühler sind, wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, für jede Variante das gleiche, steckerfertige Kühlmöbel (Carrier Easycube). Die restlichen Kühlmöbel wurden vom Hersteller JBG2 ausgewählt. Für die Varianten 2 und 3 kann jeweils dasselbe Modell von einem Kühlmöbel verwendet werden (Gerlach 2.0 und Glacier), wobei es auch hier je nach Typ noch Unterschiede gibt.

Wichtig zu beachten ist die Angabe zum Netto-Volumen. Die technischen Angaben vom Datenblatt der Kühlmöbel (z.B. TEC, Kälteleistung, Beleuchtung etc.) werden jeweils auf ein Standard Netto-Volumen skaliert, welches bei allen Kühlstellen das Netto-Volumen des zentralgekühlten Kühlmöbels ist.

Im Gegensatz zum Supermarkt M340 werden beim Supermarkt M1250 keine offenen Kühlmöbel eingesetzt. Ansonsten sind beim M1250 die gleichen Kühlmöbel aufgestellt wie beim M340, wobei jedoch die Anzahl Laufmeter beim M1250 anders ist.

Tabelle 2: Aufstellung der Kühlmöbel im Supermarkt M340 und M1250.

Kühlstelle	Variante	Hersteller	Modell	Länge / Möbel	Lfm M340	Lfm M1250	Netto-Vol.	EEI	EE-Klasse
PK Kühlmöbel, offen, vertikal	Var. 1	JBG2	Kaukaz	1.25 m	2.50 m	-	759 L	54	E
	Var. 2	JBG2	Gerlach 2.0	1.25 m	2.50 m	-	1155 L	64	E
	Var. 3	JBG2	Gerlach 2.0	1.25 m	2.50 m	-	1020 L	41	D
PK Kühlmöbel, geschlossen, vertikal	Var. 1	JBG2	Medium	2.50 m	15.00 m	50.00 m	1354 L	11	B
	Var. 2	JBG2	Gerlach 2.0	2.50 m	15.00 m	50.00 m	2083 L	19	B
	Var. 3	JBG2	Gerlach 2.0	2.50 m	15.00 m	50.00 m	2083 L	12	B
MK Kühlmöbel, geschlossen, vertikal	Var. 1	JBG2	Wetar	2.34 m	4.68 m	16.38 m	1765 L	48	D
	Var. 2	JBG2	Glacier	2.34 m	4.68 m	16.38 m	1836 L	51	E
	Var. 3	JBG2	Glacier	2.34 m	4.68 m	16.38 m	1863 L	55	E
PK Aktionskühler, geschlossen, horizontal	Var. 1	Carrier	Easycube	1.95 m	7.80 m	25.35 m	k.A.	35	D
	Var. 2	Carrier	Easycube	1.95 m	7.80 m	25.35 m	k.A.	35	D
	Var. 3	Carrier	Easycube	1.95 m	7.80 m	25.35 m	k.A.	35	D

## 2.2.2 Kühlaggregate für Kühlräume

Die Kühlräume werden für die steckerfertigen Varianten 1 und 2 mit Kühlaggregaten von Rivacold ausgestattet. Bei der zentralgekühlten Variante 3 wird der Bedarf der Kälteleistung für den PK- und den MK-Kühlraum in der Simulation der zentralen CO<sub>2</sub>-Kältemaschine berücksichtigt, da auch die Kühlräume in der Variante 3 über ein Direktverdampfungssystem mit Kälte versorgt werden. In der Tabelle 3 sind die verwendeten Kühlaggregate sowie die Kälteleistungen der Kühlräume für die Supermärkte M340 und M1250 ersichtlich. Die angegebene Kälteleistung für den Kühlraum ist die maximale Kälteleistung. Das Lastprofil für die Kühlräume ist in Abbildung 53 im Anhang C abgebildet. Für den COP (Kälteleistung im Verhältnis zur el. Verdichterleistung) ist eine Funktion in Abhängigkeit der Verflüssigungstemperatur  $T_C$  hinterlegt, welche je nach Variante in Abhängigkeit zur Temperatur im Supermarkt steht (Var. 1) oder in Abhängigkeit zur Aussentemperatur (Var. 2).

Tabelle 3: Aufstellung der Kühlaggregate und der Kälteleistung für die Kühlräume.

Kühlraum	Variante	Hersteller	Modell	Kälteleistung pro Aggregat	Kälteleistung total M340	Kälteleistung total M1250	COP (bei $T_C = 35^\circ\text{C}$ )
PK	Var. 1	Rivacold	FAM 016PW01	2.009 kW	2.009 kW	8.036 kW	2.70
	Var. 2	Rivacold	FAM 016PW01	2.009 kW	2.009 kW	8.036 kW	2.70
	Var. 3	-	-	-	2.009 kW	8.036 kW	-
MK	Var. 1	Rivacold	FAL 020PW01	2.265 kW	2.265 kW	6.795 kW	1.37
	Var. 2	Rivacold	FAL 020PW01	2.265 kW	2.265 kW	6.795 kW	1.37
	Var. 3	-	-	-	2.265 kW	6.795 kW	-

## 2.3 Standorte

Um Unterschiede von Umgebungsbedingungen je nach Standort zu berücksichtigen, werden die Simulationen für drei Schweizer Standorte durchgeführt:

- Zürich (durchschnittliche Temperaturen)
- Lugano (wärmere Temperaturen)
- Davos (kühlere Temperaturen)

Es werden von jedem Standort die Wetterdaten von den Jahren 2015 – 2020 miteinander verglichen. Das Jahr, welches anhand der Mitteltemperatur dem Durchschnittsjahr entspricht, wird als Input-Datensatz für die Simulation gewählt. Dabei werden die Umgebungsbedingungen durch stündliche Temperaturdaten abgebildet. Die Wetterdaten der Stationen stammen vom Datenportal IDAweb von MeteoSchweiz.

## 2.4 Randbedingungen für die Supermarkt-Simulation

Nachfolgend sind alle Eingabeparameter der Simulation erläutert. Für alle Varianten sind die Randbedingungen für den Supermarkt gleich. Die Temperatur im Supermarkt liegt zwischen 19 °C (im Winter) und 24 °C (im Sommer). In der Tabelle 4 sind alle Parameter der Randbedingungen für den Supermarkt aufgelistet.

Tabelle 4: Parameter für allgemeine Supermarkt-Randbedingungen.

Parameter		Supermarkt M340	Supermarkt M1250
Öffnungszeiten		Mo. – Sa., 8:00 – 20:00	Mo. – Sa., 8:00 – 20:00
Verkaufsfläche	$A_{VF}$	340 m <sup>2</sup>	1250 m <sup>2</sup>
Büro- / Hinterraumfläche	$A_{BF}$	40 m <sup>2</sup>	100 m <sup>2</sup>
Wärmeeintrag Beleuchtung	$\dot{q}_{Licht}$	10 W/m <sup>2</sup>	10 W/m <sup>2</sup>
Wärmeeintrag Kundschaft	$\dot{q}_{Kunden}$	70 W/P	70 W/P
Frischluf	$\dot{v}_{Kunden}$	15 m <sup>3</sup> /(h*P)	15 m <sup>3</sup> /(h*P)
Effizienz WRG	$\eta_{WRG}$	0.70	0.70
Luftverteilung	$\dot{V}_{vert}$	100 m <sup>3</sup> /h	400 m <sup>3</sup> /h
Spez. el. Ventilatorleistung	$\mu_{vent}$	0.34 W/(m <sup>3</sup> /h)	0.34 W/(m <sup>3</sup> /h)
Infiltration Ein-/Ausgang	$\dot{v}_{inf}$	8 m <sup>3</sup> /P	8 m <sup>3</sup> /P
Transmission Verkaufsfläche	$\dot{Q}_{d,heiz,VF}$	-7.65 kW (-8 °C) 3.12 kW (35 °C)	-21.14 kW (-8 °C) 8.61 kW (35 °C)
Transmission Büro/Hinterräume	$\dot{Q}_{d,heiz,BF}$	-1.93 kW (-8 °C) 0.73 kW (35 °C)	-3.48 kW (-8 °C) 1.32 kW (35 °C)
Interne Wärmelasten	$\dot{Q}_{int,max}$	1 kW	2 kW
Heizung RL / VL		27 / 35 °C	27 / 35 °C
Klimakälte RL / VL		18 / 12 °C	18 / 12 °C
ETV Rückkühler-Ventilatoren	$ETV_{RK,vent}$	28	28
ETV Gaskühler-Ventilatoren	$ETV_{GK,vent}$	40	40
ETV Pumpenwarmwasser	$ETV_{Warm,Pumpen}$	85	85
ETV Kaltwasser-Pumpen	$ETV_{Kalt,Pumpen}$	65	65

Einige Parameter sind abhängig von Betriebszeiten resp. von Lastprofilen, welche im Anhang C zu finden sind. Die Öffnungszeiten sind bewusst mit 12 Stunden pro Tag gewählt, da auch die Prüfbedingungen für Kühlmöbel gemäss Norm SN EN ISO 23953-2 [2] von einem je 12 Stunden offen/geschlossen Betrieb ausgehen. Die Beleuchtung ist immer nur an, wenn der Supermarkt offen ist. Der Wärmeeintrag der Kundenschaft, die Menge an Frischluft und die Infiltration am Ein-/Ausgang ist jeweils in Abhängigkeit von den Besucher-Lastprofilen, welche in Abbildung 54 im Anhang C abgebildet sind. Des Weiteren sind auch die internen Wärmelasten über ein Lastprofil abgebildet, da beispielsweise die Backöfen schon vor Ladenöffnung in Betrieb genommen werden (siehe Abbildung 55, Anhang C).

Die Effizienz der WRG (Wärmerückgewinnung) beschreibt, mit welchem Wirkungsgrad die Abluft die Zuluft temperieren kann. Muss zum Beispiel ein Zuluft-Volumenstrom für die Frischluft von 10 °C auf 20 °C erwärmt werden, muss bei einem WRG-Wirkungsgrad von 0.70 nur 30% der dafür benötigten Wärmeleistung von einem Wärmeerzeuger erbracht werden.

Die Elektro-Thermo-Verstärkungsfaktoren (ETV) dienen als Hilfsgrösse, um den elektrischen Leistungsbedarf von Ventilatoren und Förderpumpen zu berechnen und sind in der Norm SIA 382/1:2014 [3] bestimmt. Der ETV-Faktor ist das Verhältnis einer thermischen Leistung zum elektrischen Leistungsbedarf der Förderkomponente. Beispielsweise beträgt der ETV-Rückkühlerventilatoren 28. Das bedeutet, dass der elektrische Leistungsbedarf für die Rückkühlerventilatoren ca. 3.6% ( $\frac{1}{28}$ ) der thermischen Rückkühlleistung entspricht.

## 2.5 Modellierung Kühlmöbel

Einer der Hauptaspekte der Supermarkt-Simulation ist die Modellierung der Kühlmöbel. Als Simulationsinput werden die Datenblattangaben der jeweiligen Kühlmöbel verwendet. Diese werden bei den Prüfbedingungen gemäss der Norm SN EN ISO 23953-2 [2] bestimmt. Um das Verhalten der Kühlmöbel im realen Betrieb abzubilden, werden die Simulationsinputs aus den Angaben des Datenblatts mit verschiedenen Faktoren, welche den Supermarktbedingungen Rechnung tragen, angepasst. Folgende Einflussgrössen im Supermarkt werden in der Modellierung berücksichtigt, um die Kältebelastung und den Strombedarf des Kühlmöbels für jede Stunde abzubilden:

- Tag / Nacht (resp. Supermarkt offen / geschlossen)
- Besucher Lastprofil
- Ladentemperatur
- Luftfeuchtigkeit

### 2.5.1 Faktor Tag/Nacht

Der Faktor Tag/Nacht kann auch als Supermarkt offen/geschlossen betrachtet werden. Im Allgemeinen wird dabei berücksichtigt, ob die Beleuchtung im Kühlmöbel an ist oder nicht. Dabei wird einerseits der Strombedarf der Beleuchtung berücksichtigt, aber auch der zusätzliche Wärmeeintrag in das Kühlmöbel durch die Beleuchtung.

Bei offenen Kühlmöbeln wird zusätzlich noch die Nachtdeckung berücksichtigt. Die wird mit einem Faktor von +/- 20% bei Tag/Nacht für die Kälteleistung angerechnet.

Über einen 24h-Tagesverlauf, gerechnet mit dem Faktor Tag/Nacht, entspricht der Mittelwert der Kälteleistung in der Simulation der des Datenblatts gemäss Prüfnorm, siehe Abbildung 4.

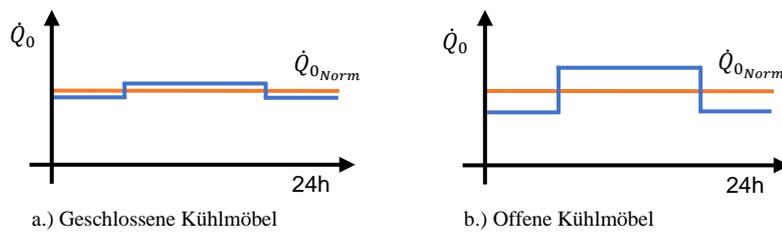


Abbildung 4: Norm-Kälteleistung eines Kühlmöbels (orange Linie) berechnet mit dem Tag/Nacht Faktor (blaue Linie) über 24 Stunden. a.) Für geschlossene Kühlmöbel. b.) Für offene Kühlmöbel.

### 2.5.2 Faktor Kunden

Die Anzahl der Besucher beeinflusst durch das Öffnen und Schliessen der Türen und durch die Unterbrechung des Luftschleiers die erforderliche Kälteleistung der Kühlmöbel. Je mehr Kunden im Supermarkt sind, desto grösser ist die Kältelast des Kühlmöbels. Dementsprechend ist das Kältelastprofil des Faktors Kunden abhängig vom Lastprofil der Kunden. Wie gross der Wärmeeintrag in das Kühlmöbel ist, ist abhängig von der Grösse, der Bauform (vertikal oder horizontal) und vom Temperaturniveau des Kühlmöbels und wird gemäss der Untersuchung von N. Fidorra [4] berechnet.

In der Prüfnorm wird das Öffnen und Schliessen der Türen ebenfalls berücksichtigt [2]. Deshalb ändert sich über einen 24h-Zyklus die Anzahl Türöffnungen pro Kühlmöbel nicht, und dementsprechend ist in der Simulation der Mittelwert der Kälteleistung des Kühlmöbels gleich den Angaben des Datenblatts, siehe Abbildung 5.

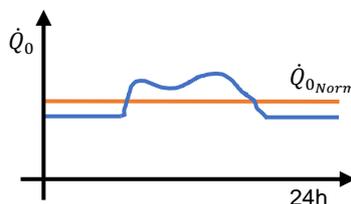
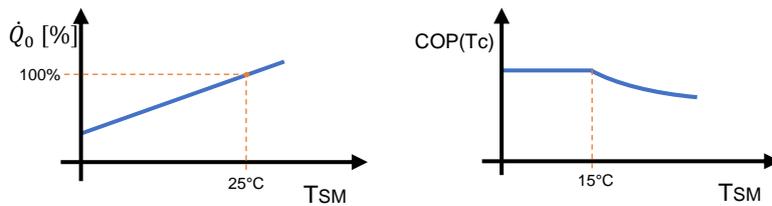


Abbildung 5: Kälteleistung mit Faktor Kunden (blaue Linie) im Vergleich zur Norm-Kälteleistung (orange Linie).

### 2.5.3 Faktor Ladentemperatur

Die Ladentemperatur in den Prüfbedingungen beträgt 25 °C [2]. In der Simulation beträgt die Temperatur im Supermarkt zwischen 19 und 24 °C. Dadurch verringert sich die Kältelast des Kühlmöbels, da der Unterschied zur Umgebungstemperatur von 25 °C kleiner wird als bei der Prüfbedingung. Gemäss der Untersuchung von J. Arias [5] nimmt die Kühllast des Möbels annähernd linear ab mit sinkender Umgebungstemperatur. Dementsprechend wird die Kälteleistung mit Veränderung der Umgebungstemperatur linear angepasst, wobei 100% Kälteleistung bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C entspricht, wie in Abbildung 6 a.) dargestellt.

Bei steckerfertigen Kühlmöbeln, welche die Wärme direkt in den Raum abgeben, wird zudem der COP des Kältekreisprozesses aufgrund der verändernden Verflüssigungstemperatur angepasst. Die Verflüssigungstemperatur beträgt jeweils +10 K gegenüber der Umgebungstemperatur und kann ein Minimum von 25 °C erreichen, siehe Abbildung 6 b.).



a.) Veränderung der Kälteleistung aufgrund der Ladentemperatur. b.) Veränderung des COP aufgrund der Ladentemperatur.

Abbildung 6: a.) Veränderung der Kälteleistung in Abhängigkeit des Faktors Ladentemperatur. b.) Veränderung des COP bei steckerfertigen Kühlmöbel in Abhängigkeit der Ladentemperatur.

## 2.5.4 Faktor Luftfeuchtigkeit

Die relative Luftfeuchtigkeit beträgt bei Prüfbedingungen 60% [2]. In der Simulation wird die Luftfeuchtigkeit im Supermarkt vereinfacht als Funktion der Aussentemperatur angenommen. Je kühler die Aussentemperatur, desto geringer die relative Luftfeuchtigkeit im Supermarkt und desto geringer die Kältelast des Kühlmöbels, wobei ein Minimum bei  $0^\circ\text{C}$  Aussentemperatur besteht. Die Kältelast gemäss Normbedingungen (100%) wird bei einer Aussentemperatur von  $35^\circ\text{C}$  festgelegt, mit einem linearen Verlauf. Dieser Faktor ist angelehnt an die Studie von M. Karampur und S. Sawalha [6] und wurde gemäss den Erfahrungen im Schweizer Markt angepasst. Da der Einfluss der Luftfeuchtigkeit bei offenen Kühlmöbeln grösser ist als bei geschlossenen Kühlmöbeln, beträgt das Minimum der Kältelast bei offenen Kühlmöbeln 50%, bei geschlossenen 60%. Dies ist in Abbildung 7 dargestellt.

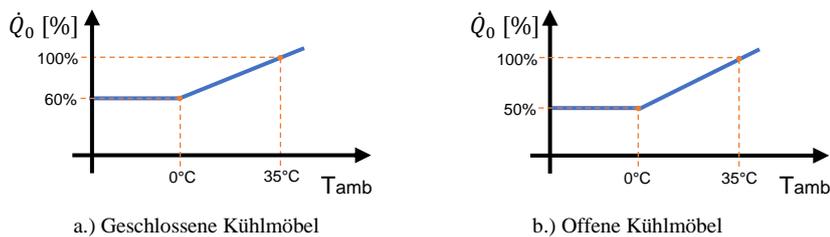


Abbildung 7: Veränderung der Kältelast aufgrund der relativen Luftfeuchtigkeit, in Abhängigkeit der Aussentemperatur. a.) Für geschlossene Kühlmöbel. b.) Für offene Kühlmöbel.

Für die Wärmebilanz im Supermarkt muss bezüglich des Faktors Luftfeuchtigkeit berücksichtigt werden, dass die erhöhte Kälteleistung nicht einen erhöhten sensiblen Wärmeentzug zur Folge hat. Die erhöhte Kälteleistung ergibt sich aufgrund der höheren Entfeuchtung der Umgebungsluft. Der sensible Wärmeentzug bleibt konstant. Deshalb wird für die Wärmebilanz der Faktor Luftfeuchtigkeit mit einem Faktor für den Anteil des sensiblen Wärmeentzugs ergänzt. Dieser verhält sich umgekehrt proportional zum Faktor Luftfeuchtigkeit und hat ein Maximum von 85%, wie in Abbildung 8 dargestellt.

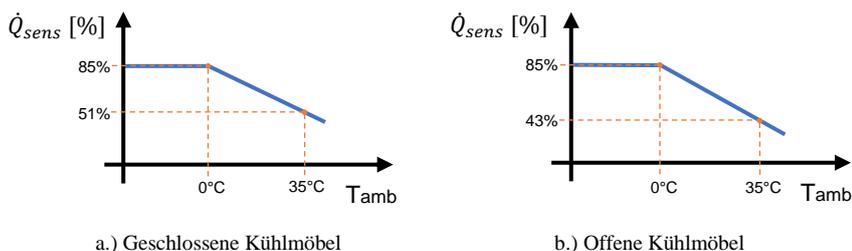


Abbildung 8: Veränderung des Anteils des sensiblen Wärmeentzugs von einem Kühlmöbel im Supermarkt, in Ergänzung des Faktors Luftfeuchtigkeit. a.) Für geschlossene Kühlmöbel. b.) Für offene Kühlmöbel.

## 2.6 Simulationsaufbau

### 2.6.1 Allgemeiner Simulationsaufbau

Alle durchgeführten Supermarkt-Simulationen sind als quasistatischer Prozess über ein Jahr mit stündlicher Auflösung aufgebaut. Hierbei wird vorausgesetzt, dass Energie- und Massenerhaltung zu jeder Stunde gegeben sind. Abweichend zu vollständig quasistatischen Simulationen wurden jeweils für den Wärmebedarf der Verkaufsfläche ( $\dot{Q}_{bed,VF}$ ) und für die Aussentemperatur ( $T_{A,EGM}$ ) zur Berechnung der Gebäude-wandtransmission ein gleitendes Mittel über 24 Stunden gebildet, was das dynamische Verhalten der Gebäudemasse realitätsnaher abbildet. Der Berechnungsweg ist für alle Simulations-Konfigurationen ähnlich, wobei Variationen von Standort und Supermarktgrösse über unterschiedliche Randbedingungen abgebildet werden. Einzig die Supermarktvarianten erfordern leicht unterschiedliche Berechnungswege, wozu in Abbildung 9 eine Übersicht gegeben ist.

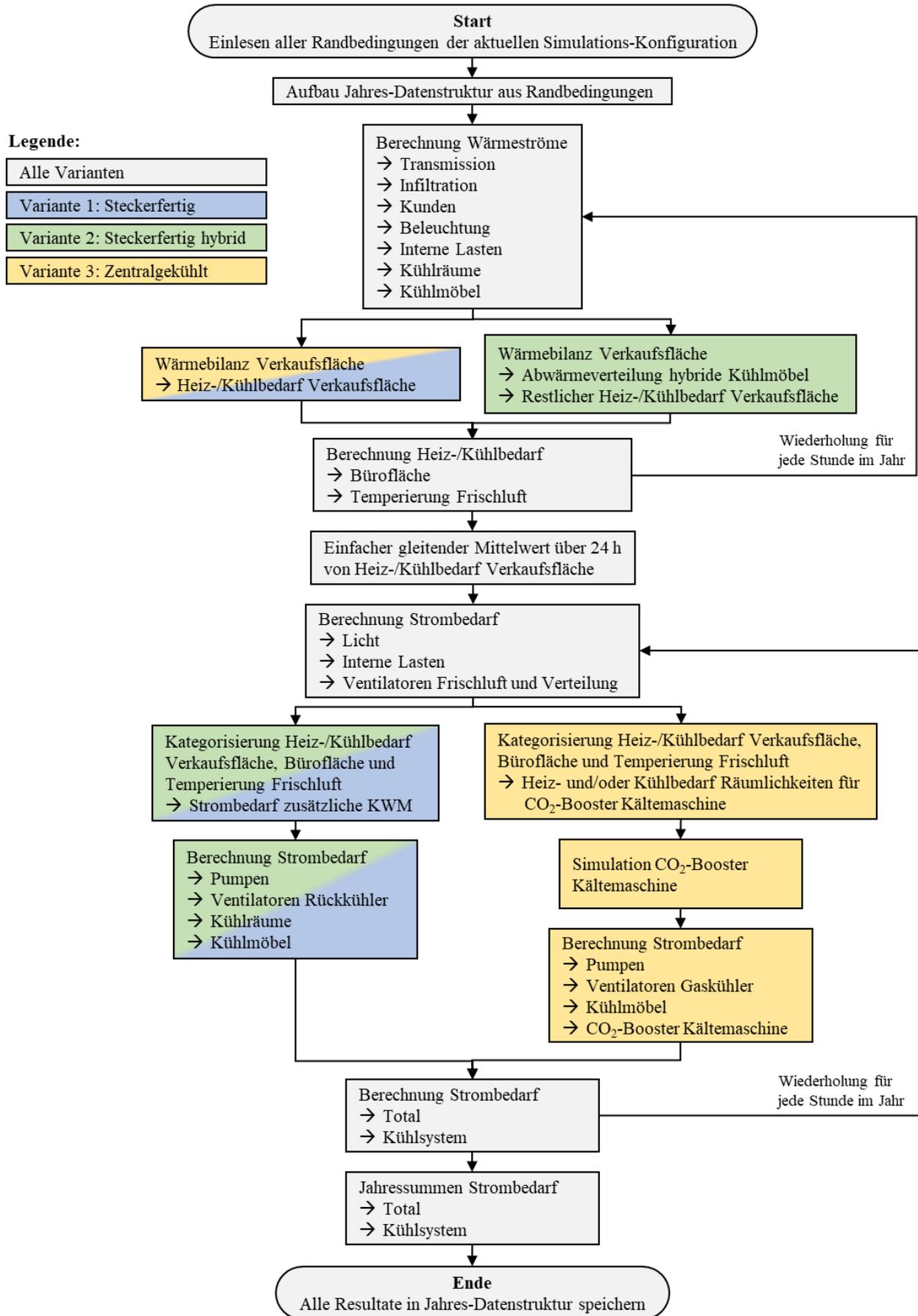


Abbildung 9: Übersicht zum Berechnungsweg einer Simulations-Konfiguration.

Für jede Supermarktvariante wurde ein eigenes Berechnungsskript entwickelt. Da über alle Varianten gewisse Ähnlichkeiten herrschen, werden diese hier zusammengefasst beschrieben. Eine detaillierte Erläuterung zur Berechnung jeder Variante findet sich in den Anhängen E bis G.

In jeder Simulations-Konfiguration werden zunächst alle Randbedingungen eingelesen, was Standort und Supermarktgrösse direkt definiert. Daraus wird ein Jahres-Datensatz erstellt, wobei vor allem die wöchentlichen Profile über das gesamte Jahr expandiert werden. Hierbei wird eine normale Arbeitswoche für das gesamte Jahr angenommen, ohne Berücksichtigung von Ausnahmen wie z.B. erhöhtem Personenaufkommen vor Weihnachten oder generellen Schliessungen an Feiertagen. Im nächsten Schritt werden pro Stunde alle Wärmeströme berechnet, um die Wärmebilanz der Verkaufsfläche zu erstellen. Es sei angemerkt, dass das gleitende 24h-Mittel der Aussentemperatur ( $T_{A,EGM}$ ) bereits mit den Randbedingungen eingelesen wurde und zur Berechnung der Transmissions-Wärmeströme verwendet wird. Für die Varianten 1 und 3 ergibt sich der Heiz-/Kühlbedarf, der durch die zusätzliche KWM oder die zentrale CO<sub>2</sub>-Kältemaschine bereitgestellt wird. Bei Variante 2 erfolgt zunächst ein Abgleich mit der Abwärme der hybriden Kühlmöbel, wodurch  $\dot{Q}_{bed,VF}$  teilweise oder vollständig gedeckt werden kann. Möglicherweise verbleibt ein Rest-Wärmebedarf, der durch die zusätzliche KWM bereitgestellt wird. Im weiteren Verlauf erfolgt die Berechnung des Wärmebedarfs für Büroflächen und die Temperierung von Frischluft. Anschließend wird das gleitende 24h-Mittel von  $\dot{Q}_{bed,VF}$  für jede Variante gebildet.

Nach Abschluss der thermischen Berechnungen erfolgt die Ermittlung des entsprechenden Stromverbrauchs, begonnen mit dem Strombedarf für Beleuchtung, interne Lasten und Ventilatoren zur Frischluftversorgung sowie Wärmeverteilung. Bei den Varianten 1 und 2 wird der Heiz-/Kühlbedarf von Verkaufsfläche, Bürofläche und zur Temperierung von Frischluft kategorisiert, um die Effizienz der zusätzlichen KWM und somit deren Stromverbrauch korrekt zu ermitteln. Der COP/EER der KWM kann je nach Gleichzeitigkeit von Heiz- und Kühlbedarf unterschiedlich ausfallen. Anschliessend wird der Strombedarf für alle weiteren Aggregate im Supermarkt berechnet. Für Variante 3 gestaltet sich dieselbe Berechnung anders: Die Kategorisierung von Heiz-/Kühlbedarf definiert die Wärmeleistung der Heizung ( $\dot{Q}_H$ ) sowie die Kälteleistung für Klimakälte ( $\dot{Q}_{KK}$ ) der zentralen CO<sub>2</sub>-Kältemaschine. Zusammen mit dem Kältebedarf für Pluskühlung ( $\dot{Q}_{PK}$ ) und Minuskühlung ( $\dot{Q}_{MK}$ ) erfolgt die Simulation der CO<sub>2</sub>-Kältemaschine, woraus nachfolgend alle restlichen Strombedarfe ermittelt werden.

Am Ende jeder Variantenberechnung wird der Strombedarf des gesamten Supermarkts sowie derjenige des Kühlsystems stündlich berechnet und über das Jahr aufsummiert.

## 2.6.2 CO<sub>2</sub>-Booster Kälteanlagen Simulation

Im Folgenden wird der Simulationsaufbau der zentralen CO<sub>2</sub>-Booster Kälteanlage näher betrachtet. Das Schema und das dazugehörige log(p)-h Diagramm der simulierten CO<sub>2</sub>-Booster Kälteanlage sind in der Abbildung 10 dargestellt. Für die Simulation wurden die folgenden Annahmen und Vereinfachungen getroffen:

- Stationärer Zustand
- Isenthalpe Expansion in allen Expansionsventilen
- Ejektor wird nicht simuliert, jedoch Verdampfungstemperatur um 2 K erhöht
- Konstanter Isentropen-Wirkungsgrad beim Niederdruck Verdichter
- Keine Druck- und Wärmeverluste in allen Komponenten
- Rohrleitungen sind nicht simuliert
- Keine stationäre Massenerhaltung in den Sammler/Saugakku
- Konstante Überhitzungen in allen Verdampfern

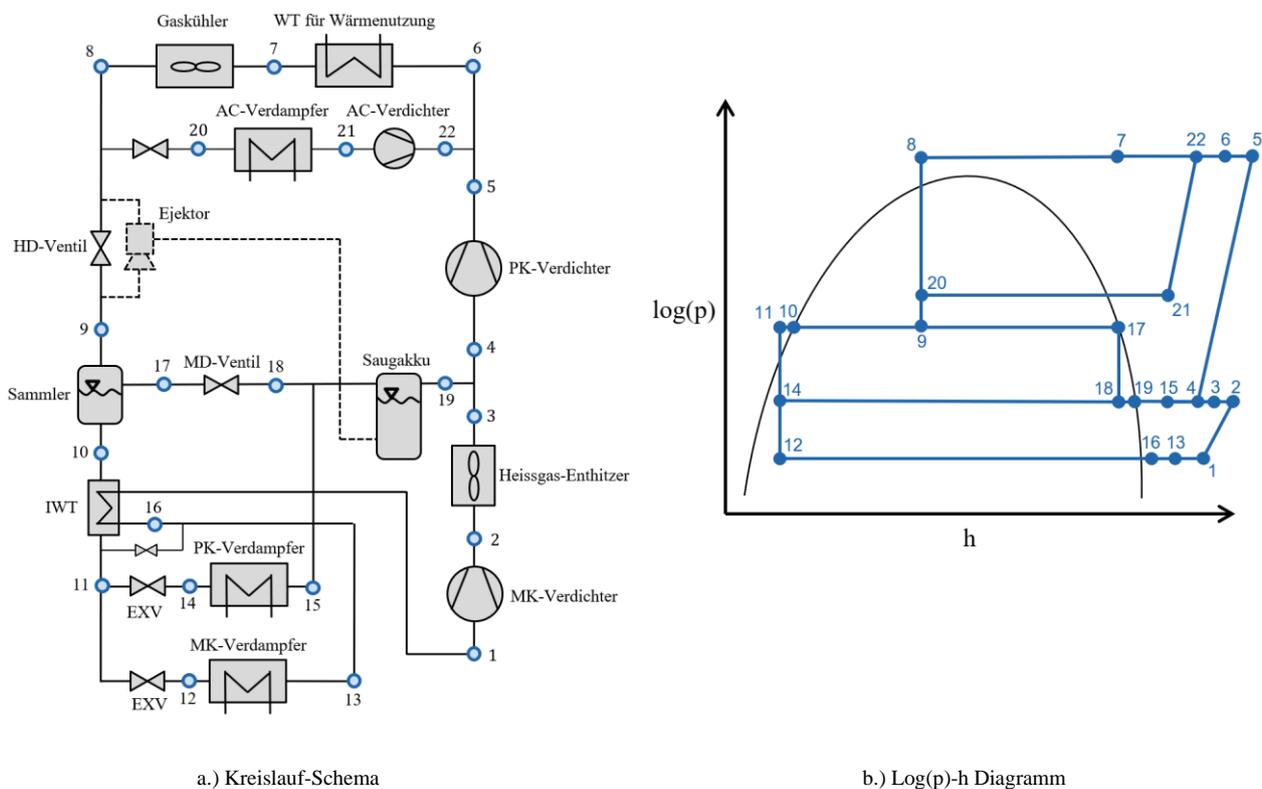


Abbildung 10: Schema der CO<sub>2</sub>-Booster Kälteanlage (a) und dazugehöriges log(p)-h Diagramm (b).

Alle Ein- und Ausgaben sowie die Parameter der Simulation sind im Anhang H in der Tabelle 19 aufgeführt. Wie in Abbildung 9 ersichtlich ist, werden Kältebedarf der Kühlmöbel sowie die Wärmebilanz des ganzen Supermarktes vor der Simulation der CO<sub>2</sub>-Booster Kälteanlage bestimmt. Daher sind die Aussentemperatur sowie die unterschiedlichen thermischen Bedarfe Input für die Simulation der CO<sub>2</sub>-Booster Kälteanlage. Dies ist ebenfalls in der Tabelle 19 im Anhang H ersichtlich. Das Ziel der CO<sub>2</sub>-Simulation ist die Ermittlung des Strombedarfs der Anlage, um die verschiedenen Bedarfe zu decken. Hierzu muss der notwendige Kältemittelmassenstrom, der Hochdruck sowie die Effizienz des Verdichters ermittelt werden.

Eine detailliertere Erläuterung zur Simulation der CO<sub>2</sub>-Booster Kälteanlage ist im Anhang H zu finden.

### 3. Resultate der Simulationen

Die Resultate der Simulationen können mit unterschiedlichem Fokus dargestellt werden. Die Hauptgrösse ist der Vergleich des jährlichen Strombedarfs des gesamten Supermarkts. Dementsprechend wird in den folgenden Unterkapiteln zuerst der jährliche Strombedarf der verschiedenen Varianten und der unterschiedlichen Standorte aufgezeigt. Anschliessend wird für ein Beispiel-Supermarkt für alle Varianten ein detaillierterer jährliche Strombedarf im monatlichen Verlauf gezeigt. In Kapitel 3.3 sind Wärmebilanzen für einen Herbsttag für jede Supermarkt-Variante abgebildet, damit der Einfluss der unterschiedlichen Systemlösungen auf die Verkaufsfläche aufgezeigt werden kann. Als letztes folgt eine Plausibilisierung der Resultate anhand eines Vergleichs von Echtdata eines Supermarkts im Raum Zürich, verglichen mit den Simulationsergebnissen.

#### 3.1 Vergleich der Varianten

Das Ziel der Untersuchung ist, die unterschiedlichen Systemlösungen ganzheitlich energetisch zu vergleichen. Die Hauptgrösse, um die verschiedenen Varianten miteinander vergleichen zu können, ist der gesamte Strombedarf des Supermarkts über ein Jahr. Dieser Vergleich kann jeweils für beide Supermarkt-Grössen und für alle drei Standorte gemacht werden. Aus diesem Grund werden in den nachfolgenden Unterkapiteln und im Anhang A die gleiche Auswertung für alle Supermärkte aufgezeigt.

Der Strombedarf des Supermarkts kann in vier Bereiche aufgeteilt werden:

**Kühlmöbel und Kühlräume** beinhaltet den gesamten Stromverbrauch aller Kühlgeräte, ohne die Aktionskühler. Bei den steckerfertigen Varianten 1 und 2 ist damit der Betrieb aller Kühlmöbel und Kühlaggregate eingeschlossen. Bei der hybriden Variante 2 wird für die Kühlmöbel und Kühlaggregate zusätzlich noch anteilmässig der Strombedarf für die Sekundärkreis-Förderpumpe und die Rückkühler-Ventilatoren miteinberechnet.

Bei der zentralgekühlten Variante 3 werden die Verbraucher (Betrieb Kühlmöbel), die Erzeugung (CO<sub>2</sub>-Kältemaschine) und die Gaskühler-Ventilatoren in demselben Bereich miteinberechnet. Es ist wichtig dabei zu berücksichtigen, dass die zentrale CO<sub>2</sub>-Kälteanlage bei Bedarf auch die Klimakälte erzeugt und für die Heizung bei Bedarf den Hochdruck anhebt, was eine Verschlechterung der Teil-Effizienz zur Folge hat. Diese beiden Punkte führen bei der Erzeugung zu einem Mehrverbrauch, welcher zwar nicht mit den Kühlgeräten zusammenhängt, jedoch in der Auswertung nicht getrennt werden kann vom Bereich Kühlmöbel und Kühlräume. Auf der anderen Seite führt es dafür zu einem geringeren Verbrauch im Bereich der Heizung und der Klimakälte. Deshalb sollte der Energieverbrauch der Kühlmöbel und Kühlräume immer zusammen mit dem Energieverbrauch der HLK zusammen betrachtet werden.

**HLK** steht für Heizung, Lüftung, Klimatisierung und beinhaltet den Betrieb der Wärmepumpe resp. der Kältemaschine (für die Klimatisierung), die Förderpumpen sowie die Ventilatoren für die Lüftung und den Rückkühler.

**Aktionskühler** sind die steckerfertigen, mobilen Truhen, welche in jedem Supermarkt flexibel verwendet werden. Um eine möglichst praxisnahe Simulation zu erreichen, werden die Aktionskühler auch in der Berechnung berücksichtigt. Da aber der Betrieb der Aktionskühler bei allen Supermarkt-Varianten identisch ist, werden diese nicht in den Bereich der Kühlmöbel und Kühlräume miteinbezogen, um den Vergleich nicht zu verfälschen. Um die Unterschiede im Strombedarf der Systemlösungen zu untersuchen, können die Aktionskühler auch weggelassen werden.

**Allgemein** ist der Bereich, welcher die Beleuchtung und die internen Wärmelasten im Supermarkt beinhaltet. Genau wie bei den Aktionskühlern ist auch der allgemeine Stromverbrauch bei jeder Supermarkt Variante identisch. Zur Vollständigkeit wird auch der allgemeine Stromverbrauch in der jährlichen Auswertung berücksichtigt. Jedoch gilt es auch hier zu beachten, dass bei einem Vergleich des Strombedarfs der Systemlösungen der allgemeine Strombedarf ignoriert werden kann.

Des Weiteren muss noch berücksichtigt werden, dass der allgemeine Strombedarf nur die Beleuchtung in der Verkaufsfläche und die internen Lasten berücksichtigt, nicht aber weitere Stromverbraucher wie zum

Beispiel Personen- und Transportlifte, Beleuchtung im Treppenhaus oder in der Tiefgarage, usw. Es werden nur diejenigen Komponenten berücksichtigt, welche einen Einfluss auf den Betrieb (resp. auf die Wärmebilanz) in der Verkaufsfläche im Supermarkt haben.

### 3.1.1 Supermarkt M340 in Zürich

In der Abbildung 11 ist der Vergleich des gesamten Strombedarfs über ein Jahr für den Supermarkt M340 beim Standort Zürich für die drei untersuchten Varianten abgebildet. Wie bereits erwähnt, werden die Stromverbräuche in die vier beschriebenen Bereiche Kühlmöbel und Kühlräume, HLK, Aktionskühler und Allgemein unterteilt.

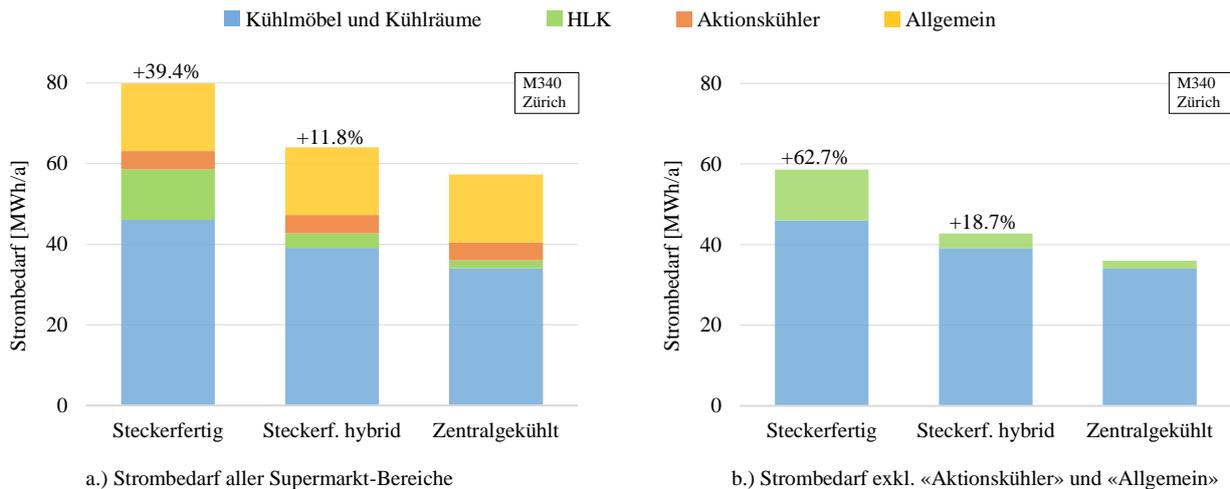


Abbildung 11: Vergleich des Strombedarfs der Varianten, für den Supermarkt M340 in Zürich. a.) Jährlicher Strombedarf des gesamten Supermarkts. b.) Strombedarf des Supermarkts, exklusive der Aktionskühler und der allgemeinen Verbraucher.

In der linken Abbildung a.) ist der gesamte Strombedarf des Supermarkts abgebildet. Die Variante 1 mit den konventionellen steckerfertigen Kühlmöbel hat mit rund 80 MWh pro Jahr den höchsten Strombedarf. Wesentlich geringer ist der Stromverbrauch bei der hybriden steckerfertigen Systemlösung. Das effizienteste Kältetechnik-System ist die Variante 3 mit Zentralkühlung, welche 6.7 MWh/a weniger Stromverbrauch als die steckerfertig hybride Variante und 22.6 MWh/a weniger als die Variante 1.

Um die Unterschiede prozentual festzuhalten, muss differenziert werden vom Bedarf des gesamten Supermarkts (Abbildung 11 a.) und dem Bedarf der Kältetechnik relevanten Bereiche (Abbildung 11 b.)). Grundsätzlich ist es bei der Betrachtung des gesamten Supermarkts so, dass je mehr allgemeine Stromverbraucher vorhanden sind, desto kleiner wird der prozentuale Unterschied. Dies kann also von Supermarkt zu Supermarkt stark variieren. Deshalb ist es geeigneter, die relativen Unterschiede nur auf die Bereiche zu beziehen, welche abhängig sind von der gewählten Kühltetechnik, welche in Abbildung 11 b.) dargestellt sind. Im Vergleich zur effizientesten Variante 3 hat die steckerfertig hybride Variante 2 einen um 18.7% höheren Strombedarf und die konventionelle steckerfertige Variante 1 um 62.7% mehr Strombedarf. Die zentralgekühlte Variante ist also sowohl im Bereich der Kühlmöbel und Kühlräume als auch im Bereich der HLK energieeffizienter als die beiden steckerfertigen Varianten. Eine detailliertere Analyse folgt in den nächsten Unterkapiteln 3.2 und 3.3.

### 3.1.2 Supermarkt M1250 in Zürich

In der Abbildung 12 ist der Vergleich bezüglich des jährlichen Strombedarfs für den Supermarkt M1250 in Zürich abgebildet. Der Supermarkt M1250 verbraucht bei allen Varianten rund dreimal mehr Strom als der Supermarkt M340. Der relative Vergleich zwischen den jeweiligen Varianten ist jedoch ähnlich wie beim Supermarkt M340 (vergl. Abbildung 11 mit Abbildung 12). Auch für den Supermarkt M1250 ist die effizienteste Variante die zentralgekühlte Variante 3.

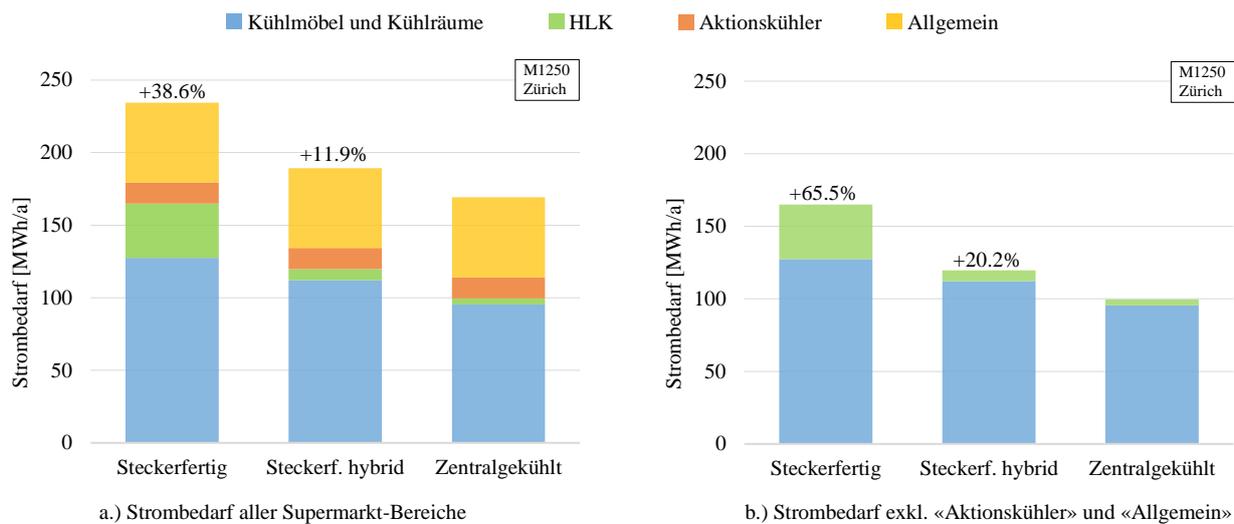


Abbildung 12: Vergleich des Strombedarfs der Varianten, für den Supermarkt M1250 in Zürich. a.) Jährlicher Strombedarf des gesamten Supermarkts. b.) Strombedarf des Supermarkts, exklusive der Aktionskühler und der allgemeinen Verbraucher.

Wie beim Supermarkt M340 können auch beim Supermarkt M1250 die beiden Bereiche Aktionskühler und Allgemein im Vergleich bezüglich der effizientesten Kühltisystemlösung vernachlässigt werden (Abbildung 12 b.)). So hat die Variante 2 Steckerfertig hybrid einen Mehrverbrauch von 20.2% gegenüber der Variante 3 und die Variante 1 um 65.5% gegenüber der Variante 3.

Prozentual sind die Unterschiede beim Supermarkt M1250 leicht grösser als beim Supermarkt M340. Absolut sind die Unterschiede aufgrund der Grösse aber dementsprechend deutlicher. Mit Variante 3 kann gegenüber der Variante 2 pro Jahr 20.1 MWh Strom eingespart werden, gegenüber der Variante 1 ist die Ersparnis in Zürich sogar bei 65.3 MWh/a. Es zeigt sich also, dass einerseits die zentralgekühlte Variante 3 am energieeffizientesten ist und andererseits die hybride steckerfertige Variante 2 deutlich effizienter ist als die konventionelle steckerfertige Variante 1. Diese Aussage gilt sowohl für den M340 als auch für den M1250. Die gleichen Übersichten wie in den Abbildungen 11 und 12 sind im Anhang A auch für die Standorte Lugano und Davos.

### 3.1.3 Vergleich der Standorte

Die Vergleiche der Varianten für die beiden Supermarktgrössen wurden neben Zürich auch für die Standorte Davos und Lugano durchgeführt. Die Ergebnisse bezüglich des gesamten Strombedarfs für alle Varianten und alle Standorte sind für den Supermarkt M340 in Abbildung 13 und für den Supermarkt M1250 Abbildung 14 dargestellt. Die beiden Abbildungen zeigen ein ähnliches Bild: Die Aussagen bezüglich der Energieeffizienz von den Resultaten in Zürich lassen sich qualitativ auch für Davos und Lugano anwenden. Deshalb werden die Resultate von Davos und Lugano jeweils im Anhang abgebildet.

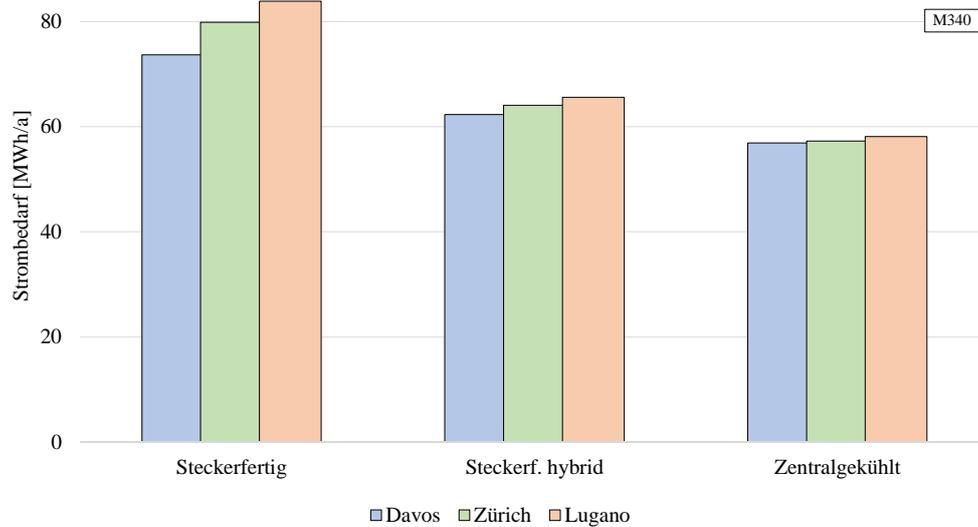


Abbildung 13: Vergleich des jährlichen Strombedarfs, nach Variante und Standort, für den Supermarkt M340.

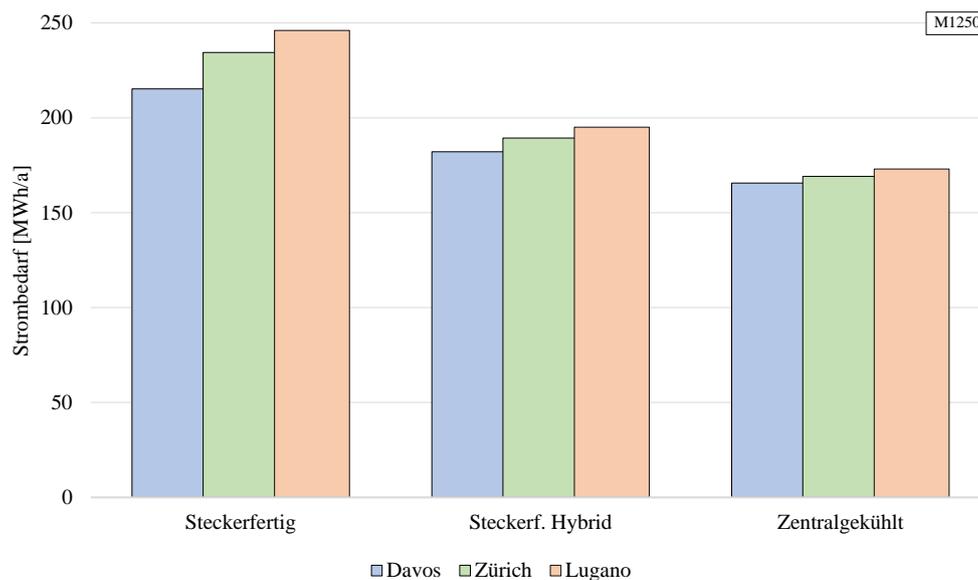


Abbildung 14: Vergleich des jährlichen Strombedarfs, nach Variante und Standort, für den Supermarkt M1250.

Die Grafiken in den Abbildungen 13 und 14 zeigen, dass die Umgebungsbedingungen einen Einfluss auf den Strombedarf eines Supermarkts haben und dass dieser je nach Systemlösung unterschiedlich gross ist. Grundsätzlich kann, unabhängig von der Grösse oder der Variante, festgehalten werden, dass ein Supermarkt in Davos weniger Strom verbraucht als in Zürich und dort wiederum weniger als in Lugano. Das ist auf die im Schnitt tiefere Umgebungstemperatur zurückzuführen. Diese führt zum einen, aufgrund der Vereinfachung, dass die Luftfeuchtigkeit im Supermarkt abhängig ist von der Umgebungstemperatur, zu einem geringeren Kälte- bzw. Strombedarf der Kühlmöbel. Zum anderen bewirken die tieferen Temperaturen eine effizientere Kältetechnik, wenn bei dieser die Verflüssigungstemperatur von den Umgebungsbedingungen abhängig ist.

Des Weiteren ist ersichtlich, dass die steckerfertige Variante 1 wesentlich stärker im Verbrauch auf die unterschiedlichen Umgebungsbedingungen reagiert. Weil durch die steckerfertigen Kühlmöbel meistens zu viel Wärme im Supermarkt ist, muss dieser ständig gekühlt werden. Je kühler die Umgebungsbedingungen

sind, desto weniger muss gekühlt werden (aufgrund der Transmission und der Infiltration) und desto effizienter ist die Kältemaschine im Betrieb. Bei der zentralgekühlten Variante 3 wiederum sind nur geringe Änderungen bei den unterschiedlichen Standorten resp. den unterschiedlichen Umgebungsbedingungen auszumachen. Dies zeigt sich auch in den folgenden Unterkapiteln bei den monatlichen Verbrauchsübersichten und bei der Plausibilisierung. Übergeordnet kann festgehalten werden, dass der prozentuale Unterschied zwischen den Varianten zunimmt, je wärmer der Standort ist. Diese Aussage gilt aber nur für die untersuchten Standorte und nur über den ganzen Jahresverlauf betrachtet.

### 3.2 Monatliche Übersicht

In den folgenden Unterkapiteln ist jeweils für den Supermarkt M1250 in Zürich der Strombedarf pro Monat über ein Jahr abgebildet. Im Vergleich zu den Abbildungen 11 und 12 wird der Bereich Kühlmöbel und Kühlräume in der monatlichen Darstellung für die Varianten 1 und 2 weiter in PK und MK unterteilt. Diese Unterteilung ist bei Variante 3 nicht möglich. Dort wird dafür der ganze Bereich Kühlmöbel und Kühlräume in Erzeugung und Verbraucher unterteilt, als zusätzliche Information. Die monatlichen Übersichten dienen einerseits zur Veranschaulichung der Unterschiede zwischen den Varianten und andererseits zeigen sie die saisonalen Unterschiede über ein Jahr für eine Variante auf. Die Bereiche Aktionskühler und Allgemein sind wie bei den jährlichen Übersichten für jede Variante identisch.

#### 3.2.1 Variante 1: Steckerfertig - Supermarkt M1250 in Zürich

Die monatlichen Stromverbräuche der Variante 1 sind sehr von den Umgebungsbedingungen abhängig, wie in Abbildung 15 zu sehen ist. Der Stromverbrauch steigt vom Winter über die Übergangszeiten bis zum Sommer hin an. Dies liegt zum einen daran, dass im Sommer sowohl die Ladentemperatur als auch die Luftfeuchtigkeit im Supermarkt höher ist und die Kühlmöbel dementsprechend einen höheren Kältebedarf haben. Der Hauptgrund bei der Variante 1 ist jedoch der hohe Aufwand, um den Supermarkt in den warmen Monaten zu kühlen. Dies ist mit dem grünen Balken (HLK) sehr gut ersichtlich. Das ist auch der Hauptgrund, weshalb die Variante 1 deutlich ineffizienter ist als die Varianten 2 und 3 (vergl. Abbildungen 11 und 12).

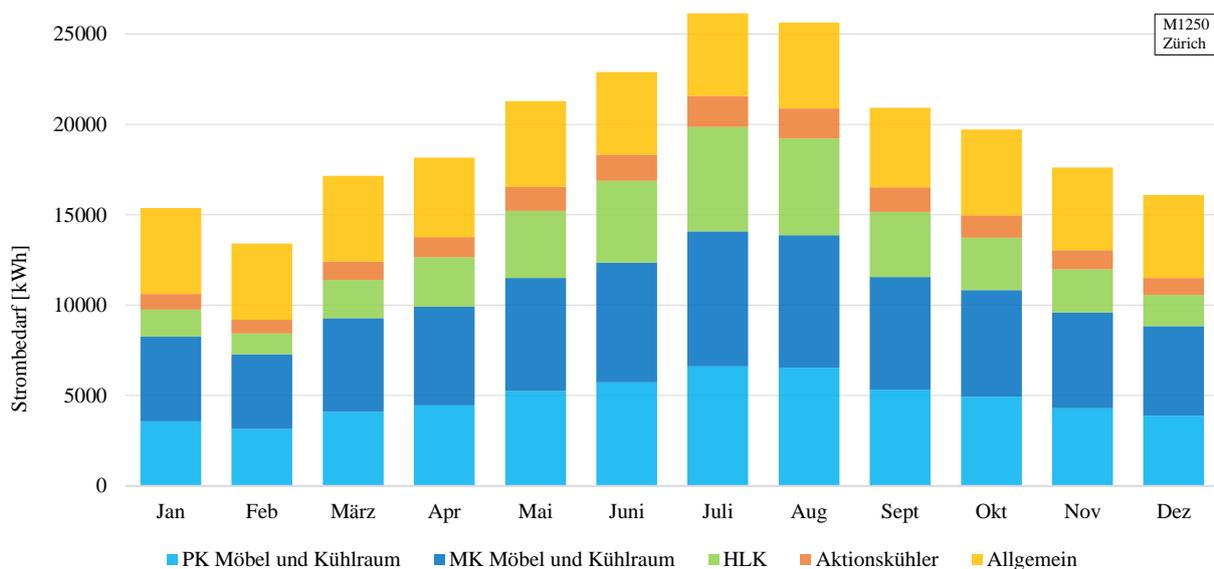


Abbildung 15: Monatliche Stromverbräuche für den Supermarkt M1250 in Zürich mit steckerfertigen Kühlmöbeln.

### 3.2.2 Variante 2: Steckerfertig hybrid – Supermarkt M1250 in Zürich

Im Gegensatz zur Variante 1 können die hybriden steckerfertigen Kühlmöbel die Wärme der Kühlmöbel an die Umgebung abgeben. Der Vorteil dessen zeigt sich in Abbildung 16: Die grünen Balken für den Bereich HLK sind in allen Monaten, ausser im Winter, deutlich kleiner als bei Variante 1. Währenddem die hybriden Kühlmöbel im Winter die Wärme meistens direkt in den Supermarkt geben, wird die Wärme der Kühlräume immer an die Umgebung abgegeben. Dies zeigt sich vor allem im Winter durch einen deutlich besseren COP als bei Variante 1.

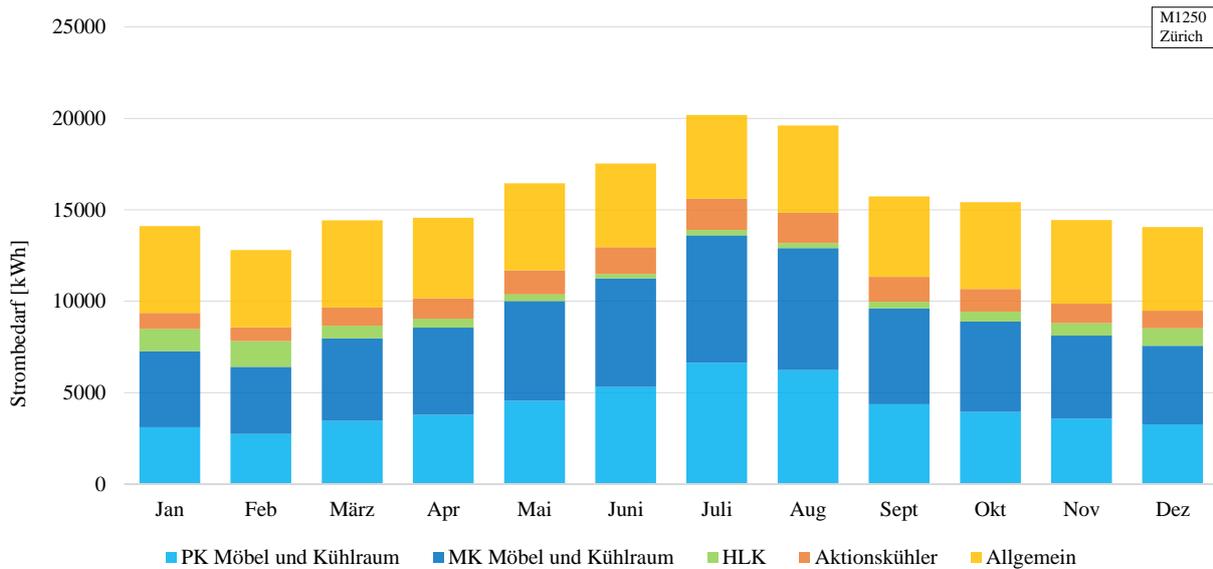


Abbildung 16: Monatliche Stromverbräuche für den Supermarkt M1250 in Zürich mit hybriden steckerfertigen Kühlmöbeln.

### 3.2.3 Variante 3: Zentralgekühlt – Supermarkt M1250 in Zürich

Wie bereits erwähnt ist im Gegensatz zu den Varianten 1 und 2 bei der zentralgekühlten Variante keine Unterteilung nach PK und MK möglich. Dafür wird der ganze Bereich Kühlmöbel und Kühlräume in Erzeugung (CO<sub>2</sub>-Kältemaschine und Gaskühler-Ventilatoren) und Verbraucher (Betrieb der Kühlmöbel) unterteilt.

Der monatliche Strombedarf der Variante 3 ist in den Sommermonaten Juni bis August erhöht. Die restlichen Monate jedoch ist der Strombedarf relativ konstant, im Gegensatz zu den steckerfertigen Varianten. Grundsätzlich liegt dies daran, dass die CO<sub>2</sub>-Booster Kältemaschine zwar einen deutlich höheren Verbrauch bei warmen Umgebungsbedingungen (ca. ab 25 °C) hat, jedoch bei kühleren Umgebungstemperaturen in den kalten Monaten vermehrt der Hochdruck anhebt (um die Wärmenutzung zu erhöhen) und somit keinen effizienteren Betrieb wie in den Übergangszeiten hat.

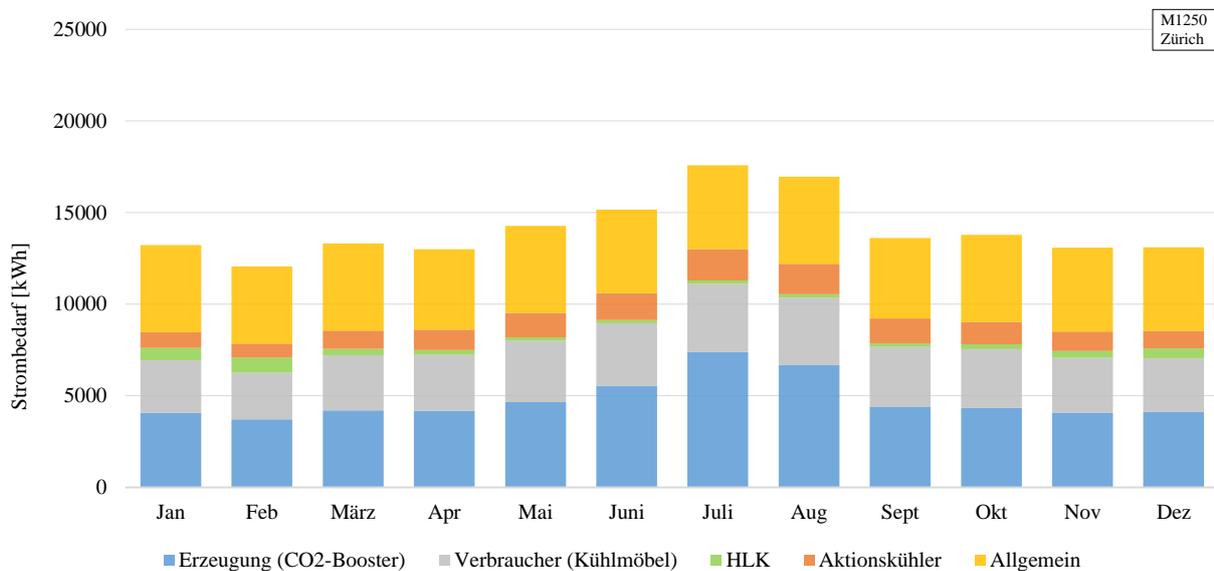


Abbildung 17: Monatliche Stromverbräuche für den Supermarkt M1250 in Zürich mit zentralgekühlten Kühlmöbeln.

Obwohl die zentrale CO<sub>2</sub>-Booster Kältemaschine einen grossen Teil der benötigten Heizenergie und die Kühlung für den Supermarkt bereitstellt, ist der elektrische Aufwand für das gesamte Kühlsystem geringer als bei den Varianten 1 und 2. Dies liegt hauptsächlich an der effizienteren Kälteproduktion der CO<sub>2</sub>-Kältemaschine im Vergleich zu den Propan-Verflüssigungssätzen in den steckerfertigen Kühlmöbel.

Ein weiterer Grund für den geringeren Strombedarf ist auch der kleinere Verbrauch des HLK-Bereichs. Die Klimakälte ist wie bereits erwähnt in der CO<sub>2</sub>-Kältemaschine integriert. Die Heizwärme wird, wenn möglich, ausschliesslich über den WT für Wärmenutzung bereitgestellt. Nur wenn diese Wärme nicht ausreicht, muss mit einer zusätzlichen Wärmepumpe unterstützt werden. Deshalb ist in den Wintermonaten Dezember bis Februar ein erhöhter Verbrauch im HLK-Bereich zu erkennen, da in dieser Zeit teilweise auch mit der zusätzlichen Wärmepumpe unterstützt werden muss.

### 3.3 Wärmebilanz für die Verkaufsfläche im Tagesverlauf

Für jeden Zeitschritt in der Simulation wird zuerst die Wärmebilanz aufgestellt, bevor auf dessen Grundlage die elektrischen Leistungen aller Komponenten berechnet werden können. Dies wird benötigt, um den Heiz- oder Kühlbedarf im Supermarkt zu kennen. Je nach dem muss zum Beispiel ein Teil der Abwärme in die Verkaufsfläche eingetragen werden oder der Hochdruck der CO<sub>2</sub>-Kältemaschine erhöht werden, abhängig vom Kältesystem. Dieser Einfluss ist eine wichtige Berücksichtigung in der ganzheitlichen Systembetrachtung. Somit wird nicht nur der Betrieb der Kühlmöbel, sondern der Betrieb des ganzen Supermarkts in Abhängigkeit der Kältetechnik-Systemlösung analysiert.

In den folgenden Unterkapiteln ist die Wärmebilanz für jede Variante an einem Beispieltag im Herbst (11. Oktober) dargestellt. Damit können die Unterschiede des Wärmebedarfs für den gleichen Supermarkt mit unterschiedlichen Systemlösungen aufgezeigt werden. Positive Werte bedeuten einen Wärmeeintrag in die Verkaufsfläche, negative Werte entsprechen einem Wärmeentzug. Der Wärmebedarf für die Wärmepumpe oder die Klimakälteanlage wird aus der stündlichen Wärmebilanz im 24h gleitenden Mittel berechnet. Dies, um die Nachtabkühlung zu berücksichtigen und Leistungspeaks zu vermeiden.

Weitere Wärmebilanzen im Tagesverlauf für je einen Wintertag und einen Sommertag sind im Anhang A.3 zu finden (nur für den Supermarkt M340 in Zürich). Die Abbildungen zeigen die Unterschiede in der Wärmebilanz des Supermarkts von Sommer und Winter, wie auch zu den folgenden Abbildungen in der Übergangszeit (Herbst).

### 3.3.1 Variante 1: Steckerfertig

Die Abbildung 18 zeigt einen typischen Tagesverlauf im Herbst für einen Supermarkt mit konventionellen steckerfertigen Kühlgeräten. Die stündliche Wärmebilanz (violette Linie) ist immer positiv, es gibt also mehr Wärmeeintrag als Wärmeentzug. Die Klimakälte muss entsprechend mit ca. 7 kW (rote Linie) die Verkaufsfläche kühlen. Die Umgebungstemperatur ist in der Übergangszeit tiefer als die Ladentemperatur, dementsprechend sind die Transmission und die Infiltration negativ. Alle anderen Komponenten tragen jedoch Wärme in den Supermarkt ein und führen dazu, dass die Variante 1 einen hohen Kühlbedarf hat.

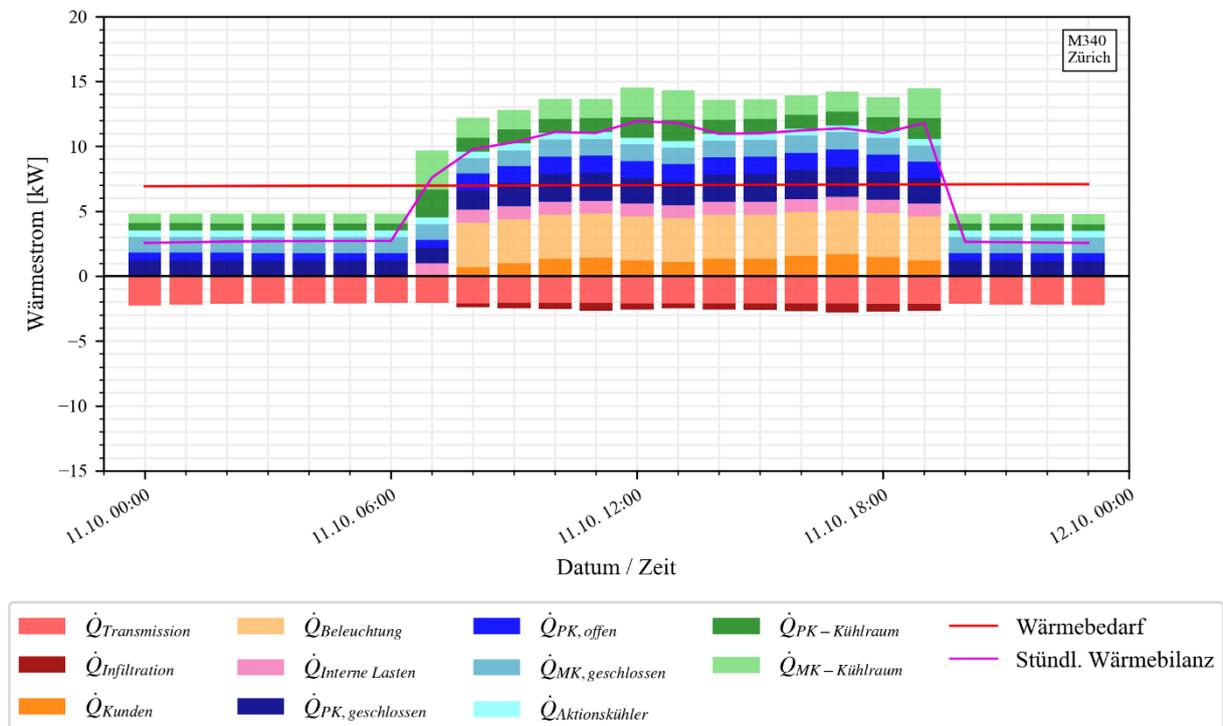


Abbildung 18: Stündliche Wärmebilanz der Variante 1 an einem Beispieltag im Herbst für den Supermarkt M340 in Zürich.

Aufgrund der Kunden, der Beleuchtung und der internen Lasten wird tagsüber mehr Wärme eingetragen als in der Nacht oder am Sonntag. Dazu kommt, dass auch die Kühlmöbel am Tag mehr Wärme in den Supermarkt eintragen, da sie durch die Türöffnungen oder den offenen Betrieb mehr Kälteleistung aufbringen müssen. Die verschiedenen blauen Balken sind die effektiven Wärmeeinträge der unterschiedlichen steckerfertigen Kühlmöbel, die grünen sind die Kühlaggregate der Kühlräume.

Bei den Wärmeeinträgen durch die Kühlmöbel gilt es zu beachten, dass der Komfort in Rahmen dieser Studie nicht berücksichtigt wurde. Dies ist vor allem an kalten Tagen, wo keine und nur sehr wenig Klimatisierung nötig ist, zu berücksichtigen. An diesen Tagen wird der Supermarkt gewissermassen von den Kühlmöbeln geheizt. Jedoch ist diese Wärme (v.a. beim Supermarkt M1250) nicht immer am richtigen Ort, sondern nur im Bereich der Kühlmöbel.

### 3.3.2 Variante 2: Steckerfertig hybrid

In der Variante 2 wird die Abwärme der Kühlräume immer an die Umgebung abgegeben, deshalb entfällt dieser Wärmeeintrag gegenüber zur Variante 1. Die Kühlmöbel entziehen nun in erster Linie dem Raum Wärme (mit Ausnahme der Aktionskühler). Bei Bedarf können die Kühlmöbel die Abwärme am Verflüssiger nun direkt in den Raum eintragen. Dies ist in der Abbildung 19 mit den grauen Balken dargestellt, welcher die Wärmeabgabe aller Kühlmöbel zusammenfasst. Ist potenziell mehr Abwärme vorhanden als benötigt wird, wird die überschüssige Wärme über den Sekundärkreis an die Umgebung abgegeben. Diese Situation ist am dargestellten Herbsttag in Abbildung 19 vorhanden. Vor allem tagsüber ist ersichtlich, dass die Kühlmöbel mehr Kälte in den Supermarkt eintragen als Abwärme. Das heisst, dass nur ein Teil der benötigten Abwärme benutzt wird.

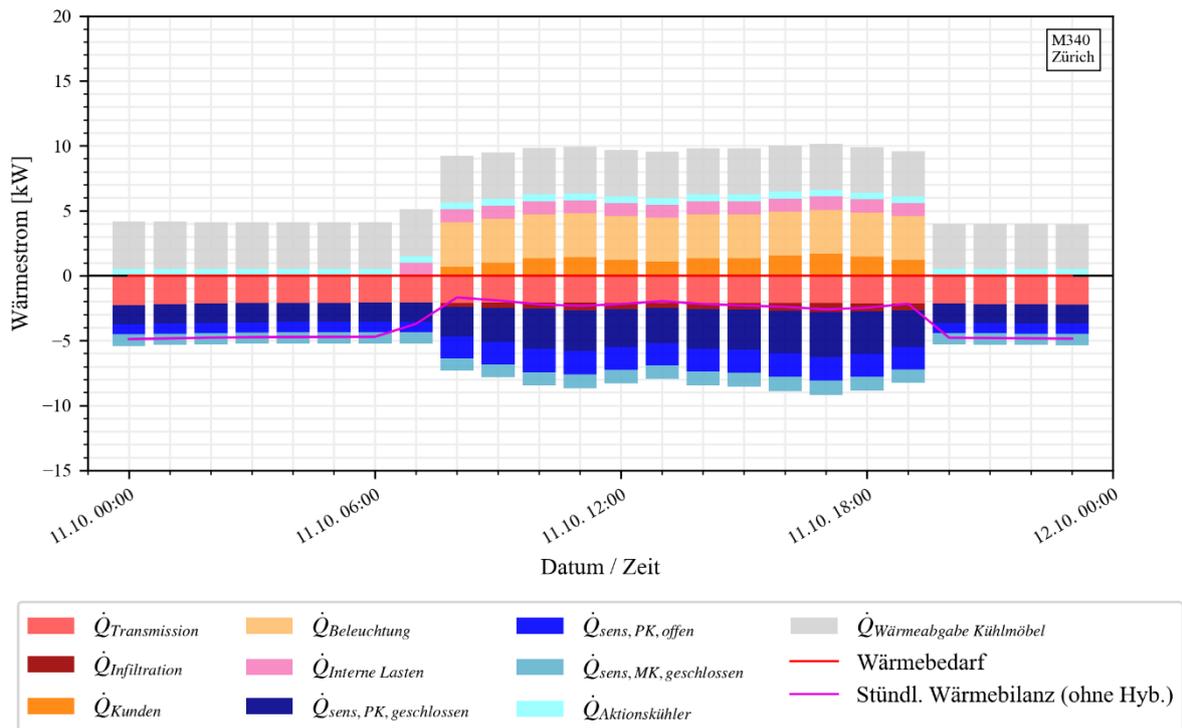


Abbildung 19: Stündliche Wärmebilanz der Variante 2 an einem Beispieltag im Herbst für den Supermarkt M340 in Zürich.

Damit die benötigte Wärmeabgabe der Kühlmöbel berechnet werden kann, wird die stündliche Wärmebilanz ohne die Wärmeabgabe der Kühlmöbel berechnet. Deshalb ist die violette Linie der stündlichen Wärmebilanz in Abbildung 19 immer negativ. Erst mit der Wärmeabgabe der Kühlmöbel wird die Wärmebilanz im Supermarkt ausgeglichen, sichtbar mit der roten Linie für den Wärmebedarf bei 0. Gerade in den Übergangszeiten kann somit die steckerfertig hybride Variante die Wärmebilanz im Laden oftmals ausgeglichen halten. Dementsprechend muss bei Variante 2 nur sehr wenig Wärme- oder Kühlenergie aufgewendet werden. Dies ist vor allem gegenüber der Variante 1 mit konventionellen steckerfertigen Kühlmöbel, welche immer einen Wärmeeintrag haben, ein entscheidender Vorteil.

Genau wie bei Variante 1 muss auch bei den hybriden steckerfertigen Kühlmöbel beachtet werden, dass der Komfort in der Simulation nicht berücksichtigt wurde. Die Wärmeabgabe der Kühlmöbel ist nur am Ort der Kühlmöbel. Vor allem beim Supermarkt M1250 kann dadurch noch nicht sichergestellt werden, ob genügend Wärme auch an anderen Orten im Supermarkt (z.B. bei der Kasse) vorhanden ist.

### 3.3.3 Variante 3: Zentralgekühlt

Die Wärmebilanz der Variante 3 sieht der Wärmebilanz der Variante 2 ähnlich. Jedoch gibt es bei der zentralgekühlten Variante keine Wärmeabgabe der Kühlmöbel. Dementsprechend ist die Wärmebilanz, so wie am Beispieltag in Abbildung 20, meistens negativ. In der Nacht und am Sonntag sind, wenn die Umgebungstemperatur unter der Ladentemperatur liegt, die Aktionskühler die einzigen Wärmeeinträge. Es muss also geheizt werden, gemäss der roten Linie des Wärmebedarfs mit ca. 2.5 – 3 kW an diesem Tag. Meistens kann die benötigte Wärme aber direkt über den WT für Wärmenutzung der CO<sub>2</sub>-Kältemaschine bereitgestellt werden. Die zusätzliche Wärmepumpe wird nur an kalten Tagen in den Wintermonaten benötigt.

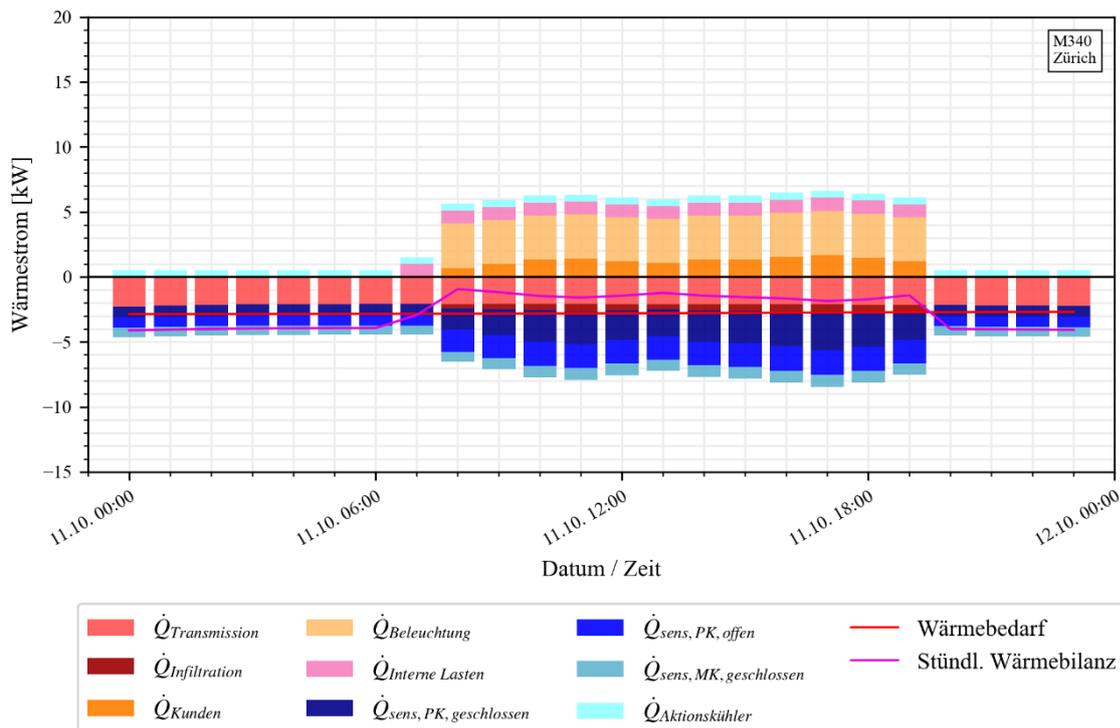


Abbildung 20: Stündliche Wärmebilanz der Variante 3 an einem Beispieltag im Herbst für den Supermarkt M340 in Zürich.

Die Wärmebilanz in der Variante 3 sieht zwar nicht so ausgeglichen aus wie die Wärmebilanz der Variante 2. Da aber für die benötigte Heizenergie meistens nur die Abwärme der CO<sub>2</sub>-Kältemaschine benötigt wird, ist die zentralgekühlte Systemlösung sehr effizient.

### 3.4 Plausibilisierung

Um die Simulationen zu überprüfen, wurde ein vergleichbarer Supermarkt zur Plausibilisierung ausgewählt. Zentrale Aspekte der Simulationen sind die Modellierung der Kühlmöbel und die Modellierung der CO<sub>2</sub>-Kältemaschine. Diese beiden Aspekte können mit einem zentralgekühlten Supermarkt, der dem Aufbau der Variante 3 entspricht, verglichen werden und dienen als Plausibilisierung für einen Supermarkt.

Als Vergleich zur Plausibilisierung werden die Daten des CO<sub>2</sub>-Kältreports der Migros Oberglatt [7] für den Zeitraum vom 1.10.2022 bis 1.10.2023 zur Verfügung gestellt. Die Migros Oberglatt hat eine Verkaufsfläche von 1295 m<sup>2</sup> und ist somit nur etwas grösser als der Supermarkt M1250 in der Simulation (1250 m<sup>2</sup>). Aus Sicht der Wetterverhältnisse liegt Oberglatt neben Zürich. In der Simulation werden jedoch die Wetterdaten des Jahres 2015 verwendet, während die Echtdaten von Oktober 2022 bis September 2023 aufgenommen wurden. Als Kältesystem wird, wie in der Simulation, eine zentrale CO<sub>2</sub>-Booster Kälteanlage mit Abwärmenutzung verwendet. Eine Vergleichsübersicht ist in der Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Vergleichsübersicht der Eigenschaften der Migros Oberglatt und der Simulation des Supermarkt M1250 in Zürich.

Eigenschaften	Migros Oberglatt	Simulation M1250 in Zürich
Verkaufsfläche	1295 m <sup>2</sup>	1250 m <sup>2</sup>
Zeitraum der Datenerfassung / Wetterdaten	01.10.2022 – 01.10.2023	01.01.2015 – 31.12.2015
Kältesystem	Zentrale CO <sub>2</sub> -Booster Kälteanlage mit Wärmenutzung	Zentrale CO <sub>2</sub> -Booster Kälteanlage mit Wärmenutzung

Es werden drei Grössen verglichen: Der Stromverbrauch der CO<sub>2</sub>-Booster Kälteanlage und die Stromverbräuche aller PK-Stellen und aller MK-Stellen (Beleuchtung, Ventilation, Heizleitungen). Als Vergleichswert dienen die Daten der monatlichen Stromverbräuche, wobei die Anzahl der installierten Laufmeter nicht bekannt sind. Da die Datenerfassung der Migros Oberglatt von Anfang Oktober bis Ende September zur Plausibilisierung zur Verfügung steht, wird auch die Zeitachse in der Abbildung 21 von Oktober bis September angezeigt.

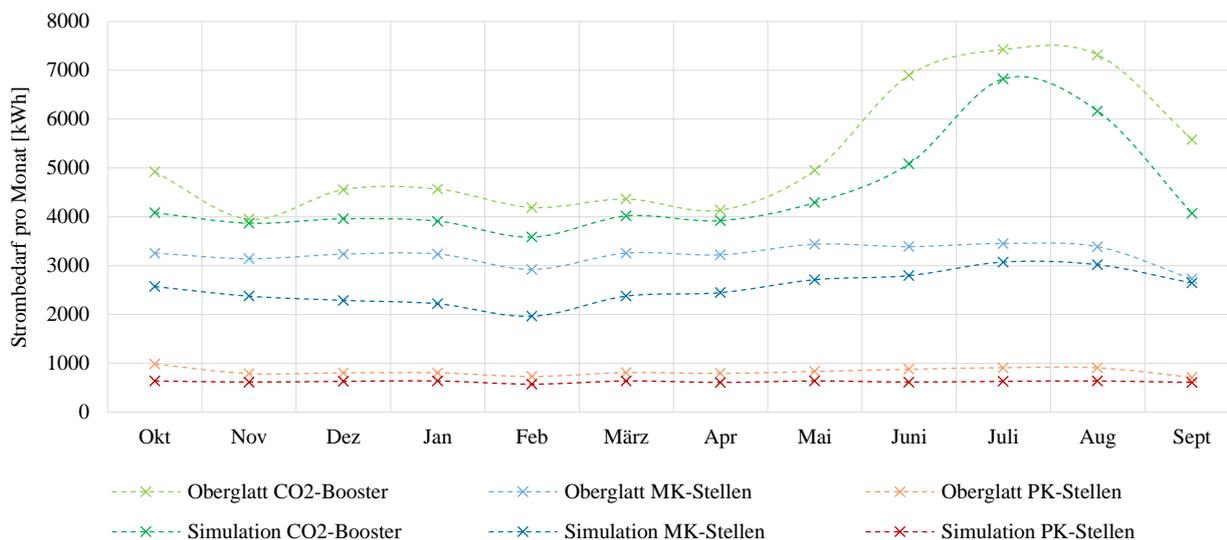


Abbildung 21: Vergleich des Stromverbrauchs pro Monat (von Oktober bis September) der CO<sub>2</sub>-Booster Kältemaschine und aller PK- und MK-Stellen, zwischen der Migros in Oberglatt und der Simulation des Supermarkt M1250 in Zürich.

Der Vergleich zeigt, dass die Simulation bei allen Komponenten etwas weniger Stromverbrauch hat als die Echt Daten von der Migros Oberglatt, die Simulation damit aber plausibilisiert werden kann. Zum einen gilt es zu berücksichtigen, dass die Migros Oberglatt etwas grösser ist als der Supermarkt M1250. Würden etwas mehr PK- und/oder MK-Stellen hinzugefügt werden, würde auch der Verbrauch der CO<sub>2</sub>-Kältemaschine ansteigen. Über den ganzen Zeitraum benötigen die PK-Stellen 24.9% weniger Strom und die MK-Stellen 21.1% weniger Strom als die der Migros Oberglatt. Entsprechend ist aber auch der Strombedarf CO<sub>2</sub>-Kältemaschine in der Simulation um 14.4% geringer als die Vergleichsmaschine.

Eine weitere wichtige Plausibilisierung ist das Verhalten der CO<sub>2</sub>-Kältemaschine. Der Verlauf des monatlichen Strombedarfs der Simulation ist ähnlich wie jener der Migros Oberglatt. Eine wichtige Charakterisierung ist der gleichmässige Bedarf über die Monate, mit Ausnahme der Sommerzeit, in welcher der Strombedarf in beiden Kurven deutliche zunimmt. Während der restlichen Monate ist der Strombedarf auf einem gleichmässigen Niveau, obwohl die Einsatzbedingungen für die CO<sub>2</sub>-Kältemaschine sehr unterschiedlich sein können. So herrschen im Winter im Gegensatz zur Übergangszeit tiefere Umgebungstemperaturen am Gaskühler, während gleichzeitig weniger Kältebedarf von den Kühlmöbel bestehen, jedoch mehr Wärmebedarf der Heizung.

## 4. Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse wird aus zwei Gründen durchgeführt. Einerseits sollen damit die Input-Parameter für die Simulation detektiert werden, welche einen grossen Einfluss auf das Endergebnis haben oder dieses sogar in der Hauptaussage verändern können. Des Weiteren können durch die Sensitivitätsanalyse Erkenntnisse darüber gewonnen werden, welche Komponenten oder welche Randbedingungen einen grossen Einfluss auf die Effizienz des Kältesystems haben und in welchem Bereich ein grosses Energiesparpotential besteht.

### 4.1 Resultate

Die Sensitivitätsanalyse ist in sechs Bereiche unterteilt. In jedem Bereich wurden zwei oder mehr Randbedingungen resp. Input-Parameter, welche einen Zusammenhang haben, in ihrem Input-Wert verändert. Bei einigen Bereichen ist der Einfluss durch die Veränderung der Input-Parameter für alle Varianten identisch, z.B. durch die Veränderung der Transmission und der Infiltration. Bei zwei Bereichen sind die Varianten unterschiedlich stark von der Veränderung betroffen, aufgrund des Kältesystems. So z.B. durch die Variation der Temperaturdifferenzen  $\Delta T$  im Kältetechnikbereich, welche die steckerfertigen Varianten deutlich mehr beeinflusst als die zentralgekühlte Variante.

Die Simulationen mit den veränderten Parametern wurden für den Supermarkt M340 und den Supermarkt M1250 an allen Standorten für jede Variante durchgeführt. Das heisst, für jede Veränderung bei einer Gruppe von Inputparametern können für sechs Supermärkte die Varianten verglichen werden (2 Grössen, 3 Standorte). In jeder Untersuchung war die Variante 3 am effizientesten, während die Variante 2 ebenfalls immer effizienter war als die Variante 1. Das Endresultat aus dem Kapitel 3 ist also mit der durchgeführten Berechnung robust und reagiert wenig sensitiv auf veränderte Inputs resp. Rahmenbedingungen.

Wie stark sich das Resultat bei einer Variierung der Inputs verändert, wird in Tabelle 6 mit den Spalten für die durchschnittliche Änderung des Strombedarfs aller vom Kühlsystem abhängigen Komponenten angegeben. Damit ist der totale Strombedarf des Supermarkts gemeint, abzüglich der Strombedarfs für die Beleuchtung, der internen Lasten und des Lüftung-Ventilators. Der Wert entspricht der durchschnittlichen Änderung aller sechs Supermärkte je Variante. Bei jeder Berechnung wurden die Inputs einmal erhöht und einmal um den gleichen Wert verringert.

Tabelle 6: Resultate der Sensitivitätsanalyse.

Untersuchter Bereich	Einfluss für alle Varianten gleich	Untersuchte Grösse	Änderung des Input-Parameters	Variante	∅ Änderung	∅ Änderung	Rangliste nach bester Effizienz
					P <sub>el</sub> Kühlsystem bei Δ +	P <sub>el</sub> Kühlsystem bei Δ -	
Allgemeine Komponenten	Ja	Interne Lasten	+/- 50 %	Var. 1	+ 1.9 %	- 1.8 %	① Var. 3 ② Var. 2 ③ Var. 1
				Var. 2	- 0.2 %	+ 0.6 %	
		Beleuchtung	+/- 30 %	Var. 3	- 1.5 %	+ 1.8 %	
Lüftung	Ja	Effizienz WRG	-/+ 0.20	Var. 1	+ 0.2 %	- 0.1 %	① Var. 3 ② Var. 2 ③ Var. 1
				Var. 2	+ 1.0 %	- 0.6 %	
		Frischluft/Person	+/- 50 %	Var. 3	+ 0.6 %	- 0.3 %	
Transmission und Infiltration	Ja	Transmission	+/- 30 %	Var. 1	- 0.4 %	+ 1.9 %	① Var. 3 ② Var. 2 ③ Var. 1
				Var. 2	+ 4.0 %	- 2.8 %	
		Infiltration	+/- 30 %	Var. 3	+ 5.1 %	- 4.5 %	
Grösse der Kühlräume (Kälteleistung)	Ja	PK-Kühlraum	+/- 50 %	Var. 1	+ 8.6 %	- 8.2 %	① Var. 3 ② Var. 2 ③ Var. 1
				Var. 2	+ 7.8 %	- 7.8 %	
		MK-Kühlraum	+/- 50 %	Var. 3	+ 5.2 %	- 5.1 %	
ETV (Pumpen und Ventilatoren)	Nein	RK-Ventilator	+/- 30 %	Var. 1	- 1.5 %	+ 2.9 %	① Var. 3 ② Var. 2 ③ Var. 1
		GK-Ventilator	+/- 30 %	Var. 2	- 1.8 %	+ 3.4 %	
		Warmwasser-Pumpe	+/- 30 %	Var. 3	- 0.9 %	+ 1.8 %	
		Kaltwasser-Pumpe	+/- 30 %	Var. 1	+ 9.3 %	- 7.9 %	
ΔT Kältetechnik (Kreislauf-Effizienz)	Nein	ΔT Steckerfertig	+/- 30 %	Var. 2	+ 8.1 %	- 8.1 %	① Var. 3 ② Var. 2 ③ Var. 1
		ΔT Rückkühler	+/- 30 %	Var. 3	+ 1.0 %	- 1.0 %	
		ΔT Sekundärkreis	+/- 50 %	Var. 1	+ 9.3 %	- 7.9 %	

## 4.2 Weiterführende Erkenntnisse

Anhand der Sensitivitätsanalyse lassen sich einige Erkenntnisse über Unterschiede der Varianten und mögliche Energiesparpotentiale für Supermärkte ableiten:

- Zentralgekühlte Supermärkte profitieren mehr von guter Gebäudeisolation

Beim Bereich der Transmission und Infiltration ist die Transmission der ausschlaggebende Wert. Die Variante 3 reagiert sensibler auf eine Veränderung der Transmission. Um einen effizienten Supermarkt zu bauen, sollte wenn möglich eine zentrale Kälteversorgung mit einer guten Gebäudeisolation geplant werden. Je besser die Isolation, desto stärker der Vorteil für die Variante 3.

- Effiziente Kühlmöbel wählen bei steckerfertigen Systemen und Verdampfungstemperatur anpassen

Bei den steckerfertigen Varianten hat die Veränderung der angenommenen Temperaturdifferenzen an Verflüssiger und Rückkühler einen grossen Einfluss auf den Stromverbrauch. Dies liegt in diesem Fall nur an der Veränderung der Verflüssigungstemperatur der Kühlgeräte und der Kältemaschine. Die Variationen betragen je nach  $\Delta T$  2 bis 3 Kelvin. Oftmals kann bei steckerfertigen Kühlmöbeln auch die Verdampfungstemperatur individuell, je nach Produkt oder Kühlmöbeltyp, eingestellt werden. Hier kann mit der optimalen Verdampfungstemperatur zusätzlich der Stromverbrauch erheblich reduziert werden.

- Dimensionierung der Kühlräume beachten

Die Kühlräume sind in allen Varianten ein erheblicher Verbraucher. Das Sparpotential für die Kühlräume liegt in einer angemessenen Dimensionierung und einer effizienten Be- und Entladung der Produkte.

- Abwärme der steckerfertigen Kühlraum-Aggregate abführen

Bei Variante 1 muss die Abwärme der Aggregate für die Kühlräume mit der Klimakälte abgetragen werden. Mit einer Split-Anlage kann die Wärme direkt an die Aussenluft abgegeben werden, wodurch sich der Kühlbedarf für die Klimatisierung erheblich senken wird.

## 5. Vergleich der Kühlmöbel mit der Energieetikette

Neben der ganzheitlichen Analyse über die unterschiedlichen Kältesystemlösungen für einen Supermarkt wurde auch der Betrieb der Kühlmöbel mit den Angaben gemäss der Energieetikette verglichen. Die Energieetikette ist für einen Planer oder den Bauverantwortlichen eine wichtige Angabe für die Wahl der Kühlmöbel resp. die Wahl des Kältesystems im Supermarkt. Die Energieetikette, zu sehen in Abbildung 22, beinhaltet unter anderem die Angaben zur Energieeffizienz-Klasse (A - G) sowie einer Angabe des jährlichen Energiebedarfs (in kWh/annum). Der jährliche Energiebedarf des Kühlmöbels wird bestimmt, indem der TEC mit 365 multipliziert wird [1]. Dieser bildet im Verhältnis zu einem Standardenergieverbrauch, ebenfalls definiert in der EU-Verordnung 2019/2018, den EEI [1].

Der Vergleich der Energieetikette wird in den folgenden Unterkapiteln zuerst für den TEC, resp. für den jährlichen Verbrauch durchgeführt, und anschliessend bezüglich des EEI erweitert und hinsichtlich der unterschiedlichen Kühlmöbel-Varianten analysiert.

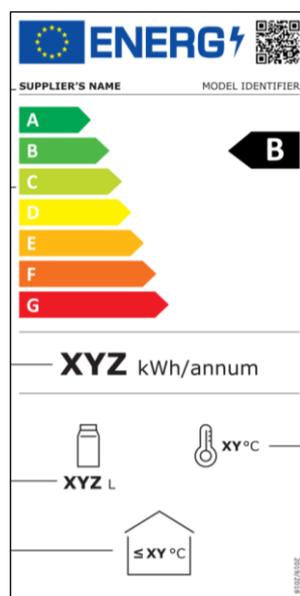


Abbildung 22: Energieetikette (Vorlage) für ein Kühlmöbel, gemäss EU-Verordnung 2019/2018 [1].

### 5.1 TEC: Vergleich Datenblatt vs. Simulation

Die jährlichen Verbrauchsangaben gemäss Energieetikette wurden mit dem Stromverbrauch pro Kühlmöbel aus der Simulation des Supermarkt M340 in Zürich verglichen. Dabei wurde der TEC gemäss Datenblatt mit dem Mittelwert des jährlichen Strombedarfs für 24 Stunden verglichen. Wurden die Möbel in der Simulation aufgrund des Nettovolumens skaliert, wurde diese Skalierung für den folgenden Vergleich wieder rückgängig gemacht.

Die Prüfbedingungen zur Bestimmung des TEC berücksichtigen nur den Betrieb des Kühlmöbels, zu den Umgebungsbedingungen von 25 °C und 60% rel. Luftfeuchtigkeit [1]. Diese Bedingungen werden in der Prüfkammer konstant gehalten. Nicht berücksichtigt wird dabei der Einfluss des Kühlmöbels auf die Umgebung, durch Wärme- oder Kälteeintrag, sowie eine Nutzung der Abwärme. Bei den hybriden und zentral-gekühlten Kühlmöbeln wird die Abwärme aber teilweise genutzt, was eine Veränderung der Effizienz im Betrieb zur Folge haben kann. Hybride Kühlmöbel könnten zum Beispiel an kalten Tagen einen besseren COP haben, wenn sie die Wärme an die kalte Aussenluft abgeben. Zum Heizen wird jedoch die Abwärme direkt in den Raum getragen, was eine höhere Verflüssigungstemperatur zur Folge hat.

Bei zentralgekühlten Möbeln wird der REC von der Simulation aus der anteilmässigen Verdichterleistung der CO<sub>2</sub>-Kältemaschine berechnet. Wird zur besseren Abwärmenutzung der Hochdruck der Kältemaschine angehoben, erhöht sich entsprechend der Verbrauch der Verdichter. Deshalb muss beim Vergleich mit dem TEC gemäss Prüfnorm folgenden Unterscheidung gemacht werden:

- TEC simuliert nach realem Supermarktbetrieb, inkl. Wärmenutzung (Tabelle 7).
- TEC simuliert ohne Wärmenutzung, entsprechend Prüfnorm (Tabelle 8).

Tabelle 7: Vergleich des TEC gemäss Datenblatt vs. durchschnittlicher TEC gemäss der Jahressimulation.

	Steckerfertig			Steckerfertig hybrid			Zentralgekühlt		
	TEC	TEC	Differenz	TEC	TEC	Differenz	TEC	TEC	Differenz
	Datenblatt [kWh/24h]	Simulation [kWh/24h]		Datenblatt [kWh/24h]	Simulation [kWh/24h]		Datenblatt [kWh/24h]	Simulation [kWh/24h]	
<b>PK, geschlossen</b>	8.18	4.48	- 45.2	10.65	5.35	- 49.8	6.75	3.79	- 43.8
<b>PK, offen</b>	19.16	8.73	- 54.4	21.63	8.73	- 59.7	13.91	7.39	- 46.8
<b>MK, geschlossen</b>	34.36	21.20	- 38.3	34.67	17.74	- 48.8	39.26	27.53	- 29.9
<b>∅ gew. nach Laufmeter</b>			- 44.8			- 50.7			- 41.2

Tabelle 8: Vergleich des TEC gemäss Datenblatt vs. durchschnittlicher TEC gemäss der Jahressimulation, ohne eine Wärmenutzung der Kühlmöbel.

	Steckerfertig			Steckerfertig hybrid			Zentralgekühlt		
	TEC	TEC	Differenz	TEC	TEC	Differenz	TEC	TEC	Differenz
	Datenblatt [kWh/24h]	Simulation [kWh/24h]		Datenblatt [kWh/24h]	Simulation [kWh/24h]		Datenblatt [kWh/24h]	Simulation [kWh/24h]	
<b>PK, geschlossen</b>	8.18	4.48	- 45.2	10.65	5.12	- 52.0	6.75	3.04	- 54.9
<b>PK, offen</b>	19.16	8.73	- 54.4	21.63	8.31	- 61.6	13.91	5.51	- 60.4
<b>MK, geschlossen</b>	34.36	21.20	- 38.3	34.67	17.34	- 50.0	39.26	24.32	- 38.1
<b>∅ gew. nach Laufmeter</b>			- 44.8			- 52.7			- 52.0

Die Tabellen 7 und 8 zeigen, dass in der Jahressimulation alle Kühlmöbel einen erheblich tieferen Verbrauch haben, als auf der Energieetikette angegeben wird. Dies liegt hauptsächlich daran, dass die Simulation von tieferen Raumtemperaturen und weniger Luftfeuchtigkeit ausgeht. Zudem wird in der jährlichen Verbrauchsangabe auf der Energieetikette mit täglichem Betrieb gerechnet, wobei in der Simulation der Sonntag jeweils geschlossen ist.

Des Weiteren gilt es die grösseren Unterschiede bei den steckerfertig hybriden und den zentralgekühlten Möbeln bei Tabelle 8 im Vergleich zu Tabelle 7 zu beachten. Bei den steckerfertig hybriden steigt die durchschnittliche Einsparung, gewichtet nach Laufmeter, von 50.7% auf 52.7% an. Bei der zentralgekühlten Variante erhöht sich Einsparung sogar von 41.2% auf 52.0%, ohne Wärmenutzung. Die Tabelle 8 zeigt, dass Kühlmöbel, welche in ihrem Betrieb von der Aussentemperatur abhängig sind, eine grössere Differenz zu den Prüfbedingungen haben als steckerfertige Kühlmöbel. Dies liegt daran, dass über den jährlichen Verlauf die Effizienz des Kühlmöbels (resp. der Erzeugung) variiert, wenn das Kühlmöbel von der Aussentemperatur abhängig ist. Des Weiteren wird gemäss SN EN ISO 23953-2 [2] bei zentralgekühlten Möbeln der REC über einen festgelegten COP (abhängig von der Verdampfungstemperatur) bestimmt, welcher dementsprechend ebenfalls keine saisonalen Unterschiede bezüglich der Aussentemperatur berücksichtigt.

## 5.2 EEI Bewertung der verwendeten Kühlmöbel

In der Tabelle 2 sind die Kühlmöbel der verwendeten Simulationen mit den zugehörigen EEI-Werten aufgelistet. Diese sind für die verschiedenen Kühlmöbelarten zwar nicht identisch, aber ähnlich. So hat zum Beispiel beim Supermarkt M1250, wo nur geschlossene Kühlmöbel verwendet werden, jeweils das Kühlmöbel der Variante 1 (Steckerfertig) den besten EEI. Trotzdem hat auch in der Simulation des Supermarkt M1250 die Variante 1 einen deutlich höheren Verbrauch als die Variante 2 und 3. Dies kann zum einen auf die nicht-saisonale Bewertung des TEC bei flüssigkeitsgekühlten und zentralgekühlten Möbeln, wie oben beschrieben, zurückgeführt werden. Zum anderen wird der EEI aber auch von einem Plug-in Faktor und von der Warenpräsentationsfläche beeinflusst, wie in der folgenden Gleichung 1<sup>1</sup> zu sehen ist.

$$EEI = \frac{365 \cdot TEC}{365 \cdot P \cdot (M + N \cdot TDA) \cdot C} \quad (1)^1$$

TEC	El. Energiebedarf pro Tag	[kWh/24h]
P	Plug-in Faktor	- für steckerfertige Kühlmöbel: 1.10 - für alle anderen Kühlmöbel: 1.00
TDA	Warenpräsentationsfläche	[m <sup>2</sup> ]
M, N, C	Standardisierungs-Koeffizienten	- Berücksichtigen die Kategorie des Kühlmöbels und die Temperaturbedingungen.

Der Plug-in Faktor verbessert den EEI der steckerfertigen Kühlmöbel jeweils um 10% [1] (je kleiner der EEI, desto besser die Energieeffizienz). Dies ist einer der Gründe, weshalb der EEI von steckerfertigen Kühlmöbeln (auch flüssigkeitsgekühlte) nicht mit zentralgekühlten Möbeln verglichen werden darf.

Einen weiteren Einfluss auf den EEI hat die Warenpräsentationsfläche (TDA). Bei einem (angenommen) konstanten Strombedarf des Kühlmöbels wird der EEI besser, umso grösser die Warenpräsentationsfläche ist. Dies führt dazu, dass z.B. die Seitenwände verglast werden, um die Präsentationsfläche zu vergrössern. Dabei steigt zwar der Strombedarf des Kühlmöbels etwas an (aufgrund der schlechteren Isolation und des Wärmeeintrags durch Strahlung), jedoch wird der EEI trotzdem besser, da die grössere Warenpräsentationsfläche den Mehrverbrauch des Stroms in der Berechnung des EEI überkompensieren kann. Bei der Analyse der Warenpräsentationsfläche der Kühlmöbel in dieser Untersuchung ist festgestellt worden, dass es diesbezüglich bei den geschlossenen, vertikalen PK-Möbeln einen Unterschied vom Kühlmöbel der Variante 1 (JBG2 Medium) zu jenen der Variante 2 und 3 (beide JBG2 Gerlach 2.0) gibt. Während bei den JBG2 Gerlach 2.0 Kühlmöbeln die total display area nur ca. 1.4% grösser ist als die display opening area, beträgt beim JBG2 Medium jener Unterschied 44.2%. Mit der Vergrösserung der Warenpräsentationsfläche kann also der EEI verbessert werden, ohne dass die Energieeffizienz des Kühlmöbels gesteigert wird.

<sup>1</sup> Die Gleichung 1 ist entsprechend der Verordnung 2019/2018 [1] so beschrieben, dass sie nur für allgemeine Kühlmöbel mit Direktverkaufsfunktion gilt, jedoch nicht für Getränke Kühler, Speiseeis-Gefriermaschinen und gekühlte Verkaufsautomaten.

Die Prüfbedingungen des TEC, mit der daraus folgenden jährlichen Verbrauchsangabe (ohne saisonale Berücksichtigung), der Plug-in Faktor und der Einfluss der Warenpräsentationsfläche führen dazu, dass sich der EEI und die Angabe der Energieeffizienz-Klasse auf der Energieetikette nicht für den Vergleich von steckerfertigen, steckerfertig hybriden und zentralgekühlten Kühlmöbel eignet. Des Weiteren werden Aspekte, wie zum Beispiel die Abwärmenutzung resp. die Wärmeabgabe, nicht im EEI berücksichtigt. Dies ist nachvollziehbar, sollte jedoch in der ganzheitlichen Betrachtung des Supermarkts immer berücksichtigt werden. Die unterschiedlichen Einflüsse und Aspekte, welche je nach Kühlmöbel-Variante berücksichtigt werden oder nicht, sind in Tabelle 9 zur Übersicht aufgeführt.

Tabelle 9: Berücksichtigung betriebsrelevanter Einflüsse im EEI, für unterschiedliche Kühlmöbel-Lösungen.

<b>Einfluss berücksichtigt im EEI</b>	<b>Steckerfertig</b>	<b>Steckerfertig hybrid</b>	<b>Zentralgekühlt</b>
Saisonale Unterschiede in den räumlichen Umgebungsbedingungen	Nein	Nein	Nein
Saisonale Unterschiede bei den Aussentemperaturen	(Ja) <sup>2</sup>	Nein	Nein
Bedarfsgerechte Wärmenutzung und Wärmeabgabe	-	Nein	Nein
Plug-in Faktor	Ja	Ja	Nein

<sup>2</sup> Die Aussentemperatur hat keinen Einfluss auf den Betrieb eines steckerfertigen Kühlmöbels.

## 6. Wirtschaftlichkeitsanalyse

### 6.1 Berechnungsgrundlage

In diesem Kapitel werden die Kosten für die unterschiedlichen Kühlsysteme abgeschätzt. Um die unterschiedlichen Kühlsysteme wirtschaftlich zu bewerten, werden die jeweiligen Jahreskosten verglichen. Die Jahreskosten werden aus Kapitalkosten, Unterhaltskosten und Betriebskosten gemäss Gleichung 2 berechnet:

$$\text{Jahreskosten} = \text{Kapitalkosten} + \text{Instandhaltungskosten} + \text{Betriebskosten} \quad (2)$$

Der Betrachtungshorizont für die Berechnung der Kosten beträgt 15 Jahre.

#### 6.1.1 Kapitalkosten

Die Kapitalkosten (pro Jahr) werden sowohl für die Kälteanlage ( $X_1$ ) als auch für die Kühlmöbel ( $X_2$ ) anhand der Investitionskosten  $C_0$  und einem Annuitätsfaktor  $ANF_{n,i}$  nach Gleichung 3 berechnet:

$$\text{Kapitalkosten} = C_{0,1} \cdot ANF_{n,i,1} + C_{0,2} \cdot ANF_{n,i,2} \quad (3)$$

Der Annuitätsfaktor berücksichtigt den Zinssatz  $i$  und die Lebensdauer  $n$  der Kälteanlage resp. der Kühlmöbel:

$$ANF_{n,i} = \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \quad (4)$$

mit

Zinssatz  $i = 3.0 \%$ .

Die Investitionskosten und die durchschnittliche Lebensdauer für die Kälteanlagen und die Kühlmöbel wurden von den beteiligten Experten abgeschätzt und sind in Tabelle 10 aufgelistet. In den Investitionskosten für die Kälteanlage sind auch die zum Kühlsystem erforderlichen Komponenten wie z.B. Pumpen, Rückkühler, Kühlräume, Kälteleitungen oder CO<sub>2</sub>-Überwachungen enthalten. Ebenfalls in den Investitionskosten der Kälteanlage enthalten sind die dazugehörigen Dienstleistungen wie z.B. die Inbetriebnahme oder Dokumentationen.

Tabelle 10: Investitionskosten und Lebensdauer der Kälteanlage und der Kühlmöbel der untersuchten Varianten.

	Variante 1 Steckerfertig	Variante 2 Steckerfertig hybrid	Variante 3 Zentralgekühlt
<b>Supermarkt M340</b>	Investitionskosten Kälteanlage $C_{0,1}$	CHF 167'000.-	CHF 232'000.-
	Lebensdauer Kälteanlage $n_1$	15 Jahre	15 Jahre
	Investitionskosten Kühlmöbel $C_{0,2}$	CHF 86'000.-	CHF 95'000.-
	Lebensdauer Kühlmöbel $n_2$	7 Jahre	12 Jahre
<b>Supermarkt M1250</b>	Investitionskosten Kälteanlage $C_{0,1}$	CHF 298'000.-	CHF 467'000.-
	Lebensdauer Kälteanlage $n_1$	15 Jahre	15 Jahre
	Investitionskosten Kühlmöbel $C_{0,2}$	CHF 265'000.-	CHF 221'000.-
	Lebensdauer Kühlmöbel $n_2$	7 Jahre	12 Jahre

### 6.1.2 Instandhaltungskosten

Die jährlichen Instandhaltungskosten werden anhand des Entwurfs der prSIA 384/4 berechnet [8]. Anhand der Berechnungsmethode werden die Instandhaltungskosten nach Gleichung 5 berechnet:

$$\text{Instandhaltungskosten} = BC + (IC - 200'000) \cdot f \quad (5)$$

mit

$$\text{Basiskosten } BC \begin{cases} 8'000 \text{ bei Propan} \\ 7'000 \text{ bei } CO_2 \end{cases}$$

Investitionskosten  $IC$

$$\text{Faktor } f \begin{cases} 0.025 \text{ bei Propan} \\ 0.020 \text{ bei } CO_2 \end{cases}$$

gemäss des Entwurfs der prSIA 384/4 [8].

### 6.1.3 Betriebskosten

Die Betriebskosten werden durch die Kosten für den Stromverbrauch pro Jahr bestimmt:

$$\text{Betriebskosten} = \text{Strombedarf} \cdot \text{Strompreis} \quad (6)$$

Der Stromverbrauch wird entsprechend den Resultaten aus Kapitel 3 bestimmt. Beim Strompreis gibt es zwei Szenarien, welche betrachtet werden können:

- Tiefer Strompreis: 20 Rp./kWh
- Hoher Strompreis: 35 Rp./kWh

Die Resultate werden jeweils für beide Strompreise berechnet und abgebildet. Damit sollen die unterschiedlichen Strompreise und auch die möglichen Entwicklungen der Preise (im Betrachtungshorizont von 15 Jahren) berücksichtigt werden.

## 6.2 Kostenvergleich

Die Kosten für die verschiedenen Kühlsysteme werden anhand der Jahreskosten verglichen. In der Tabelle 11 sind die Jahreskosten für den Supermarkt M340 wie für den Supermarkt M1250 in Zürich und für beide Strompreis-Szenarien zusammengefasst. Eine detailliertere Kostenaufstellung ist in Anhang D zu finden. Die Kapitalkosten und die Instandhaltungskosten unterscheiden sich nur bezüglich der Supermarktgrösse (M340 oder M1250). Ansonsten sind die Kapitalkosten und die Instandhaltungskosten unabhängig vom Strompreis und auch für alle Standorte gleich.

Das zentralgekühlte Kühlsystem hat beim Supermarkt M340 die höchsten Kapitalkosten, da die Investitionskosten für die Kälteanlage deutlich grösser sind als bei den beiden steckerfertigen Kühlsystemen. Dies ändert sich jedoch beim Supermarkt M1250, da bei dieser Grösse die Lebensdauer der Kühlmöbel einen grösseren Einfluss auf die Kosten hat als beim Supermarkt M340. Die Instandhaltungskosten sind bei allen Varianten der kleinste Teil der Jahreskosten, wobei das steckerfertig hybride Kühlsystem die höchsten Instandhaltungskosten aufweist. Die Betriebskosten sind abhängig vom Strombedarf und vom Strompreis. Dementsprechend zeigt sich, dass die Betriebskosten beim steckerfertigen Kühlsystem am grössten sind.

Tabelle 11: Übersicht der Kosten in CHF (gerundet auf 1'000.-) für die Supermärkte in Zürich.

		Strompreis: 20 Rp./kWh			Strompreis: 35 Rp./kWh		
		Steckerfertig	Steckerf. hybrid	Zentral	Steckerfertig	Steckerf. hybrid	Zentral
<b>M340</b> <b>Zürich</b>	Kapitalkosten [CHF/a]	28'000.-	29'000.-	32'000.-	28'000.-	29'000.-	32'000.-
	Instandhaltungskosten [CHF/a]	9'000.-	11'000.-	11'000.-	9'000.-	11'000.-	11'000.-
	Betriebskosten [CHF/a]	16'000.-	13'000.-	11'000.-	28'000.-	22'000.-	20'000.-
	<b>Jahreskosten Total [CHF/a]</b>	<b>53'000.-</b>	<b>53'000.-</b>	<b>54'000.-</b>	<b>65'000.-</b>	<b>62'000.-</b>	<b>63'000.-</b>
<b>M1250</b> <b>Zürich</b>	Kapitalkosten [CHF/a]	67'000.-	61'000.-	57'000.-	68'000.-	62'000.-	57'000.-
	Instandhaltungskosten [CHF/a]	17'000.-	20'000.-	16'000.-	17'000.-	20'000.-	16'000.-
	Betriebskosten [CHF/a]	47'000.-	38'000.-	34'000.-	82'000.-	66'000.-	59'000.-
	<b>Jahreskosten Total [CHF/a]</b>	<b>131'000.-</b>	<b>119'000.-</b>	<b>107'000.-</b>	<b>167'000.-</b>	<b>148'000.-</b>	<b>132'000.-</b>

Die Zahlen aus der Tabelle 11 sind grafisch dargestellt in den Abbildungen 23 und 24. Beim Supermarkt M340 (Abbildung 23) zeigt sich, dass die Jahreskosten für alle Kühlsysteme ähnlich gross sind. Da die Supermarktgrösse mit einer Verkaufsfläche von 340 m<sup>2</sup> vergleichsweise klein ist, machen die Kapitalkosten jeweils rund die Hälfte der gesamten Jahreskosten aus. Das steckerfertige Kühlsystem ist bezüglich der Kapital- und Instandhaltungskosten sehr kostengünstig, hat aber deutlich die höchsten Betriebskosten. Je höher der Strompreis ist, desto mehr macht sich der Faktor Betriebskosten bemerkbar, vor allem bei einem hohen Strombedarf.

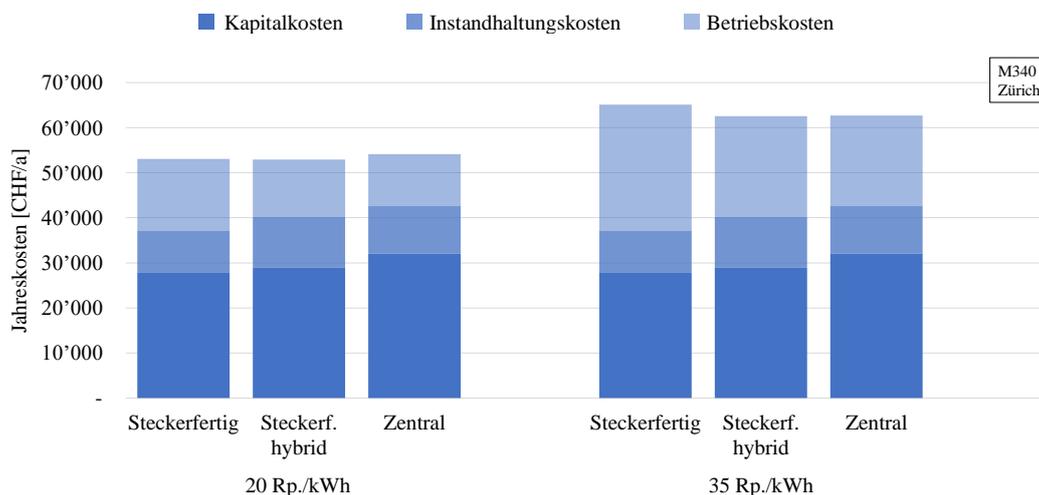


Abbildung 23: Vergleich der Jahreskosten für den M340 in Zürich, mit einem Strompreis von 20 Rp./kWh (links) und 35 Rp./kWh (rechts).

Im Vergleich zum Supermarkt M340 gibt es beim Supermarkt M1250 deutliche Unterschiede bezüglich der Jahreskosten. Am kostengünstigsten ist das zentralgekühlte Kühlsystem, vor dem steckerfertig hybridem Kühlsystem. Die konventionelle steckerfertige Variante ist bei dieser Supermarktgrösse jeweils am teuersten. Dies liegt zum einen an den Kapitalkosten, die bei den steckerfertigen Varianten im Vergleich zum Supermarkt M340 deutlich grösser sind. Die kürzere Lebensdauer der Kühlmöbel fällt mehr ins Gewicht, das es 3 bis 4mal mehr Kühlmöbel im Laden hat. Zum anderen ist der Anteil der Betriebskosten beim M1250 deutlich grösser als beim M340, da der Strombedarf beim M1250 rund 3mal grösser ist. Der Vorteil eines

energieeffizienten Kühlsystems wird auch bezüglich der Kosten deutlicher, je grösser der Supermarkt ist. Vor allem bei einem hohen Strompreis von 35 Rp./kWh können die Betriebskosten bereits die Hälfte der gesamten Jahreskosten ausmachen, siehe Abbildung 24.

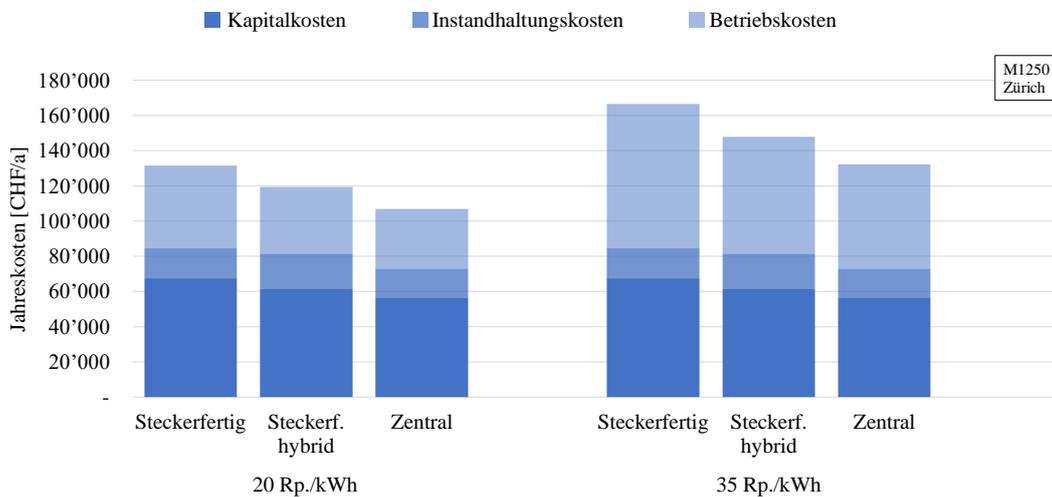


Abbildung 24: Vergleich der Jahreskosten für den M1250 in Zürich, mit einem Strompreis von 20 Rp./kWh (links) und 35 Rp./kWh (rechts).

### 6.3 Vor- und Nachteile der verschiedenen Kühlsysteme

Neben der energetischen und der wirtschaftlichen Betrachtung der Kühlsysteme gibt es natürlich auch noch weitere Aspekte, welche beachtet werden können. Diese wurden in der Simulation nicht berücksichtigt, sollen hier aber zur Vollständigkeit in der Tabelle 12 ebenfalls erwähnt werden.

Tabelle 12: Vor- und Nachteile der verschiedenen Kühlsysteme.

	Variante 1 Steckerfertig	Variante 2 Steckerfertig hybrid	Variante 3 Zentralgekühlt
<b>Nutzung der Aussenflächen</b>	Erhöhter Platzbedarf (Rückkühler)	Erhöhter Platzbedarf (Rückkühler)	Geringer Platzbedarf (Gaskühler)
<b>Platzbedarf Technikraum</b>	Kein separater Raum nötig (Rev. Kälte-Wärme-Maschine)	Kein separater Raum nötig (Rev. Kälte-Wärme-Maschine und Pumpenstation)	Technikraum gemäss EN378 oder erhöhte Sicherheitsauflagen (CO <sub>2</sub> Kälteanlage)
<b>Sturmlüftung benötigt</b>	Nein	Nein	Ja
<b>Wartung</b>	In der Ladenfläche (Erzeugung und kältetechnischer Teil)	In der Ladenfläche (Erzeugung und kältetechnischer Teil)	Im Technikraum (Erzeugung) und Ladenfläche (kältetechnischer Teil)
<b>Flexibilität der Kühlmöbel</b>	Hoch	Niedrig	Niedrig
<b>Wärmenutzung</b>	Permanente, örtliche Wärmeabgabe, kein Komfort	Nur örtliche Wärmeabgabe bei Direktkondensations-WN, Komfort herstellerabhängig	Einfache Einbindung für bedarfsgerechte WN
<b>Störfall</b>	Nur betroffenes Kühlmöbel fällt aus	Nur betroffenes Kühlmöbel fällt aus	Teilausfall oder kompletter Ausfall der Kälte- und Wärmeversorgung

## Literaturverzeichnis

- [1] Europäische Kommission, *Delegierte Verordnung (EU) 2019/2018*, Brüssel: Europäische Union, 11.03.2019.
- [2] Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV), *SN EN ISO 23953-2: Verkaufskühlmöbel - Teil 2: Klassifizierung, Anforderungen und Prüfbedingungen*, Winterthur: Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV), 01.03.2016.
- [3] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, *SIA 382/1:2014: Lüftungs- und Klimaanlage - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen*, Zürich: SIA Zürich, 01.07.2014.
- [4] N. Fidorra, *Physical Modelling of the Interactions between Thermal Systems in Supermarkets*, Braunschweig: Technische Universität Carolo-Wilhelmina - Fakultät für Maschinenbau, 20.07.2020.
- [5] J. Arias, *Energy Usage in Supermarkets - Modelling and Field Measurements (S. 122)*, Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2005.
- [6] Karampour, Mazyar und S. Sawalha, *State-of-the-art integrated CO2 refrigeration system for supermarkets: A comparative analysis*, Stockholm: Royal Institute of Technology (KTH), Energy Technology Department, 10.11.2017.
- [7] Genossenschaft Migros Zürich, *Gesamtreport CO2-Kälte Monats-Werte*, Migros Oberglatt: Genossenschaft Migros Zürich, 03.10.2023.
- [8] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, *Vernehmlassung Entwurf prSIA 384/4:2023-10 (Klimakälteanlagen in Gebäuden - Grundlagen und Anforderungen)*, Zürich, 2023.
- [9] C. Stahel, L. Wick und F. Tillenkamp, *Kälteverdichter: Schlüssel zu Energieeffizienz und Betriebssicherheit*, Winterthur: ZHAW, IEFÉ (Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering), 24.02.2022.

## Anhang A Weitere Resultate

### Anhang A.1 Vergleich der Varianten

#### Supermarkt M340, Lugano

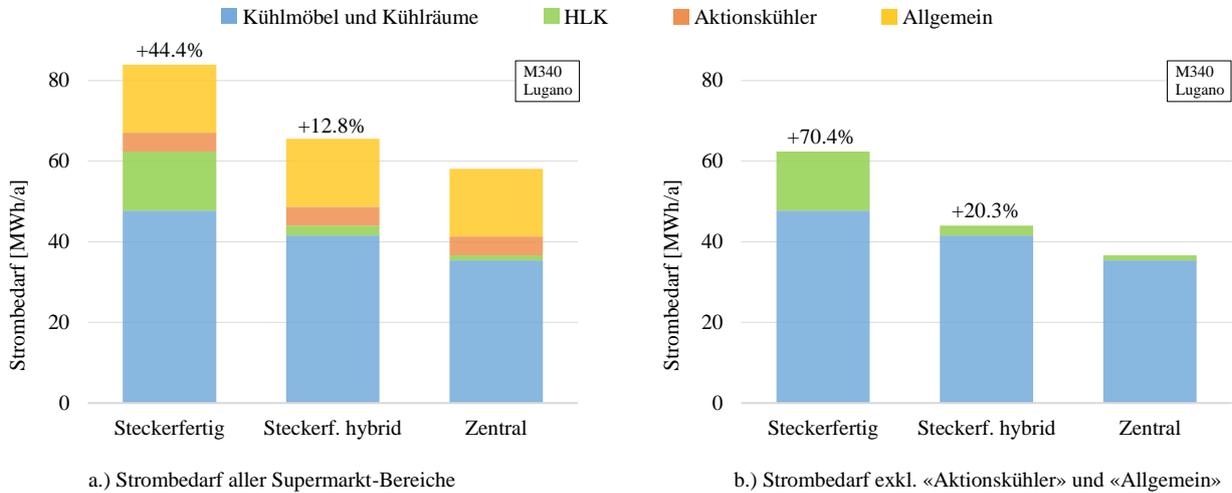


Abbildung 25: Vergleich des Strombedarfs der Varianten, für den Supermarkt M340 in Lugano. a.) Jährlicher Strombedarf des gesamten Supermarkts. b.) Strombedarf des Supermarkts, exklusive der Aktionskühler und der allgemeinen Verbraucher.

#### Supermarkt M1250, Lugano

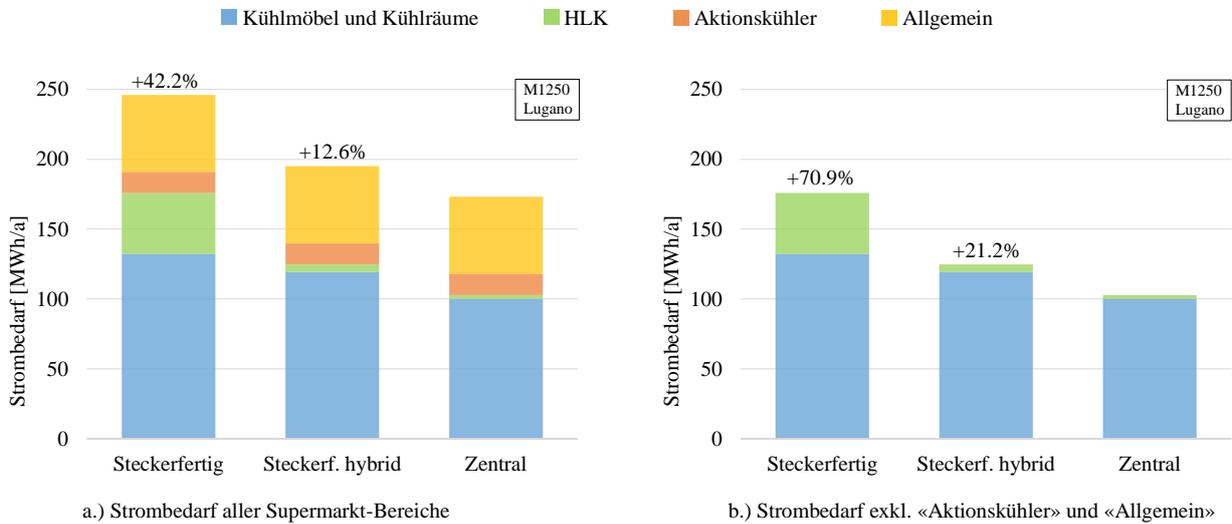


Abbildung 26: Vergleich des Strombedarfs der Varianten, für den Supermarkt M1250 in Lugano. a.) Jährlicher Strombedarf des gesamten Supermarkts. b.) Strombedarf des Supermarkts, exklusive der Aktionskühler und der allgemeinen Verbraucher.

### Supermarkt M340, Davos

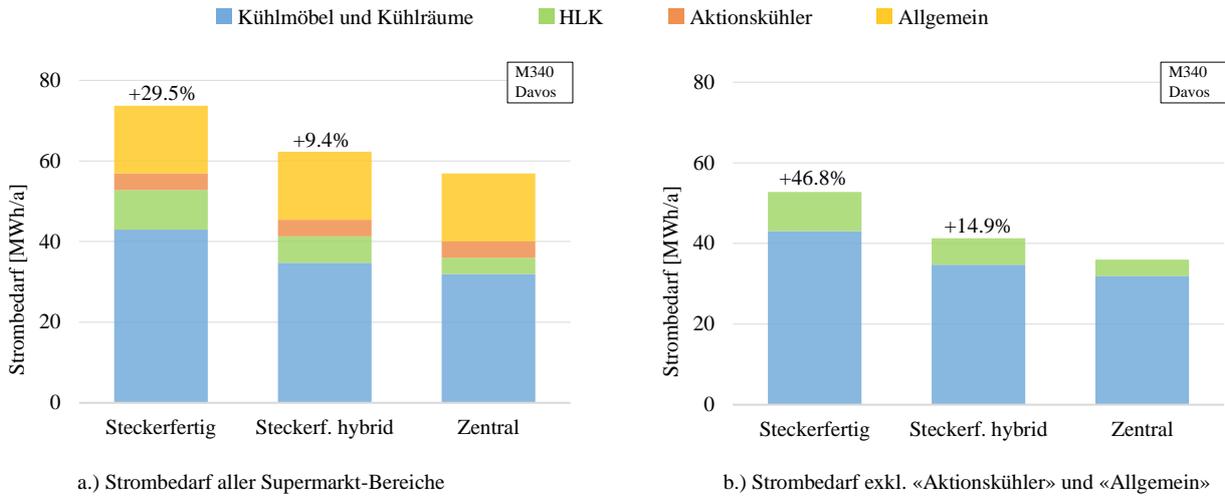


Abbildung 27: Vergleich des Strombedarfs der Varianten, für den Supermarkt M340 in Davos. a.) Jährlicher Strombedarf des gesamten Supermarkts. b.) Strombedarf des Supermarkts, exklusive der Aktionskühler und der allgemeinen Verbraucher.

### Supermarkt M1250, Davos

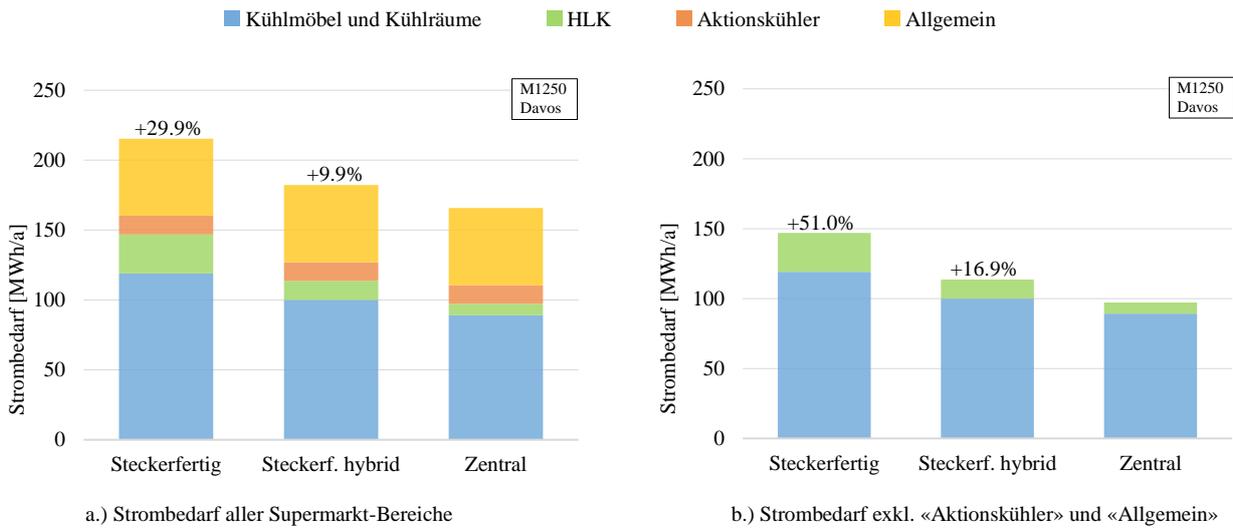


Abbildung 28: Vergleich des Strombedarfs der Varianten, für den Supermarkt M1250 in Davos. a.) Jährlicher Strombedarf des gesamten Supermarkts. b.) Strombedarf des Supermarkts, exklusive der Aktionskühler und der allgemeinen Verbraucher.

## Anhang A.2 Monatliche Übersichten

### Supermarkt M340, Zürich

#### Variante 1: Steckerfertig

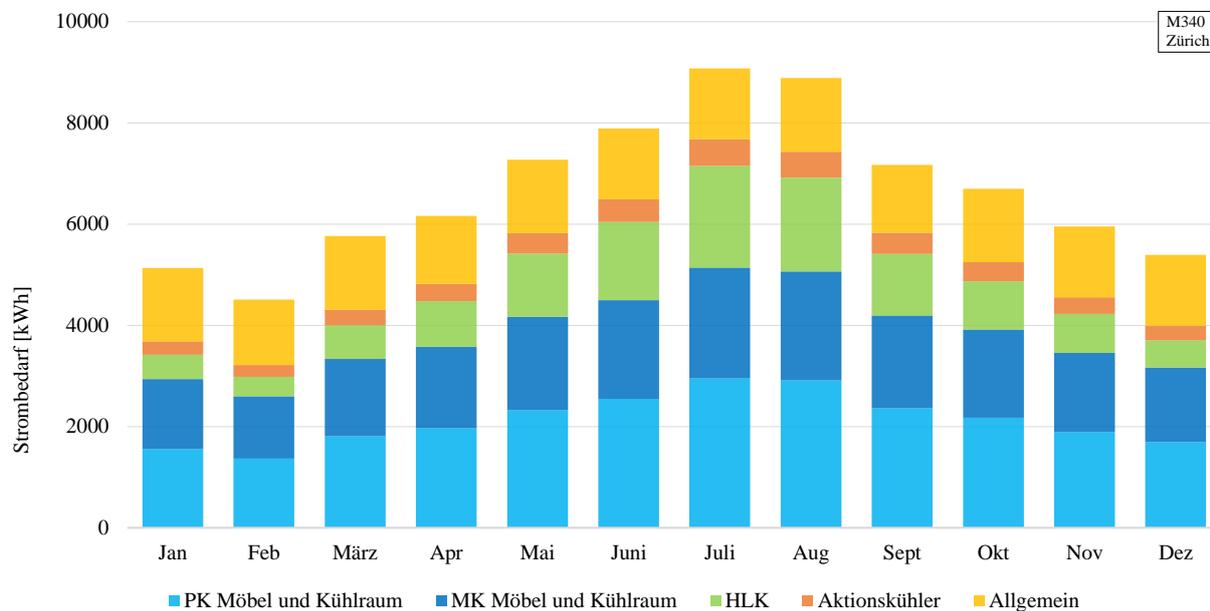


Abbildung 29: Monatlicher Strombedarf für den Supermarkt M340 in Zürich, Variante 1.

#### Variante 2: Steckerfertig hybrid

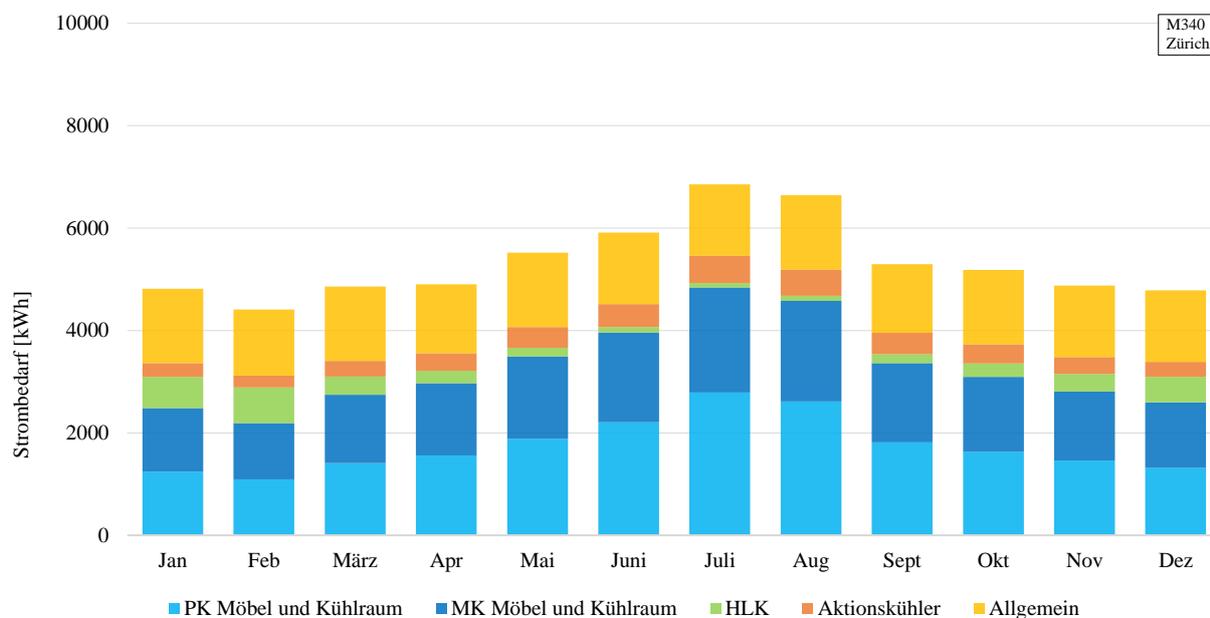


Abbildung 30: Monatlicher Strombedarf für den Supermarkt M340 in Zürich, Variante 2.

### Variante 3: Zentralgekühlt

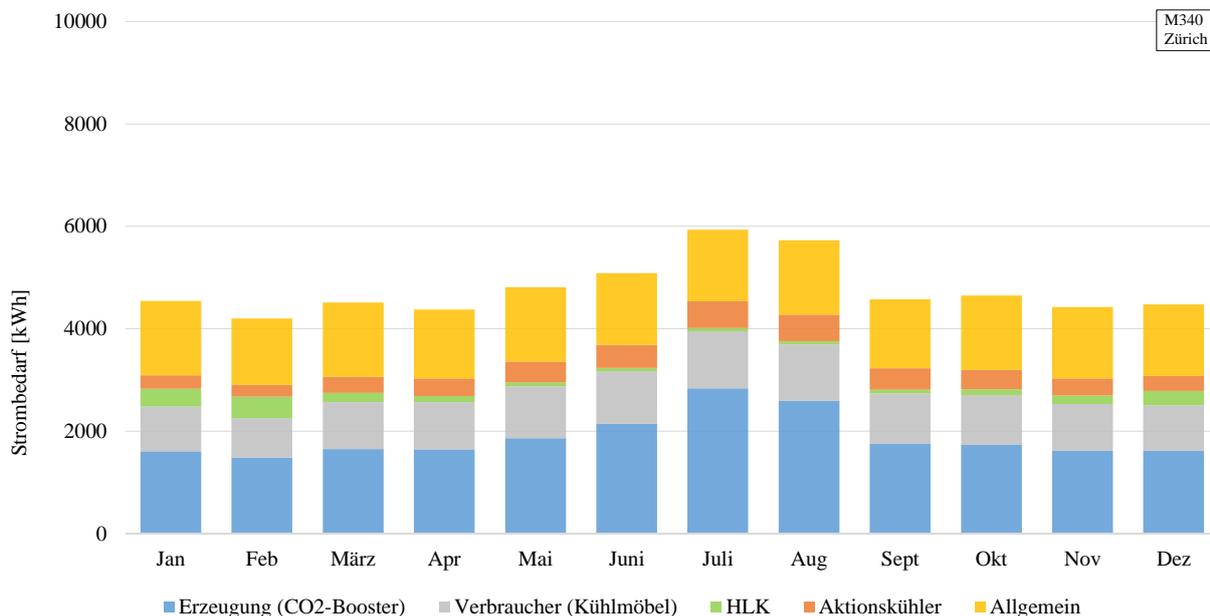


Abbildung 31: Monatlicher Strombedarf für den Supermarkt M340 in Zürich, Variante 3.

### Supermarkt M340, Lugano

#### Variante 1: Steckerfertig

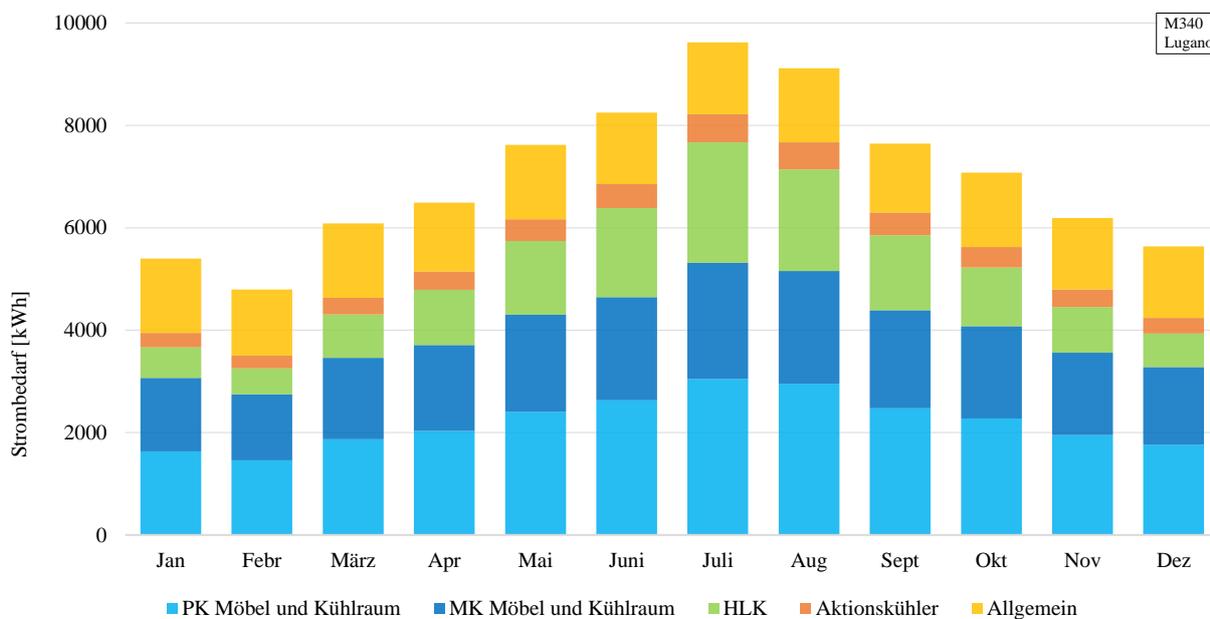


Abbildung 32: Monatlicher Strombedarf für den Supermarkt M340 in Lugano, Variante 1.

## Variante 2: Steckerfertig hybrid

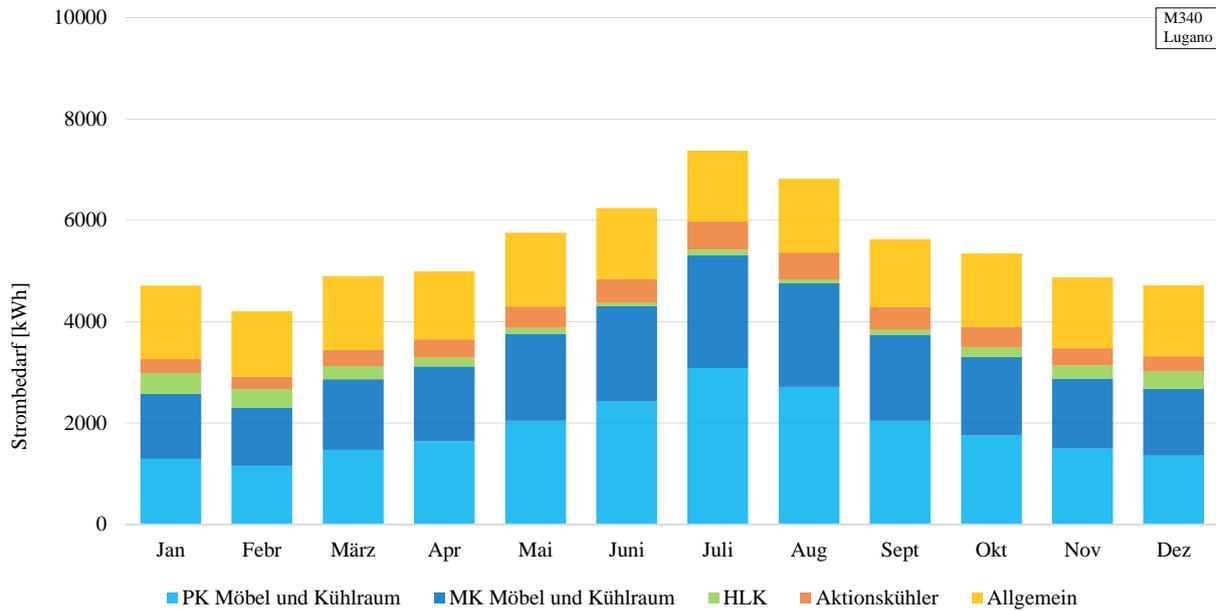


Abbildung 33: Monatlicher Strombedarf für den Supermarkt M340 in Lugano, Variante 2.

## Variante 3: Zentralgekühlt

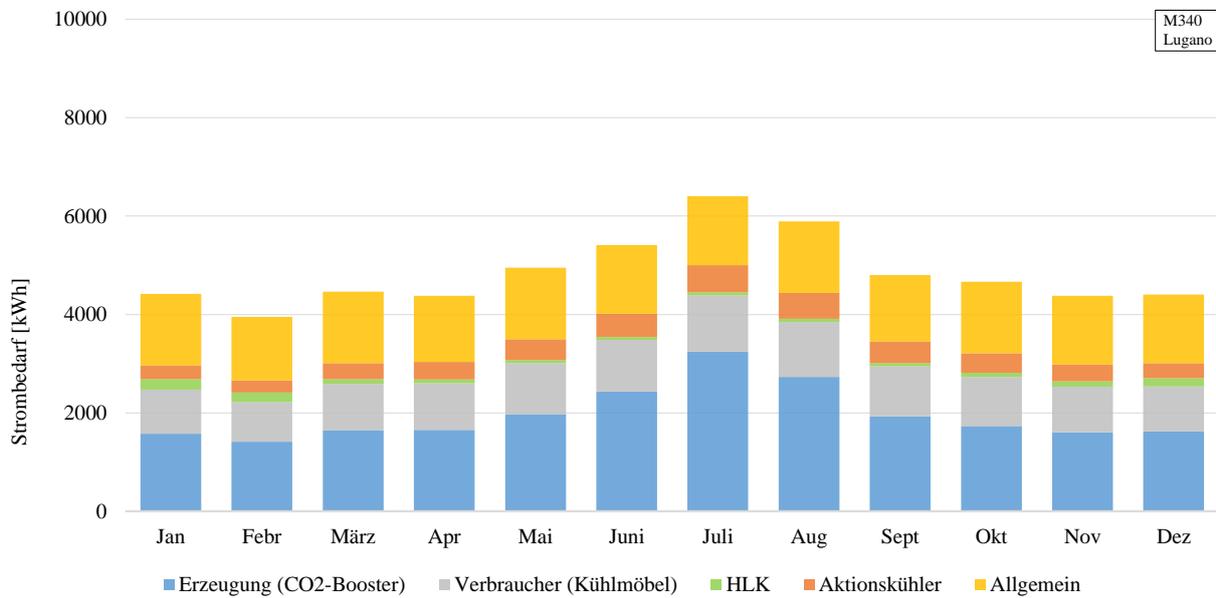


Abbildung 34: Monatlicher Strombedarf für den Supermarkt M340 in Lugano, Variante 3.

## Supermarkt M1250, Lugano

### Variante 1: Steckerfertig

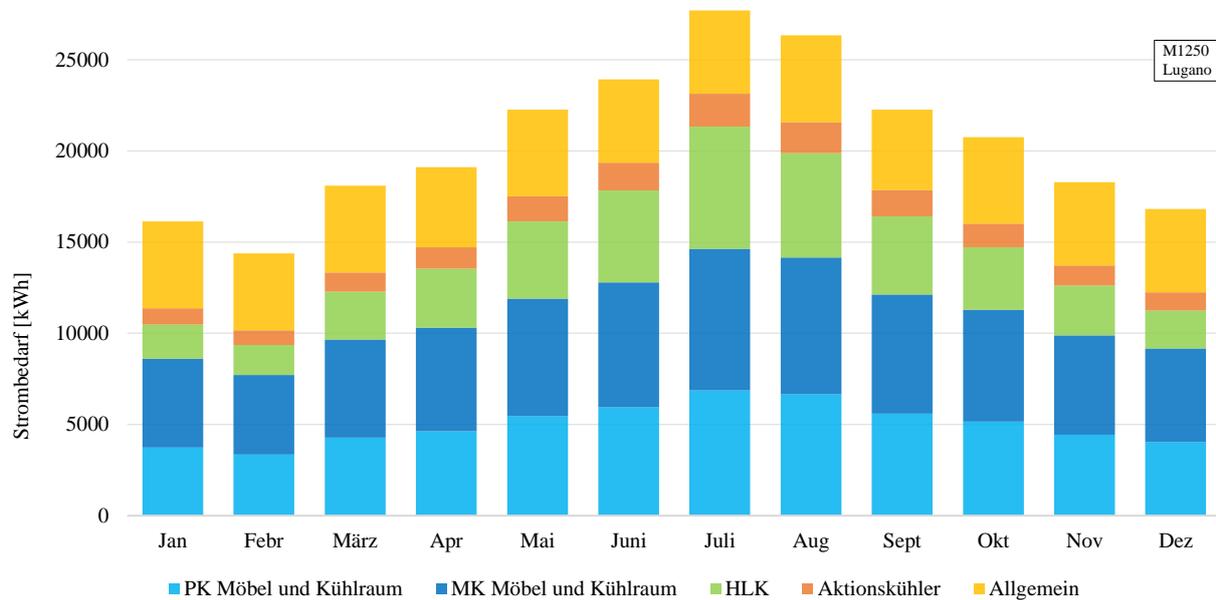


Abbildung 35: Monatlicher Strombedarf für den Supermarkt M1250 in Lugano, Variante 1.

### Variante 2: Steckerfertig hybrid

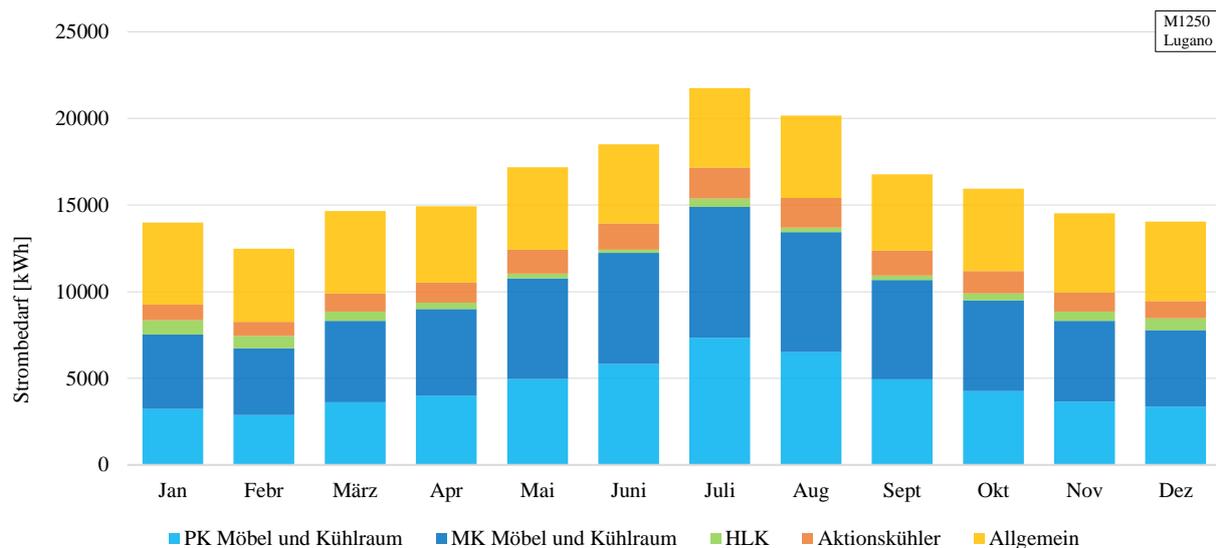


Abbildung 36: Monatlicher Strombedarf für den Supermarkt M1250 in Lugano, Variante 2.

### Variante 3: Zentralgekühlt

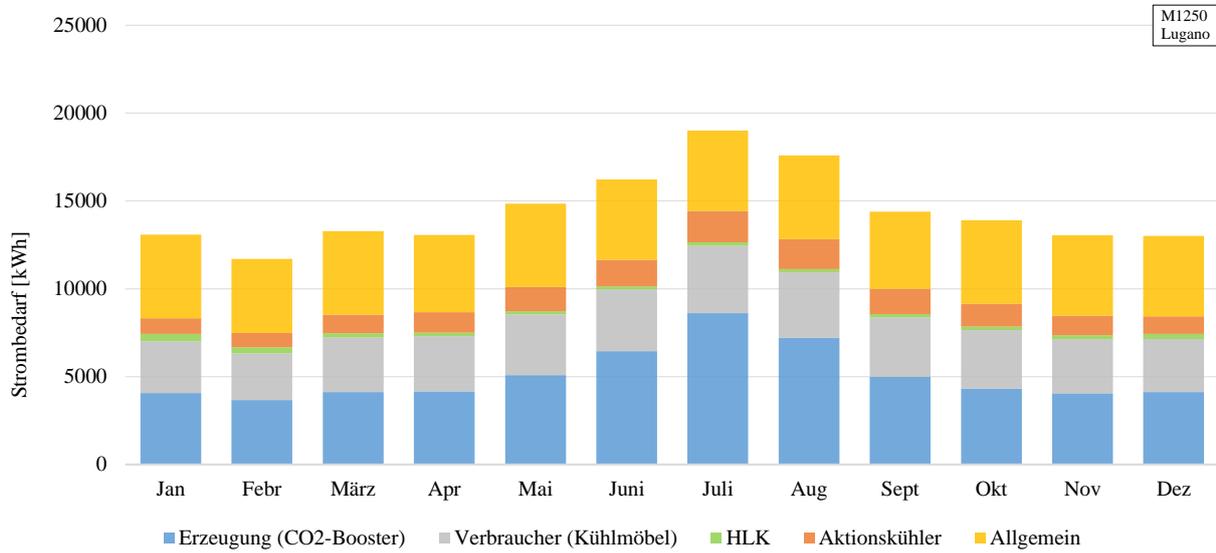


Abbildung 37: Monatlicher Strombedarf für den Supermarkt M1250 in Lugano, Variante 3.

### Supermarkt M340, Davos

#### Variante 1: Steckerfertig

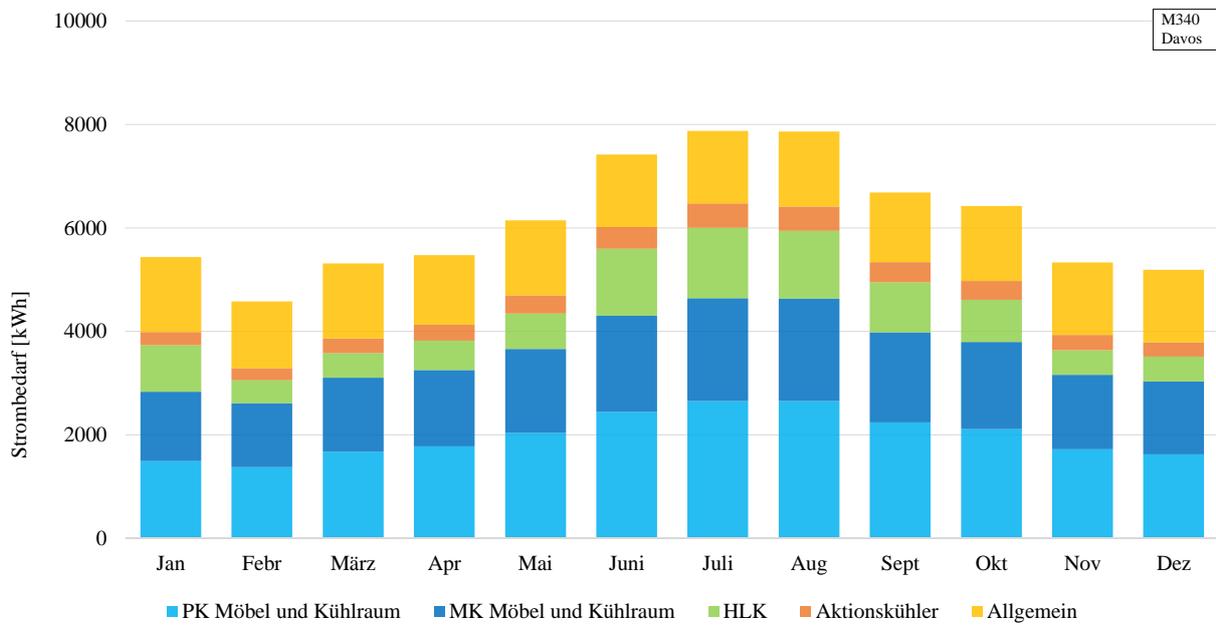


Abbildung 38: Monatlicher Strombedarf für den Supermarkt M340 in Davos, Variante 1.

## Variante 2: Steckerfertig hybrid

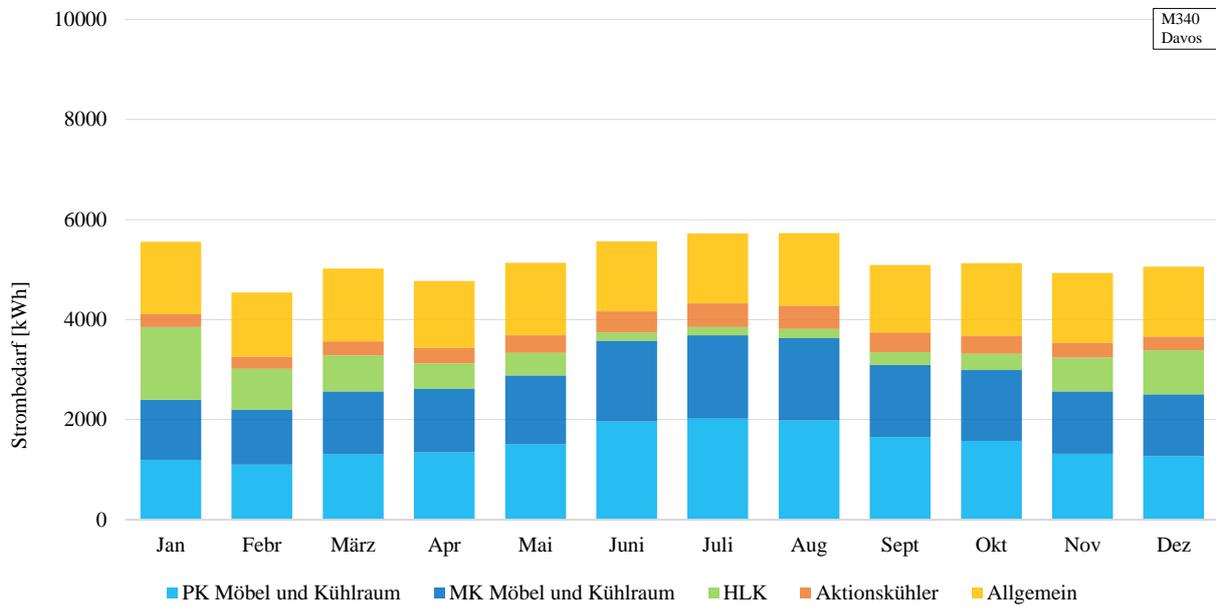


Abbildung 39: Monatlicher Strombedarf für den Supermarkt M340 in Davos, Variante 2.

## Variante 3: Zentralgekühlt

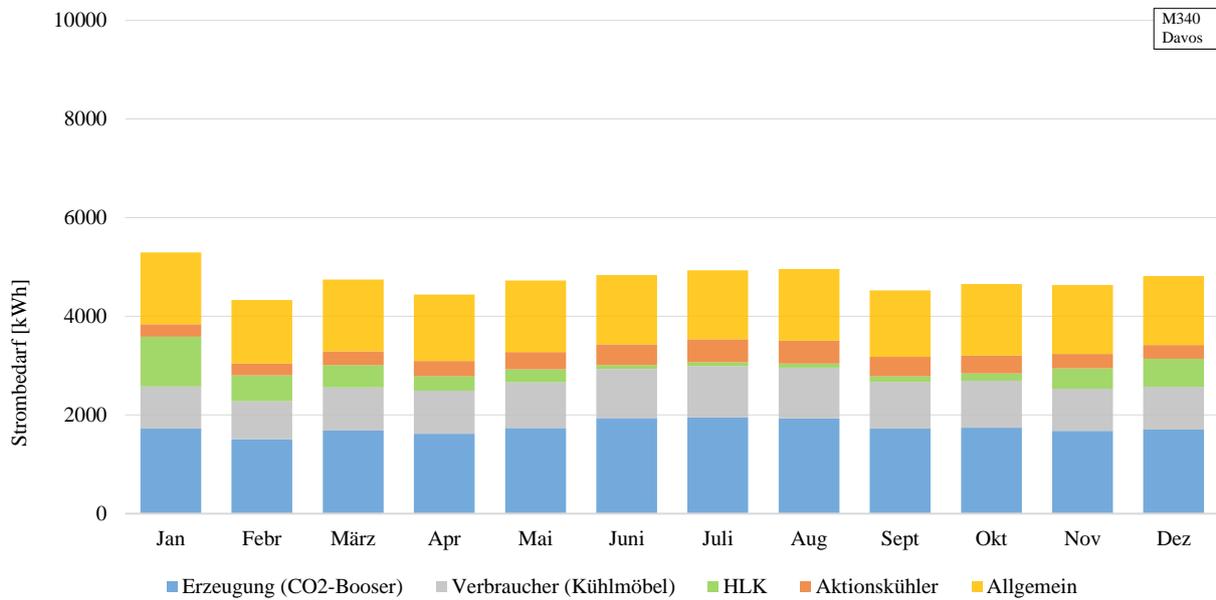


Abbildung 40: Monatlicher Strombedarf für den Supermarkt M340 in Davos, Variante 3.

## Supermarkt M1250, Davos

### Variante 1: Steckerfertig

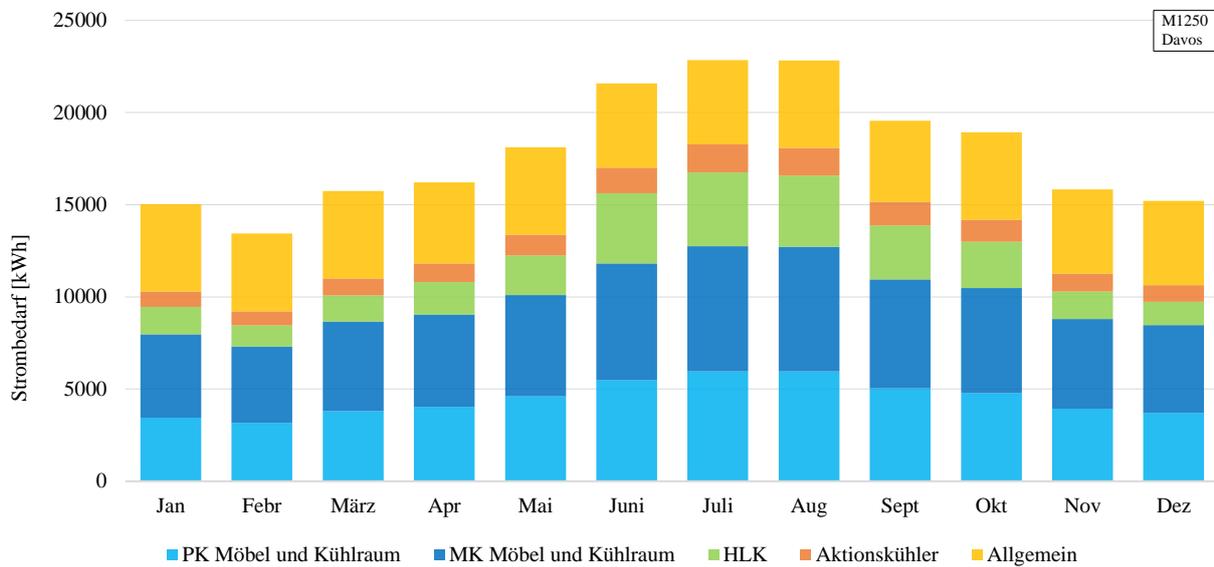


Abbildung 41: Monatlicher Strombedarf für den Supermarkt M1250 in Davos, Variante 1.

### Variante 2: Steckerfertig hybrid

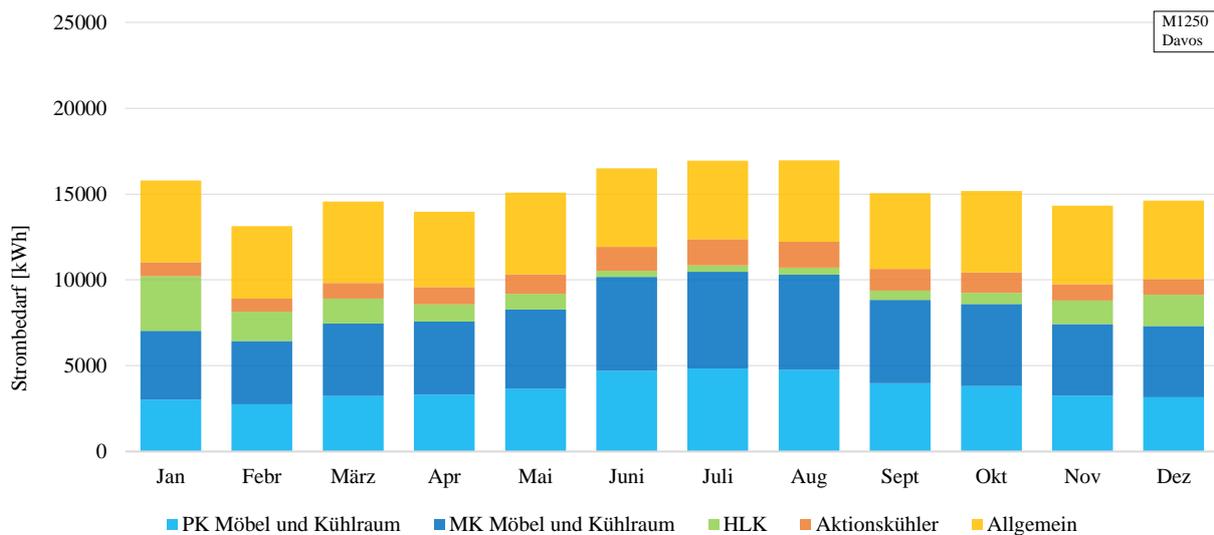


Abbildung 42: Monatlicher Strombedarf für den Supermarkt M1250 in Davos, Variante 2.

### Variante 3: Zentralgekühlt

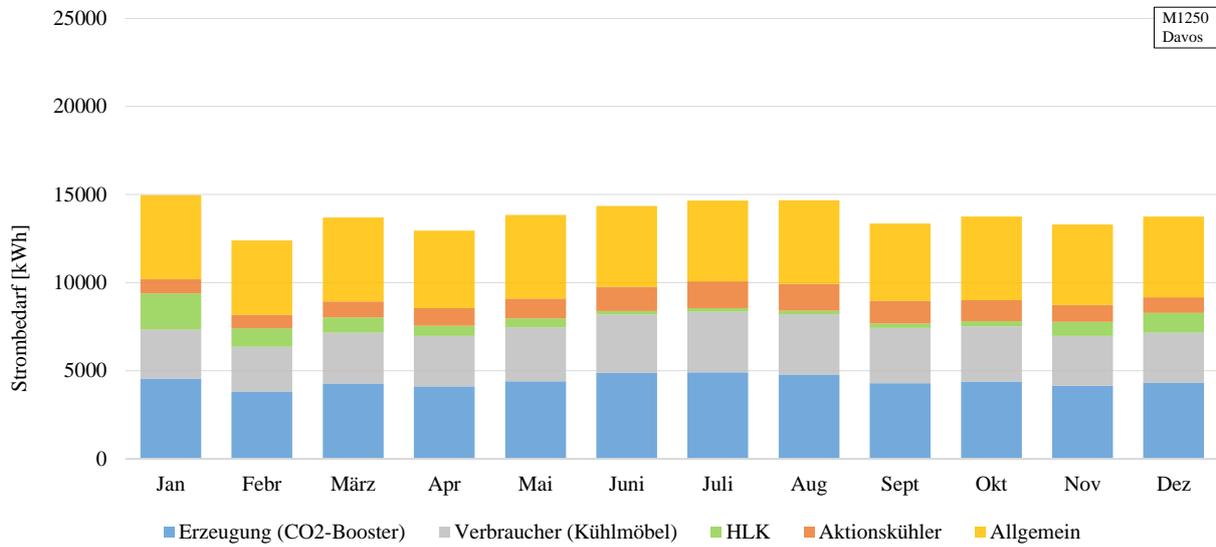


Abbildung 43: Monatlicher Strombedarf für den Supermarkt M1250 in Davos, Variante 3.

### Anhang A.3 Wärmebilanzen im Tagesverlauf (für den Supermarkt M340 in Zürich)

#### Variante 1: Steckerfertig

Wintertag (2. Januar)

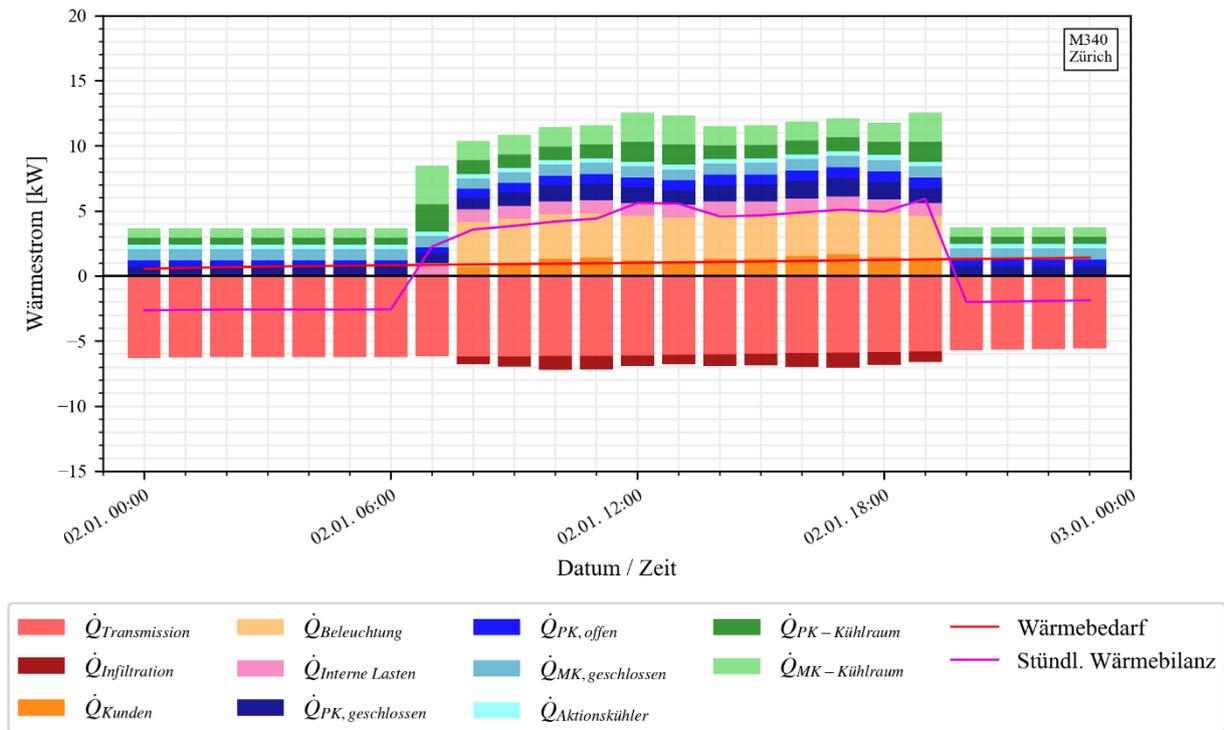


Abbildung 44: Stündliche Wärmebilanz der Variante 1 an einem Beispieltag im Winter für den Supermarkt M340 in Zürich.

Sommertag (4. Juli)

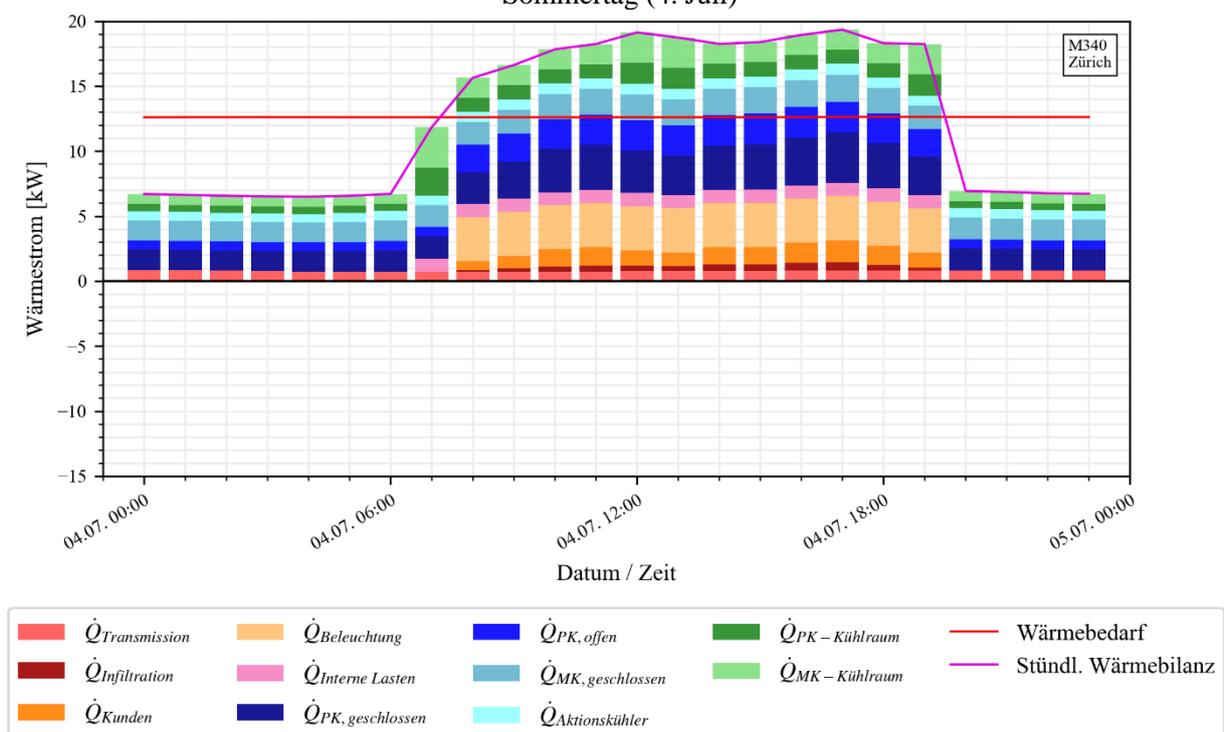


Abbildung 45: Stündliche Wärmebilanz der Variante 1 an einem Beispieltag im Sommer für den Supermarkt M340 in Zürich.

Variante 2: Steckerfertig hybrid

Wintertag (2. Januar)

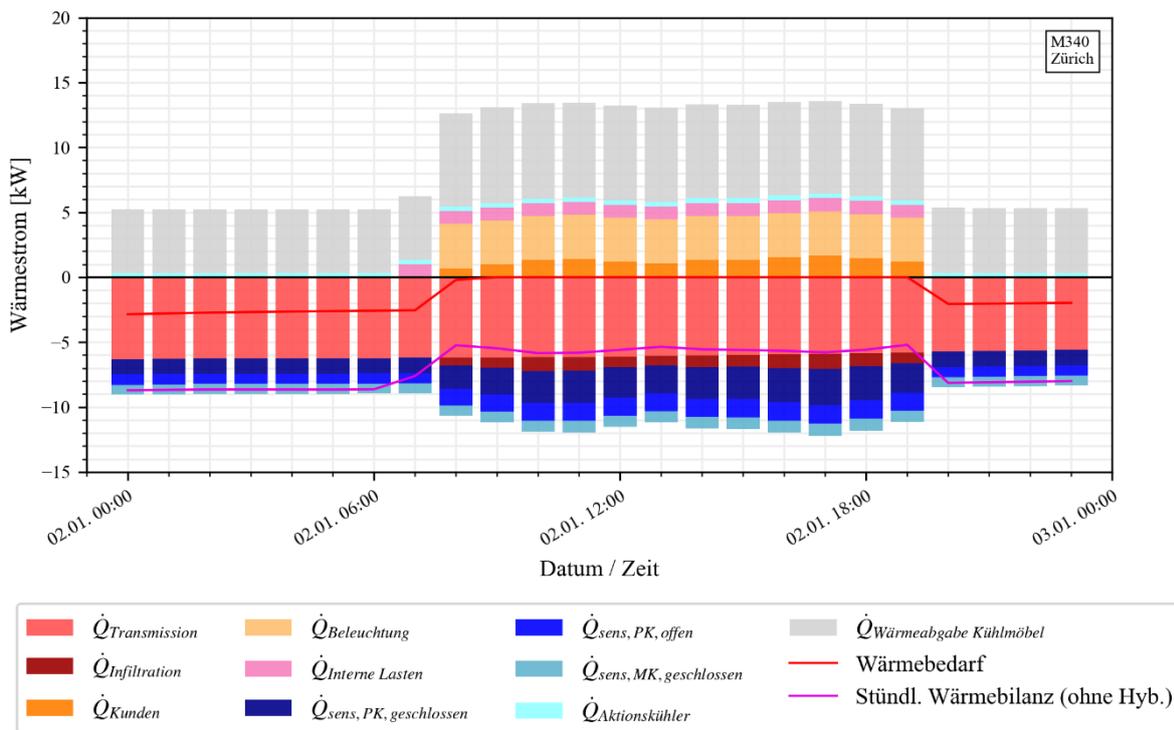


Abbildung 46: Stündliche Wärmebilanz der Variante 2 an einem Beispieltag im Winter für den Supermarkt M340 in Zürich.

Sommertag (4. Juli)

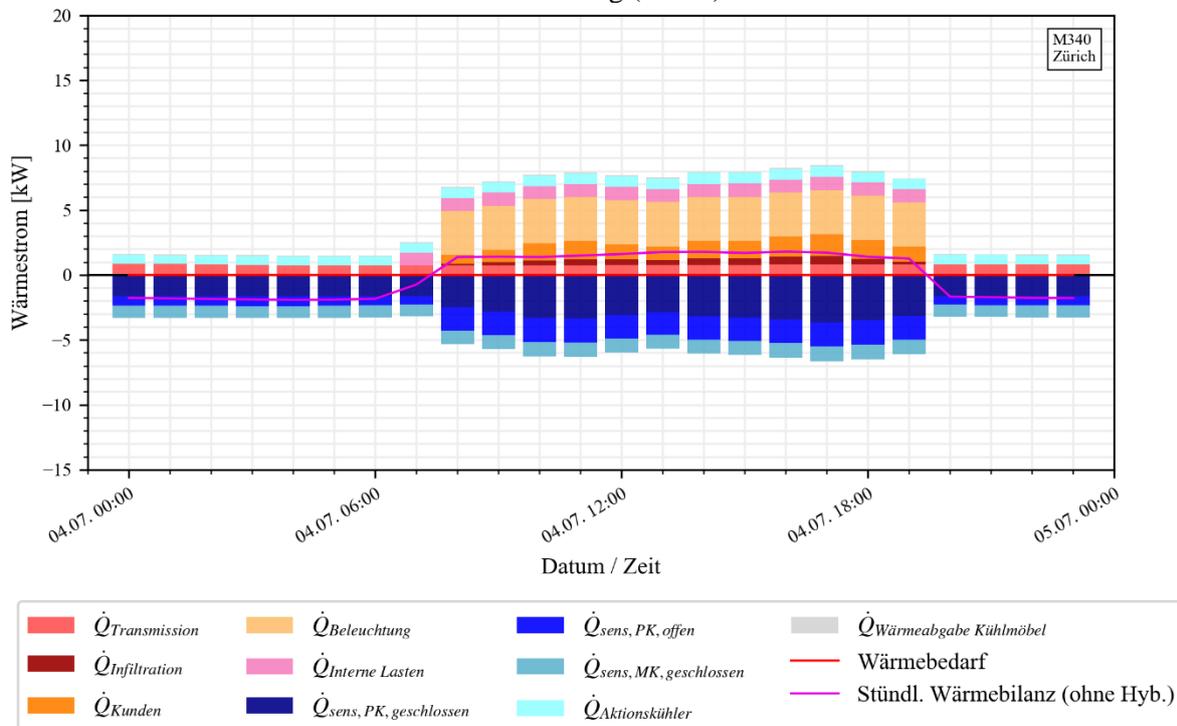


Abbildung 47: Stündliche Wärmebilanz der Variante 2 an einem Beispieltag im Sommer für den Supermarkt M340 in Zürich.

### Variante 3: Zentralgekühlt

#### Wintertag (2. Januar)

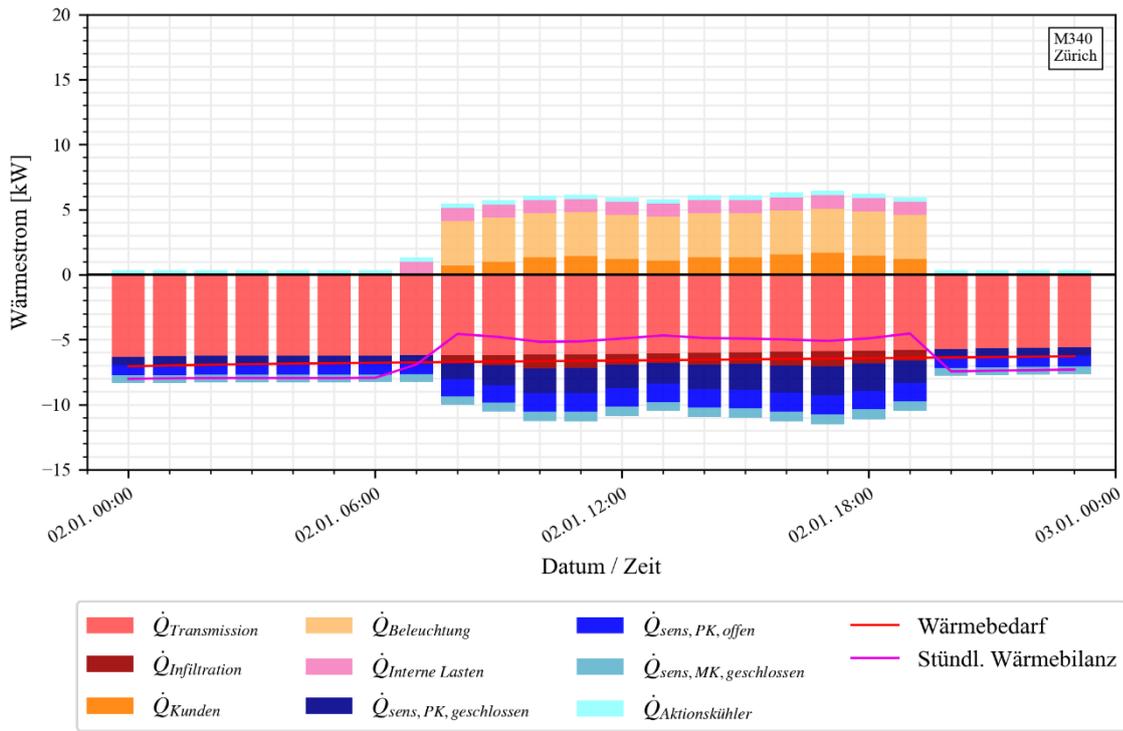


Abbildung 48: Stündliche Wärmebilanz der Variante 3 an einem Beispieltag im Winter für den Supermarkt M340 in Zürich.

#### Sommertag (4. Juli)

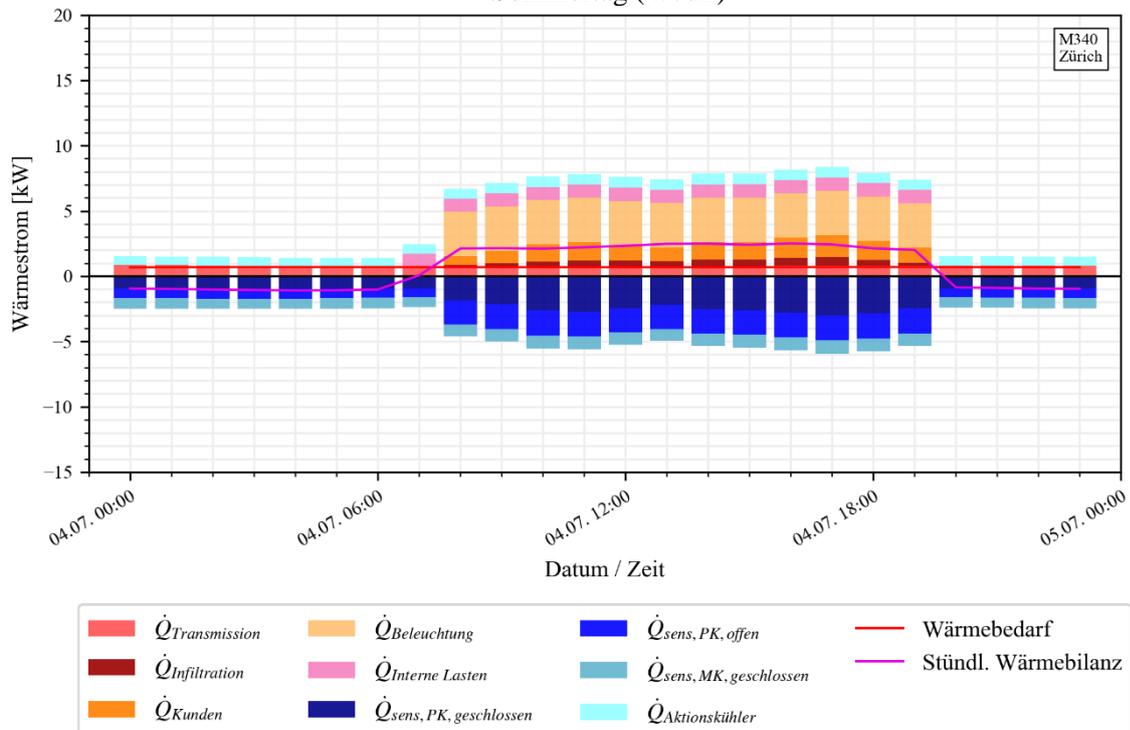


Abbildung 49: Stündliche Wärmebilanz der Variante 3 an einem Beispieltag im Sommer für den Supermarkt M340 in Zürich.

**Anhang B Schemas**  
**Variante 1: Steckerfertig**

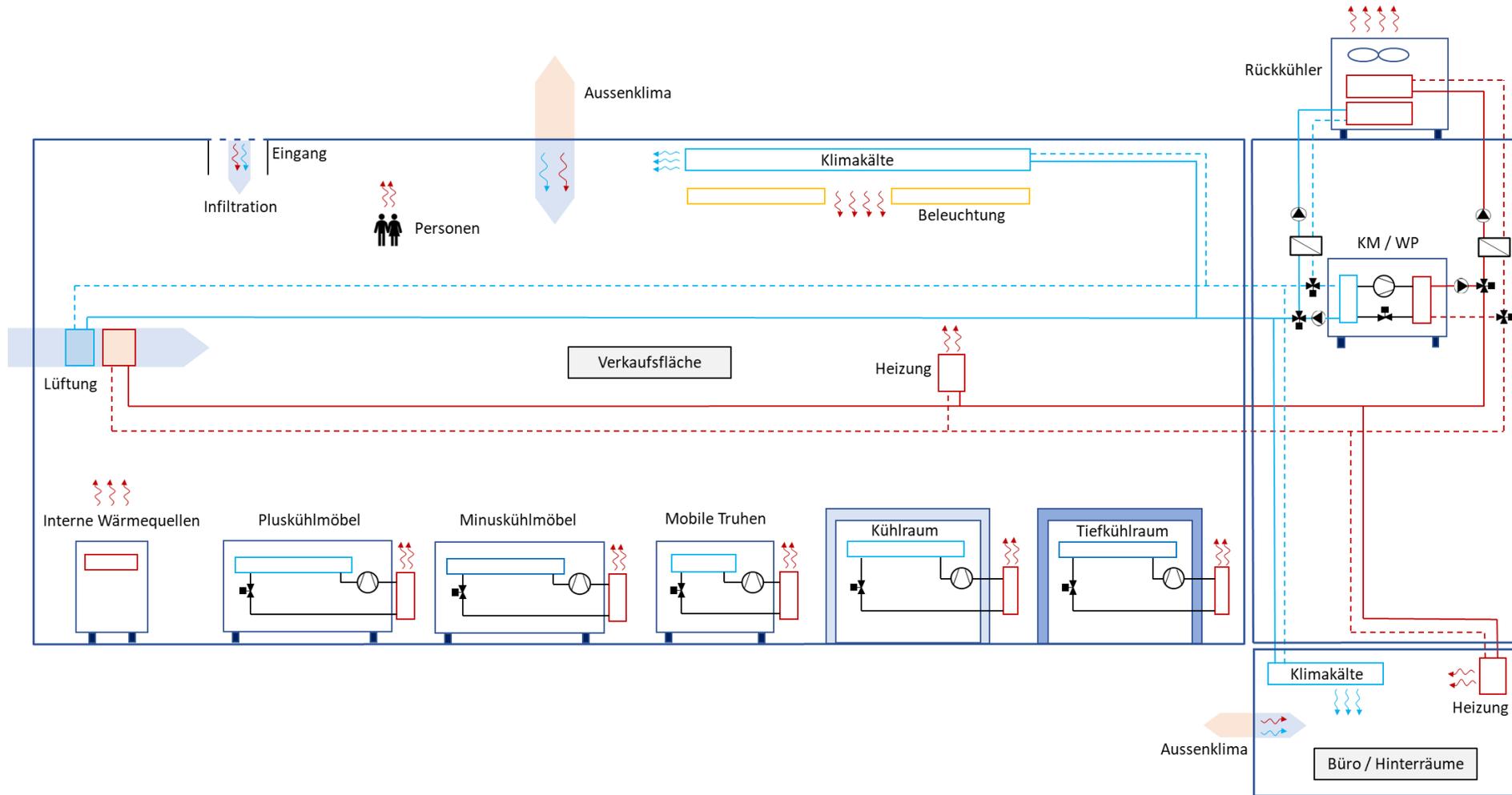


Abbildung 50: Schema für die Wärmebilanz der Variante 1 (Steckerfertig).

## Variante 2: Steckerfertig hybrid

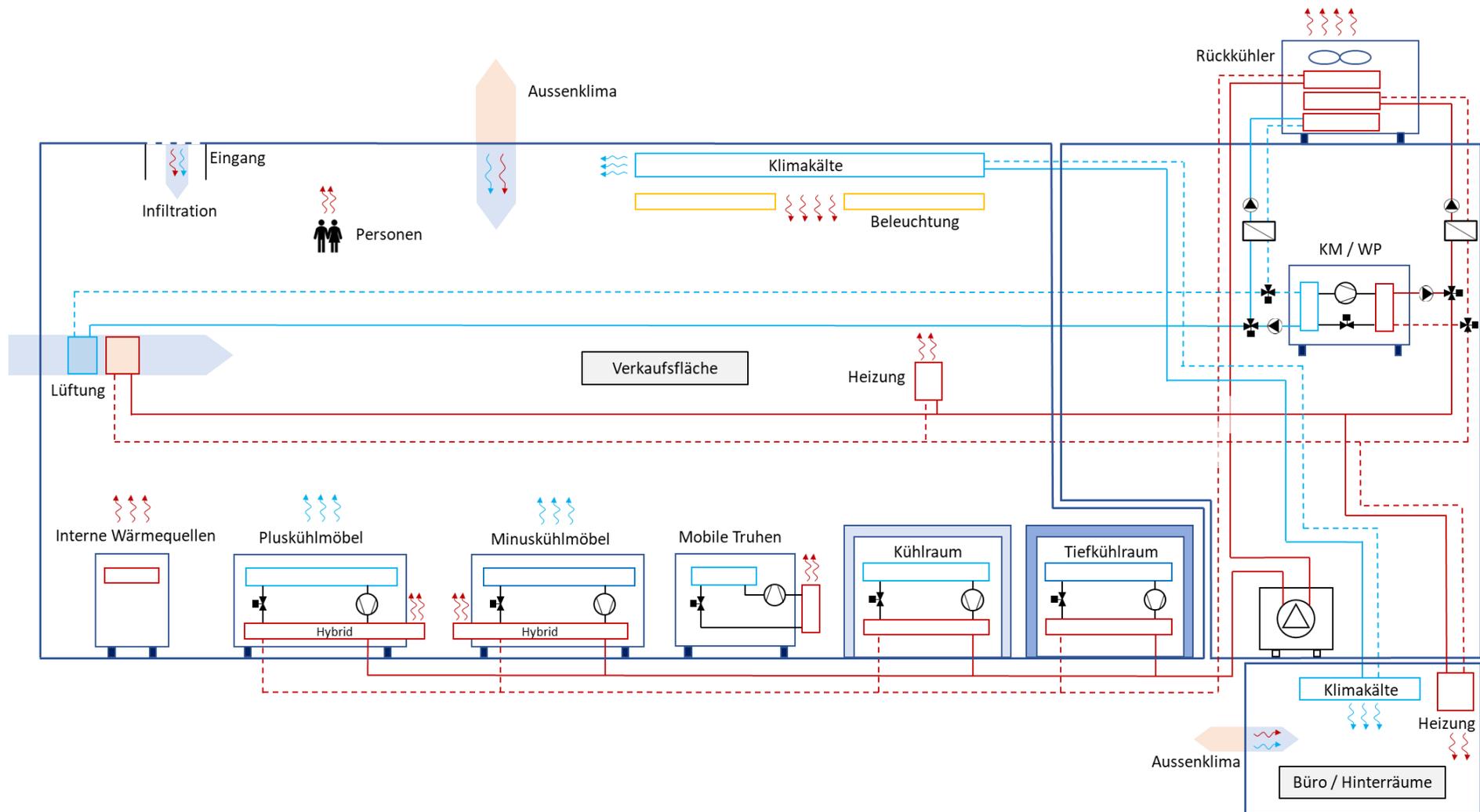


Abbildung 51: Schema für die Wärmebilanz der Variante 2 (Steckerfertig hybrid).

### Variante 3: Zentralgekühlt

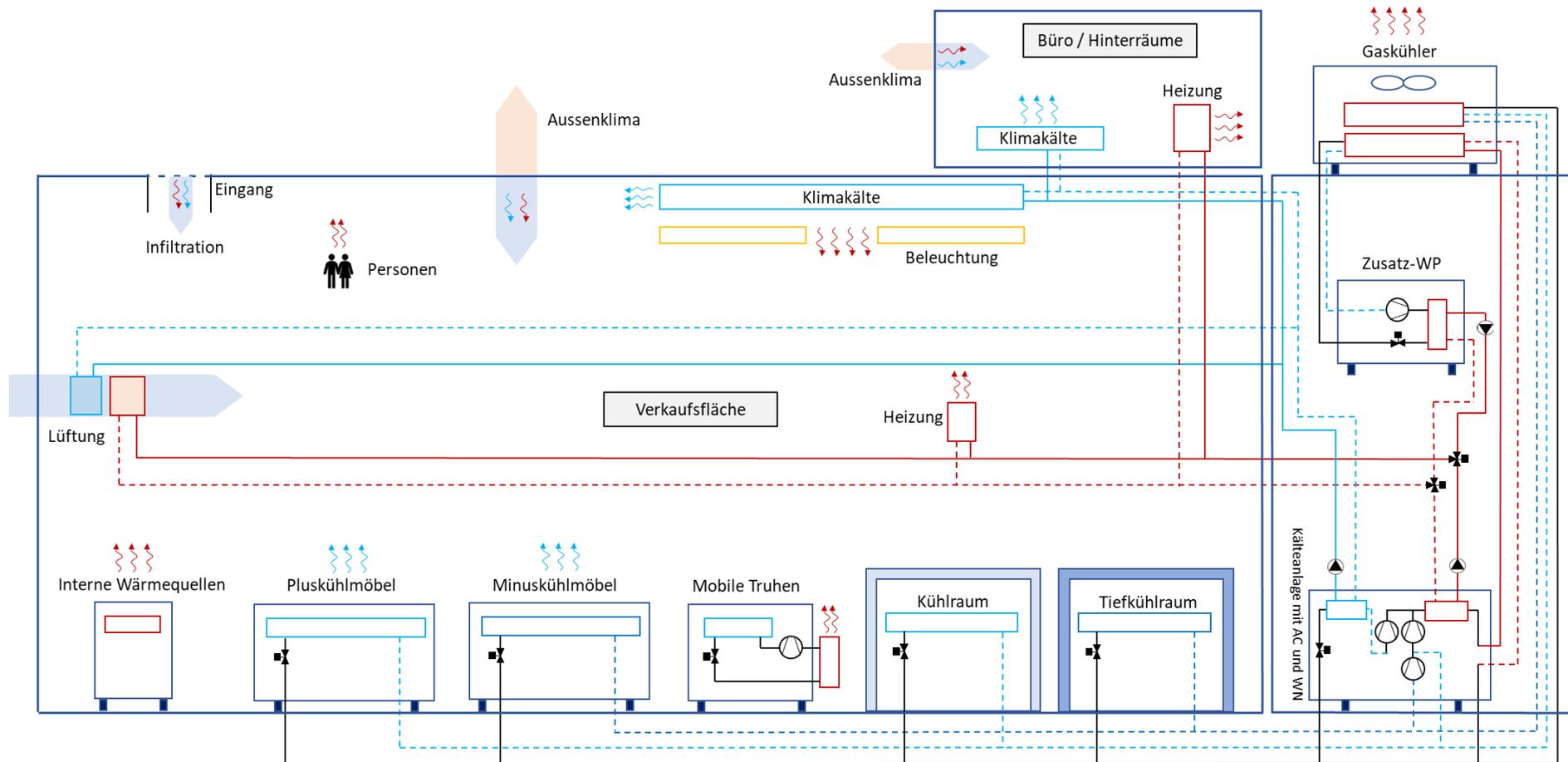


Abbildung 52: Schema für die Wärmebilanz der Variante 3 (Zentralgekühlt).

## Anhang C Lastprofile Kühlräume

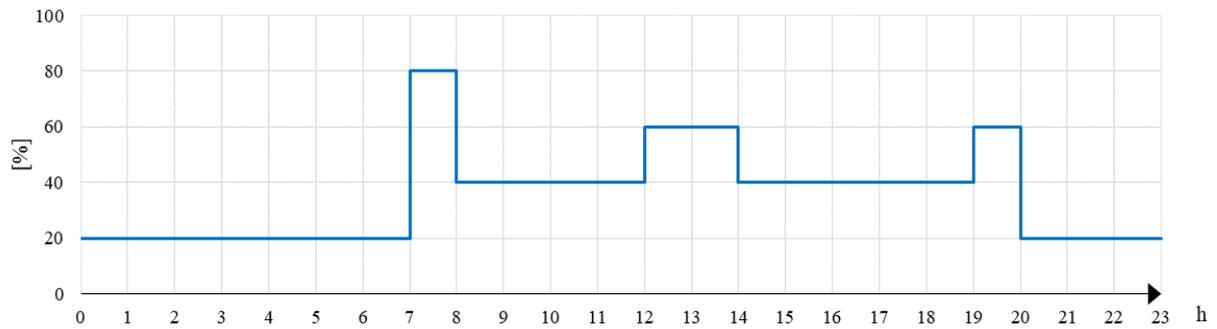


Abbildung 53: Lastprofil des PK- und MK-Kühlraums.

## Besucherprofile

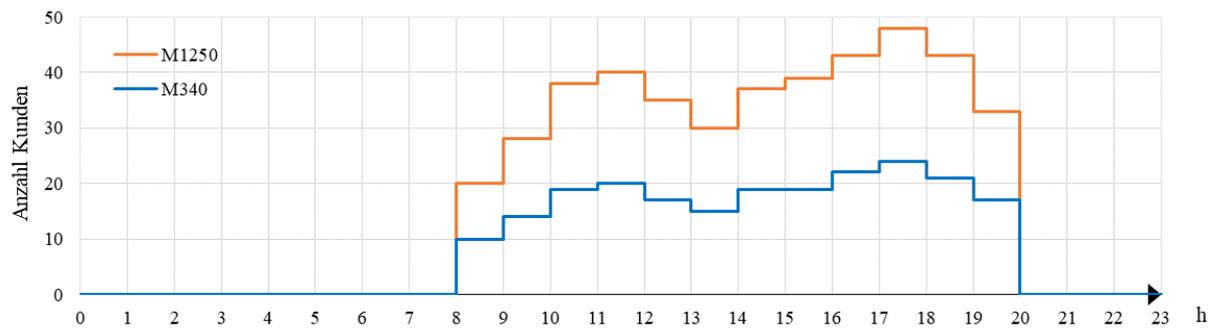


Abbildung 54: Besucherprofile der Supermärkte M340 und M1250.

## Interne Wärmelasten

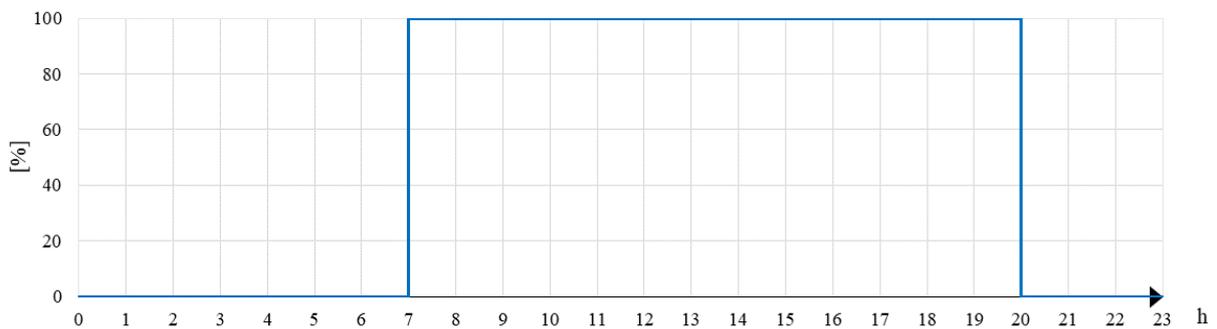


Abbildung 55: Lastprofil der internen Wärmelasten (Backöfen und warme Regale).

## Anhang D Wirtschaftlichkeitsanalyse: Weitere Resultate und Details

### D.1 Übersicht der Jahreskosten für Lugano und Davos

Tabelle 13: Jahreskosten in CHF für die Standorte Lugano und Davos.

	Strompreis: 20 Rp./kWh			Strompreis: 35 Rp./kWh		
	Steckerfertig	Steckerf. hybrid	Zentral	Steckerfertig	Steckerf. hybrid	Zentral
M340 Lugano [CHF/a]	54'000.-	53'000.-	54'000.-	66'000.-	63'000.-	63'000.-
M1250 Lugano [CHF/a]	134'000.-	121'000.-	108'000.-	171'000.-	150'000.-	134'000.-
M340 Davos [CHF/a]	52'000.-	53'000.-	54'000.-	63'000.-	62'000.-	63'000.-
M1250 Davos [CHF/a]	128'000.-	118'000.-	106'000.-	160'000.-	145'000.-	131'000.-

### D.2 Berechnung der Kapitalkosten

#### Supermarkt M340

Tabelle 14: Berechnung der Kapitalkosten gemäss Gleichung 3 für den Supermarkt M340 (gerundet auf 1000.- CHF).

Kapitalkosten Supermarkt M340				
Zinssatz für ANF	3.0%			
	Steckerfertig	Steckerf. hybrid	Zentralgekühlt	
Total Investitionskosten	253'000	327'000	382'000	[CHF]
Investitionskosten Kälteanlage	167'000	232'000	290'000	[CHF]
Lebensdauer Kälteanlage	15	15	15	[a]
ANF Kälteanlage	0.08377	0.08377	0.08377	[1/a]
Kapitalkosten Kälteanlage	13'989	19'434	24'292	[CHF/a]
Investitionskosten Kühlmöbel	86'000	95'000	92'000	[CHF]
Lebensdauer Kühlmöbel	7	12	15	[a]
ANF Kühlmöbel	0.16051	0.10046	0.08377	[1/a]
Kapitalkosten Kühlmöbel	13'804	9'544	7'707	[CHF/a]
<b>Kapitalkosten</b>	<b>28'000</b>	<b>29'000</b>	<b>32'000</b>	<b>[CHF/a]</b>

## Supermarkt M1250

Tabelle 15: Berechnung der Kapitalkosten gemäss Gleichung 3 für den Supermarkt M1250 (gerundet auf 1000.- CHF).

Kapitalkosten Supermarkt M1250				
Zinssatz für ANF	3.0%			
	Steckerfertig	Steckerf. hybrid	Zentralgekühlt	
Total Investitionskosten	563'000	688'000	675'000	[CHF]
Investitionskosten Kälteanlage	298'000	467'000	461'000	[CHF]
Lebensdauer Kälteanlage	15	15	15	[a]
ANF Kälteanlage	0.08377	0.08377	0.08377	[1/a]
Kapitalkosten Kälteanlage	24'962	39'119	38'616	[CHF/a]
Investitionskosten Kühlmöbel	265'000	221'000	214'000	[CHF]
Lebensdauer Kühlmöbel	7	12	15	[a]
ANF Kühlmöbel	0.16051	0.10046	0.08377	[1/a]
Kapitalkosten Kühlmöbel	42'534	22'202	17'926	[CHF/a]
<b>Kapitalkosten</b>	<b>67'000</b>	<b>61'000</b>	<b>57'000</b>	<b>[CHF/a]</b>

## D.3 Berechnung der Instandhaltungskosten

### Supermarkt M340

Tabelle 16: Berechnung der Instandhaltungskosten gemäss Gleichung 5 für den Supermarkt M340 (gerundet auf 1'000.- CHF).

Instandhaltungskosten Supermarkt M340				
	Steckerfertig	Steckerf. hybrid	Zentralgekühlt	
Kältemittel	Propan	Propan	CO2	
Sicherheitsklasse	A3	A3	A1	
Rückkühler	trocken	trocken	trocken	
Investitionskosten <i>IC</i>	253'000	327'000	382'000	
Basiskosten <i>BC</i>	8'000	8'000	7'000	[CHF/a]
Faktor <i>f</i>	0.025	0.025	0.020	[-]
<b>Unterhaltskosten</b>	<b>9'000</b>	<b>11'000</b>	<b>11'000</b>	<b>[CHF/a]</b>

## Supermarkt M1250

Tabelle 17: Berechnung der Instandhaltungskosten gemäss Gleichung 5 für den Supermarkt M1250 (gerundet auf 1'000.- CHF).

Instandhaltungskosten Supermarkt M1250				
	Steckerfertig	Steckerf. hybrid	Zentralgekühlt	
Kältemittel	Propan	Propan	CO2	
Sicherheitsklasse	A3	A3	A1	
Rückkühler	trocken	trocken	trocken	
Investitionskosten <i>IC</i>	563'000	688'000	675'000	
Basiskosten <i>BC</i>	8'000	8'000	7'000	[CHF/a]
Faktor <i>f</i>	0.025	0.025	0.020	[-]
<b>Unterhaltskosten</b>	<b>17'000</b>	<b>20'000</b>	<b>17'000</b>	<b>[CHF/a]</b>

## D.4 Berechnung der Betriebskosten

Tabelle 18: Berechnung der Betriebskosten gemäss Gleichung 6 (gerundet auf 1'000.- CHF).

		Strompreis: 20 Rp./kWh			Strompreis: 35 Rp./kWh		
		Steckerfertig	Steckerf. hybrid	Zentral	Steckerfertig	Steckerf. hybrid	Zentral
M340 Zürich	Strombedarf [kWh/a]	79'907	64'060	57'316	79'907	64'060	57'316
	Betriebskosten [CHF/a]	16'000.-	13'000.-	11'000.-	28'000.-	22'000.-	20'000.-
M1250 Zürich	Strombedarf [kWh/a]	234'441	189'330	169'183	234'441	189'330	169'183
	Betriebskosten [CHF/a]	47'000.-	38'000.-	34'000.-	82'000.-	66'000.-	59'000.-
M340 Lugano	Strombedarf [kWh/a]	83'924	65'567	58'129	83'924	65'567	58'129
	Betriebskosten [CHF/a]	17'000.-	13'000.-	12'000.-	29'000.-	23'000.-	20'000.-
M1250 Lugano	Strombedarf [kWh/a]	246'103	194'979	173'127	246'103	194'979	173'127
	Betriebskosten [CHF/a]	49'000.-	39'000.-	35'000.-	86'000.-	68'000.-	61'000.-
M340 Davos	Strombedarf [kWh/a]	73'725	62'275	56'911	73'725	62'275	56'911
	Betriebskosten [CHF/a]	15'000.-	12'000.-	11'000.-	26'000.-	22'000.-	20'000.-
M1250 Davos	Strombedarf [kWh/a]	215'333	182'128	165'708	215'333	182'128	165'708
	Betriebskosten [CHF/a]	43'000.-	36'000.-	33'000.-	75'000.-	64'000.-	58'000.-

## Anhang E Details Berechnung Variante 1: Steckerfertig

Nachfolgend sind die einzelnen Berechnungsschritte für alle Simulations-Konfigurationen mit Variante 1 näher beschrieben.

### E.1 Stündlich berechnete Werte allgemein

Verflüssigungstemperatur Kühlmöbel ( $T_{C,KüMö}$ )

$$T_{C,KüMö} = T_{SM} + \Delta T_{C,KüMö}$$

Verflüssigungstemperatur zusätzliche Kälte-Wärme-Maschine ( $T_{C,KWM}$ )

$$T_{C,KWM} = T_A + \Delta T_{KWM} + \Delta T_{RK}$$

Verdampfungstemperatur zusätzliche Kältemaschine/Wärmepumpe ( $T_{0,KWM}$ )

$$T_{0,KWM} = T_A - \Delta T_{KWM} - \Delta T_{RK}$$

### E.2 Stündlich berechnete Wärmeströme

Wärmestrom durch Transmission Verkaufsfläche ( $\dot{Q}_{trans,VF}$ )

$$\text{Wenn } T_{A,EGM} < 19\text{ °C} \quad \rightarrow \dot{Q}_{trans,VF} = \left( \frac{\dot{Q}_{d,heiz,VF}}{19\text{ °C} - (-8\text{ °C})} \right) \cdot (T_{A,EGM} - 19\text{ °C})$$

$$\text{Wenn } 19\text{ °C} \leq T_{A,EGM} \leq 24\text{ °C} \quad \rightarrow \dot{Q}_{trans,VF} = 0$$

$$\text{Wenn } T_{A,EGM} > 24\text{ °C} \quad \rightarrow \dot{Q}_{trans,VF} = \left( \frac{\dot{Q}_{d,kühl,VF}}{35\text{ °C} - 24\text{ °C}} \right) \cdot (T_{A,EGM} - 24\text{ °C})$$

Wärmestrom durch Transmission Bürofläche ( $\dot{Q}_{trans,BF}$ )

$$\text{Wenn } T_{A,EGM} < 21\text{ °C} \quad \rightarrow \dot{Q}_{trans,BF} = \left( \frac{\dot{Q}_{d,heiz,BF}}{21\text{ °C} - (-8\text{ °C})} \right) \cdot (T_{A,EGM} - 21\text{ °C})$$

$$\text{Wenn } 21\text{ °C} \leq T_{A,EGM} \leq 24\text{ °C} \quad \rightarrow \dot{Q}_{trans,BF} = 0$$

$$\text{Wenn } T_{A,EGM} > 24\text{ °C} \quad \rightarrow \dot{Q}_{trans,BF} = \left( \frac{\dot{Q}_{d,kühl,BF}}{35\text{ °C} - 24\text{ °C}} \right) \cdot (T_{A,EGM} - 24\text{ °C})$$

Wärmestrom durch Infiltration ( $\dot{Q}_{inf}$ )

$$\dot{Q}_{inf} = n_{Kunden} \cdot \dot{v}_{inf} \cdot \rho_{L,mIA} \cdot c_{p,L,mIA} \cdot (T_A - T_{SM})$$

Wärmeeintrag durch Kundschaft ( $\dot{Q}_{Kunden}$ )

$$\dot{Q}_{Kunden} = n_{Kunden} \cdot \dot{q}_{Kunden}$$

Wärmeeintrag durch interne Lasten ( $\dot{Q}_{int}$ )

$$\dot{Q}_{int} = \eta_{Last,int} \cdot \dot{Q}_{int,max}$$

Wärmeeintrag durch Beleuchtung der Verkaufsfläche ( $\dot{Q}_{Licht}$ )

$$\text{Wenn Supermarkt offen} \quad \rightarrow \dot{Q}_{Licht} = A_{VF} \cdot \dot{q}_{Licht}$$

$$\text{Wenn Supermarkt geschlossen} \quad \rightarrow \dot{Q}_{Licht} = 0$$

### Wärmeeintrag durch Abwärme Plus- und Minuskühlraum ( $\dot{Q}_{PKR}$ und $\dot{Q}_{MKR}$ )

$$T_{C,KR} = T_{SM} + \Delta T_{C,KR}$$

$$\begin{aligned} \text{Wenn } T_{C,KR} \leq 25 \text{ }^\circ\text{C} & \rightarrow EER_{PKR} = 3.71 & \rightarrow EER_{MKR} = 1.75 \\ \text{sonst} & \rightarrow EER_{PKR} = 7.6029 e^{-0.029 T_{C,KR}} & \rightarrow EER_{MKR} = 3.1789 e^{-0.024 T_{C,KR}} \end{aligned}$$

$$\dot{Q}_{C,PKR} = \dot{Q}_{0,PKR,max} + \frac{\dot{Q}_{0,PKR,max}}{EER_{PKR}} \rightarrow \dot{Q}_{PKR} = \eta_{Last,PKR} \cdot \dot{Q}_{C,PKR}$$

$$\dot{Q}_{C,MKR} = \dot{Q}_{0,MKR,max} + \frac{\dot{Q}_{0,MKR,max}}{EER_{MKR}} \rightarrow \dot{Q}_{MKR} = \eta_{Last,MKR} \cdot \dot{Q}_{C,MKR}$$

### Wärmeeintrag durch Abwärme Aktionskühler ( $\dot{Q}_{AK}$ )

$$\begin{aligned} \text{Wenn } T_{C,KüMö} \leq 25 \text{ }^\circ\text{C} & \rightarrow f_{EER,AK} = 0.73 \\ & \rightarrow EER_{AK} = 3.44 \\ \text{sonst} & \rightarrow f_{EER,AK} = 0.3557 e^{0.0292 T_{C,KüMö}} \\ & \rightarrow EER_{AK} = 7.0367 e^{-0.029 T_{C,KüMö}} \end{aligned}$$

$$f_{Tstd,AK} = \frac{T_{SM} - T_{PK}}{25 \text{ }^\circ\text{C} - T_{PK}} \cdot f_{EER,AK}$$

$$\begin{aligned} \text{Wenn } T_A \leq 0 \text{ }^\circ\text{C} & \rightarrow f_{RF,AK} = 0.60 \\ \text{sonst} & \rightarrow f_{RF,AK} = \frac{T_A - 35}{87.5} + 1 \end{aligned}$$

$$\text{Wenn Supermarkt offen} \rightarrow f_{\text{ös},AK} = \left( \frac{TECAK + 0.015}{TECAK} \right)$$

$$\text{Wenn Supermarkt geschlossen} \rightarrow f_{\text{ös},AK} = \left( \frac{TECAK - 0.015}{TECAK} \right)$$

$$f_{Kunden,AK} = \frac{0.002 \cdot (T_{SM} - T_{PK})}{3600} \cdot \frac{l_{tot,AK} \cdot b_{disp,AK}}{l_{ref,AK} \cdot b_{ref,AK}} \cdot \left( \frac{75 \cdot \eta_{Kunden}}{37.85} - 75 \right) \cdot \frac{1}{EER_{AK}}$$

$$hTEC_{std,AK} = \frac{TECAK}{24}$$

$$hTEC_{real,AK} = hTEC_{std,AK} \cdot f_{Tstd,AK} \cdot f_{RF,AK} \cdot f_{\text{ös},AK} + f_{Kunden,AK} \cdot f_{RF,AK}$$

$$\dot{Q}_{AK} = hTEC_{real,AK} \cdot n_{AK}$$

### Wärmeeintrag durch Abwärme Pluskühlmöbel vertikal geschlossen ( $\dot{Q}_{PKVG}$ )

$$\begin{aligned} \text{Wenn } T_{C,KüMö} \leq 25 \text{ }^\circ\text{C} & \rightarrow f_{EER,PKVG} = 0.73 \\ & \rightarrow EER_{PKVG} = 2.54 \\ \text{sonst} & \rightarrow f_{EER,PKVG} = 0.3557 e^{0.0292 T_{C,KüMö}} \\ & \rightarrow EER_{PKVG} = 5.19 e^{-0.029 T_{C,KüMö}} \end{aligned}$$

$$f_{Tstd,PKVG} = \frac{T_{SM} - T_{PK}}{25 \text{ }^\circ\text{C} - T_{PK}} \cdot f_{EER,PKVG}$$

$$\begin{aligned} \text{Wenn } T_A \leq 0 \text{ }^\circ\text{C} & \rightarrow f_{RF,PKVG} = 0.60 \\ \text{sonst} & \rightarrow f_{RF,PKVG} = \frac{T_A - 35}{87.5} + 1 \end{aligned}$$

Wenn Supermarkt offen  $\rightarrow f_{\text{ös,PKVG}} = \left( \frac{\text{TEC}_{\text{PKVG}} + 6 \cdot P_{\text{Licht,PKVG}}}{\text{TEC}_{\text{PKVG}}} \right)$

Wenn Supermarkt geschlossen  $\rightarrow f_{\text{ös,PKVG}} = \left( \frac{\text{TEC}_{\text{PKVG}} - 6 \cdot P_{\text{Licht,PKVG}}}{\text{TEC}_{\text{PKVG}}} \right)$

$$f_{\text{Kunden,PKVG}} = \frac{0.1465 \cdot (T_{\text{SM}} - T_{\text{PK}})}{3600} \cdot \frac{l_{\text{Tür,PKVG}} \cdot h_{\text{std,PKVG}}}{l_{\text{ref,PKVG}} \cdot h_{\text{ref,PKVG}}} \cdot n_{\text{Tür,PKVG}} \cdot \left( \frac{75 \cdot \eta_{\text{Kunden}}}{37.85} - 75 \right) \cdot \frac{1}{\text{EER}_{\text{PKVG}}}$$

$$h\text{TEC}_{\text{std,PKVG}} = \frac{\text{TEC}_{\text{PKVG}}}{24} \cdot \frac{V_{\text{std,PKVG}}}{V_{\text{PKVG}}}$$

$$h\text{TEC}_{\text{real,PKVG}} = h\text{TEC}_{\text{std,PKVG}} \cdot f_{\text{Tstd,PKVG}} \cdot f_{\text{RF,PKVG}} \cdot f_{\text{ös,PKVG}} + f_{\text{Kunden,PKVG}} \cdot f_{\text{RF,PKVG}}$$

Wenn Supermarkt offen  $\rightarrow P_{\text{int,PKVG}} = (P_{\text{Licht,PKVG}} + P_{\text{vent,PKVG}}) \cdot \frac{V_{\text{std,PKVG}}}{V_{\text{PKVG}}}$

Wenn Supermarkt geschlossen  $\rightarrow P_{\text{int,PKVG}} = P_{\text{vent,PKVG}} \cdot \frac{V_{\text{std,PKVG}}}{V_{\text{PKVG}}}$

$$\dot{Q}_{\text{PKVG}} = (h\text{TEC}_{\text{real,PKVG}} - P_{\text{int,PKVG}}) \cdot n_{\text{PKVG}}$$

Wärmeeintrag durch Abwärme Minuskühlmöbel vertikal geschlossen ( $\dot{Q}_{\text{MKVG}}$ )

Wenn  $T_{\text{C,KüMö}} \leq 25 \text{ °C}$   $\rightarrow f_{\text{EER,MKVG}} = 0.79$

$$\rightarrow \text{EER}_{\text{MKVG}} = 1.98$$

sonst  $\rightarrow f_{\text{EER,MKVG}} = 0.4429 e^{0.0233 T_{\text{C,KüMö}}}$

$$\rightarrow \text{EER}_{\text{MKVG}} = 3.5314 e^{-0.023 T_{\text{C,KüMö}}}$$

$$f_{\text{Tstd,MKVG}} = \frac{T_{\text{SM}} - T_{\text{MK}}}{25 \text{ °C} - T_{\text{MK}}} \cdot f_{\text{EER,MKVG}}$$

Wenn  $T_{\text{A}} \leq 0 \text{ °C}$   $\rightarrow f_{\text{RF,MKVG}} = 0.60$

sonst  $\rightarrow f_{\text{RF,MKVG}} = \frac{T_{\text{A}} - 35}{87.5} + 1$

Wenn Supermarkt offen  $\rightarrow f_{\text{ös,MKVG}} = \left( \frac{\text{TEC}_{\text{MKVG}} + 6 \cdot P_{\text{Licht,MKVG}}}{\text{TEC}_{\text{MKVG}}} \right)$

Wenn Supermarkt geschlossen  $\rightarrow f_{\text{ös,MKVG}} = \left( \frac{\text{TEC}_{\text{MKVG}} - 6 \cdot P_{\text{Licht,MKVG}}}{\text{TEC}_{\text{MKVG}}} \right)$

$$f_{\text{Kunden,MKVG}} = \frac{0.180 \cdot (T_{\text{SM}} - T_{\text{MK}})}{3600} \cdot \frac{l_{\text{Tür,MKVG}} \cdot h_{\text{std,MKVG}}}{l_{\text{ref,MKVG}} \cdot h_{\text{ref,MKVG}}} \cdot n_{\text{Tür,MKVG}} \cdot \left( \frac{18 \cdot \eta_{\text{Kunden}}}{37.85} - 18 \right) \cdot \frac{1}{\text{EER}_{\text{MKVG}}}$$

$$h\text{TEC}_{\text{std,MKVG}} = \frac{\eta_{\text{hd}} \cdot \text{TEC}_{\text{MKVG}}}{24} \cdot \frac{V_{\text{std,MKVG}}}{V_{\text{MKVG}}}$$

$$h\text{TEC}_{\text{real,MKVG}} = h\text{TEC}_{\text{std,MKVG}} \cdot f_{\text{Tstd,MKVG}} \cdot f_{\text{RF,MKVG}} \cdot f_{\text{ös,MKVG}} + f_{\text{Kunden,MKVG}} \cdot f_{\text{RF,MKVG}}$$

Wenn Supermarkt offen  $\rightarrow P_{\text{int,MKVG}} = (P_{\text{Licht,MKVG}} + P_{\text{vent,MKVG}}) \cdot \frac{V_{\text{std,MKVG}}}{V_{\text{MKVG}}}$

Wenn Supermarkt geschlossen  $\rightarrow P_{\text{int,MKVG}} = P_{\text{vent,MKVG}} \cdot \frac{V_{\text{std,MKVG}}}{V_{\text{MKVG}}}$

$$\dot{Q}_{\text{MKVG}} = (h\text{TEC}_{\text{real,MKVG}} - P_{\text{int,MKVG}}) \cdot n_{\text{MKVG}}$$

Wärmeeintrag durch Abwärme Pluskühlmöbel vertikal offen ( $\dot{Q}_{PKVO}$ )

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Grössen  $l_{ref,PKVG}$  und  $h_{ref,PKVG}$  bewusst verwendet werden.

Wenn Supermarkt M1250

(Supermarkt M1250 ohne PKVO)

$$\rightarrow \dot{Q}_{PKVO} = 0$$

Wenn Supermarkt M340

$$\begin{aligned} \text{Wenn } T_{C,KüMö} \leq 25 \text{ °C} & \rightarrow f_{EER,PKVO} = 0.73 \\ & \rightarrow EER_{PKVO} = 3.48 \\ \rightarrow \text{sonst} & \rightarrow f_{EER,PKVO} = 0.3557 e^{0.0292 T_{C,KüMö}} \\ & \rightarrow EER_{PKVO} = 7.127 e^{-0.029 T_{C,KüMö}} \end{aligned}$$

$$f_{Tstd,PKVO} = \frac{T_{SM} - T_{PK}}{25 \text{ °C} - T_{PK}} \cdot f_{EER,PKVO}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \text{Wenn Supermarkt offen und } T_A \leq 0 \text{ °C} & \rightarrow f_{RF,PKVO} = 0.50 \\ \rightarrow \text{Wenn Supermarkt offen und } T_A > 0 \text{ °C} & \rightarrow f_{RF,PKVO} = \frac{T_A - 35}{70} + 1 \\ \rightarrow \text{sonst} & \rightarrow f_{RF,PKVO} = 0.50 \\ \rightarrow \text{Wenn Supermarkt offen} & \rightarrow f_{\text{ös},PKVO} = \left( \frac{TEC_{PKVO} + 6 \cdot P_{Licht,PKVO}}{TEC_{PKVO}} \right) \cdot 1.20 \\ \rightarrow \text{Wenn Supermarkt geschlossen} & \rightarrow f_{\text{ös},PKVO} = \left( \frac{TEC_{PKVO} - 6 \cdot P_{Licht,PKVO}}{TEC_{PKVO}} \right) \cdot 0.80 \end{aligned}$$

$$\rightarrow f_{Kunden,PKVO} = \frac{0.1465 \cdot (T_{SM} - T_{PK})}{3600} \cdot \frac{l_{disp,PKVO} \cdot h_{std,PKVO}}{l_{ref,PKVG} \cdot h_{ref,PKVG}} \cdot \left( \frac{75 \cdot \eta_{Kunden}}{37.85} - 75 \right) \cdot \frac{1}{EER_{PKVO}}$$

$$\rightarrow hTEC_{std,PKVO} = \frac{TEC_{PKVO}}{24} \cdot \frac{V_{std,PKVO}}{V_{PKVO}}$$

$$\rightarrow hTEC_{real,PKVO} = hTEC_{std,PKVO} \cdot f_{Tstd,PKVO} \cdot f_{RF,PKVO} \cdot f_{\text{ös},PKVO} + f_{Kunden,PKVO} \cdot f_{RF,PKVO}$$

$$\rightarrow \text{Wenn Supermarkt offen} \rightarrow P_{int,PKVO} = (P_{Licht,PKVO} + P_{vent,PKVO}) \cdot \frac{V_{std,PKVO}}{V_{PKVO}}$$

$$\rightarrow \text{Wenn Supermarkt geschlossen} \rightarrow P_{int,PKVO} = P_{vent,PKVO} \cdot \frac{V_{std,PKVO}}{V_{PKVO}}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{PKVO} = (hTEC_{real,PKVO} - P_{int,PKVO}) \cdot n_{PKVO}$$

Wärmebedarf Temperierung Frischluft ( $\dot{Q}_{bed,FL}$ )

$$\text{Wenn } 19 \text{ °C} \leq T_A \leq 24 \text{ °C} \rightarrow \dot{Q}_{bed,FL} = 0$$

$$\text{sonst} \rightarrow \dot{Q}_{bed,FL} = \dot{v}_{Kunden} \cdot n_{Kunden} \cdot \rho_{L,mIA} \cdot c_{p,L,mIA} \cdot (T_A - T_{SM}) \cdot (1 - \eta_{WRG})$$

Wärmebedarf Bürofläche ( $\dot{Q}_{bed,BF}$ )

$$\dot{Q}_{bed,BF} = \dot{Q}_{trans,BF}$$

Wärmebedarf Verkaufsfläche ( $\dot{Q}_{bed,VF}$ )

$$\dot{Q}_{bed,VF} = \dot{Q}_{trans,VF} + \dot{Q}_{inf} + \dot{Q}_{Kunden} + \dot{Q}_{int} + \dot{Q}_{Licht} + \dot{Q}_{PKR} + \dot{Q}_{MKR} + \dot{Q}_{AK} + \dot{Q}_{PKVG} + \dot{Q}_{MKVG} + \dot{Q}_{PKVO}$$

### E.3 Mittelung Wärmebedarf Verkaufsfläche

Das dynamische Verhalten der Gebäudemasse um die Verkaufsfläche wird durch einen einfachen gleitenden Mittelwert ihres Wärmebedarfs über 24 h berücksichtigt.

$$\dot{Q}_{bed,VF,EGM}(t) = \frac{1}{24} \cdot \sum_{i=1}^{24} \dot{Q}_{bed,VF}(t-i)$$

### E.4 Stündlich berechnete Strombedarfe

Strombedarf zur Beleuchtung der Verkaufsfläche ( $P_{Licht}$ )

$$P_{Licht} = \dot{Q}_{Licht}$$

Strombedarf interner Wärmelasten ( $P_{int}$ )

$$P_{int} = \dot{Q}_{int}$$

Strombedarf der Ventilatoren für Frischluft und Wärmeverteilung ( $P_{vent}$ )

$$P_{vent,FL} = \dot{v}_{Kunden} \cdot n_{Kunden} \cdot \mu_{vent}$$

$$P_{vent,vert} = \dot{V}_{vert} \cdot \mu_{vent}$$

$$P_{vent} = P_{vent,FL} + P_{vent,vert}$$

Strombedarf zusätzliche Kälte-Wärme-Maschine ( $P_{KWM}$ )

$$\text{Wenn } T_{C,KWM} \leq 32 \text{ °C} \quad \rightarrow EER_{Tc} = 7.86$$

$$\text{sonst} \quad \rightarrow EER_{Tc} = 2208.5 T_{C,KWM}^{-1.627}$$

$$\text{Wenn } T_{0,KWM} \geq 15 \text{ °C} \quad \rightarrow COP_{T0} = 8.92$$

$$\text{sonst} \quad \rightarrow COP_{T0} = 0.0001 T_{0,KWM}^3 + 0.005 T_{0,KWM}^2 + 0.1496 T_{0,KWM} + 5.1536$$

$$\text{Wenn } |\dot{Q}_{bed,VF,EGM}| + |\dot{Q}_{bed,BF}| + |\dot{Q}_{bed,FL}| = 0 \quad \text{Kein Hauptbedarf}$$

$$\rightarrow P_{KWM} = 0$$

$$\text{Wenn } \dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL} > 0 \quad \text{Hauptbedarf kühlen}$$

$$\rightarrow \text{Wenn } \dot{Q}_{bed,VF,EGM} \geq 0$$

$$\rightarrow \text{Wenn } \dot{Q}_{bed,BF} \geq 0 \text{ und } T_A \geq T_{SM}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{kühl} = \dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = 0$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{C,KWM} = \frac{\dot{Q}_{kühl}}{EER_{Tc}} + \dot{Q}_{kühl}$$

$$\rightarrow P_{KWM} = \frac{\dot{Q}_{kühl}}{EER_{Tc}}$$

$$\rightarrow \text{Wenn } \dot{Q}_{bed,BF} < 0 \text{ und } T_A \geq T_{SM}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{kühl} = \dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,FL}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,BF}|$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{C,KWM} = \frac{\dot{Q}_{kühl}}{EER_{KWM}} + \dot{Q}_{kühl}$$

$$\rightarrow P_{KWM} = \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\frac{\dot{Q}_{heiz}}{Q_{C,KWM}} \cdot EER_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{heiz}}{Q_{C,KWM}}\right) \cdot EER_{Tc}}$$

→ Wenn  $\dot{Q}_{bed,BF} \geq 0$  und  $T_A < T_{SM}$

$$\rightarrow \dot{Q}_{kühl} = \dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,FL}|$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{C,KWM} = \frac{\dot{Q}_{kühl}}{EER_{KWM}} + \dot{Q}_{kühl}$$

$$\rightarrow P_{KWM} = \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\frac{\dot{Q}_{heiz}}{Q_{C,KWM}} \cdot EER_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{heiz}}{Q_{C,KWM}}\right) \cdot EER_{Tc}}$$

→ Wenn  $\dot{Q}_{bed,BF} < 0$  und  $T_A < T_{SM}$

$$\rightarrow \dot{Q}_{kühl} = \dot{Q}_{bed,VF,EGM}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL}|$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{C,KWM} = \frac{\dot{Q}_{kühl}}{EER_{KWM}} + \dot{Q}_{kühl}$$

$$\rightarrow P_{KWM} = \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\frac{\dot{Q}_{heiz}}{Q_{C,KWM}} \cdot EER_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{heiz}}{Q_{C,KWM}}\right) \cdot EER_{Tc}}$$

→ Wenn  $\dot{Q}_{bed,VF,EGM} < 0$

→ Wenn  $\dot{Q}_{bed,BF} \geq 0$  und  $T_A > T_{SM}$

$$\rightarrow \dot{Q}_{kühl} = \dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,VF,EGM}|$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{C,KWM} = \frac{\dot{Q}_{kühl}}{EER_{KWM}} + \dot{Q}_{kühl}$$

$$\rightarrow P_{KWM} = \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\frac{\dot{Q}_{heiz}}{Q_{C,KWM}} \cdot EER_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{heiz}}{Q_{C,KWM}}\right) \cdot EER_{Tc}}$$

→ Wenn  $\dot{Q}_{bed,BF} < 0$  und  $T_A > T_{SM}$

$$\rightarrow \dot{Q}_{kühl} = \dot{Q}_{bed,FL}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF}|$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{C,KWM} = \frac{\dot{Q}_{kühl}}{EER_{KWM}} + \dot{Q}_{kühl}$$

$$\rightarrow P_{KWM} = \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\frac{\dot{Q}_{heiz}}{Q_{C,KWM}} \cdot EER_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{heiz}}{Q_{C,KWM}}\right) \cdot EER_{Tc}}$$

→ Wenn  $\dot{Q}_{bed,BF} \geq 0$  und  $T_A \leq T_{SM}$

$$\rightarrow \dot{Q}_{kühl} = \dot{Q}_{bed,BF}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,FL}|$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{C,KWM} = \frac{\dot{Q}_{kühl}}{EER_{KWM}} + \dot{Q}_{kühl}$$

$$\rightarrow P_{KWM} = \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\frac{\dot{Q}_{heiz}}{Q_{C,KWM}} \cdot EER_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{heiz}}{Q_{C,KWM}}\right) \cdot EER_{Tc}}$$

Wenn  $\dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL} < 0$

Hauptbedarf heizen

→ Wenn  $\dot{Q}_{bed,VF,EGM} < 0$

→ Wenn  $\dot{Q}_{bed,BF} \leq 0$  und  $T_A < T_{SM}$

$$\rightarrow \dot{Q}_{kühl} = 0$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL}|$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{0,KWM} = \dot{Q}_{heiz} - \frac{\dot{Q}_{heiz}}{COP_{KWM}}$$

$$\rightarrow P_{KWM} = \frac{\dot{Q}_{heiz}}{COP_{T0}}$$

→ Wenn  $\dot{Q}_{bed,BF} > 0$  und  $T_A < T_{SM}$

$$\rightarrow \dot{Q}_{kühl} = \dot{Q}_{bed,BF}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,FL}|$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{0,KWM} = \dot{Q}_{heiz} - \frac{\dot{Q}_{heiz}}{COP_{KWM}}$$

$$\rightarrow P_{KWM} = \frac{\dot{Q}_{heiz}}{\frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}} \cdot COP_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}}\right) \cdot COP_{T0}}$$

→ Wenn  $\dot{Q}_{bed,BF} \leq 0$  und  $T_A \geq T_{SM}$

$$\rightarrow \dot{Q}_{kühl} = \dot{Q}_{bed,FL}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF}|$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{0,KWM} = \dot{Q}_{heiz} - \frac{\dot{Q}_{heiz}}{COP_{KWM}}$$

$$\rightarrow P_{KWM} = \frac{\dot{Q}_{heiz}}{\frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}} \cdot COP_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}}\right) \cdot COP_{T0}}$$

→ Wenn  $\dot{Q}_{bed,BF} > 0$  und  $T_A \geq T_{SM}$

$$\rightarrow \dot{Q}_{kühl} = \dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,VF,EGM}|$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{0,KWM} = \dot{Q}_{heiz} - \frac{\dot{Q}_{heiz}}{COP_{KWM}}$$

$$\rightarrow P_{KWM} = \frac{\dot{Q}_{heiz}}{\frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}} \cdot COP_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}}\right) \cdot COP_{T0}}$$

→ Wenn  $\dot{Q}_{bed,VF,EGM} \geq 0$

→ Wenn  $\dot{Q}_{bed,BF} \leq 0$  und  $T_A < T_{SM}$

$$\rightarrow \dot{Q}_{kühl} = \dot{Q}_{bed,VF,EGM}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL}|$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{0,KWM} = \dot{Q}_{heiz} - \frac{\dot{Q}_{heiz}}{COP_{KWM}}$$

$$\rightarrow P_{KWM} = \frac{\dot{Q}_{heiz}}{\frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}} \cdot COP_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}}\right) \cdot COP_{T0}}$$

$$\begin{aligned}
&\rightarrow \text{Wenn } \dot{Q}_{bed,BF} > 0 \text{ und } T_A < T_{SM} \\
&\quad \rightarrow \dot{Q}_{kühl} = \dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF} \\
&\quad \rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,FL}| \\
&\quad \rightarrow \dot{Q}_{0,KWM} = \dot{Q}_{heiz} - \frac{\dot{Q}_{heiz}}{COP_{KWM}} \\
&\quad \rightarrow P_{KWM} = \frac{\dot{Q}_{heiz}}{\frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}} \cdot COP_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}}\right) \cdot COP_{T0}} \\
&\rightarrow \text{Wenn } \dot{Q}_{bed,BF} \leq 0 \text{ und } T_A \geq T_{SM} \\
&\quad \rightarrow \dot{Q}_{kühl} = \dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,FL} \\
&\quad \rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,BF}| \\
&\quad \rightarrow \dot{Q}_{0,KWM} = \dot{Q}_{heiz} - \frac{\dot{Q}_{heiz}}{COP_{KWM}} \\
&\quad \rightarrow P_{KWM} = \frac{\dot{Q}_{heiz}}{\frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}} \cdot COP_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}}\right) \cdot COP_{T0}}
\end{aligned}$$

### Strombedarf der Pumpen ( $P_{Pumpen}$ )

$$\begin{aligned}
\text{Wenn } |\dot{Q}_{bed,VF,EGM}| + |\dot{Q}_{bed,BF}| + |\dot{Q}_{bed,FL}| &= 0 && \text{Kein Hauptbedarf} \\
\rightarrow \dot{Q}_{C,KWM} &= 0 \\
\rightarrow \dot{Q}_{0,KWM} &= 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Wenn } \dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL} &> 0 && \text{Hauptbedarf kühlen} \\
\rightarrow \dot{Q}_{0,KWM} &= \dot{Q}_{kühl} \\
\rightarrow \text{Wenn } \dot{Q}_{heiz} &= 0 \\
\rightarrow \dot{Q}_{C,KWM} &= P_{KWM} \cdot (EER_{Tc} + 1) \cdot 2 \\
\rightarrow \text{sonst}
\end{aligned}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{C,KWM} = P_{KWM} \cdot \left( \left( \left( \frac{\dot{Q}_{heiz}}{\dot{Q}_{C,KWM}} \right) EER_{KWM} + \left( 1 - \frac{\dot{Q}_{heiz}}{\dot{Q}_{C,KWM}} \right) EER_{Tc} \right) + 1 \right) \cdot 2 - \dot{Q}_{heiz}$$

$$\begin{aligned}
\text{Wenn } \dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL} &< 0 && \text{Hauptbedarf heizen} \\
\rightarrow \dot{Q}_{C,KWM} &= \dot{Q}_{heiz} \\
\rightarrow \text{Wenn } \dot{Q}_{kühl} &= 0 \\
\rightarrow \dot{Q}_{0,KWM} &= P_{KWM} \cdot (COP_{T0} - 1) \cdot 2 \\
\rightarrow \text{sonst}
\end{aligned}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{0,KWM} = P_{KWM} \cdot \left( \left( \left( \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}} \right) COP_{KWM} + \left( 1 - \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}} \right) COP_{T0} \right) - 1 \right) \cdot 2 - \dot{Q}_{kühl}$$

$$P_{Pumpen,Kalt} = \frac{\dot{Q}_{0,KWM}}{ETV_{Kalt,Pumpen}}$$

$$P_{Pumpen,Warm} = \frac{\dot{Q}_{C,KWM}}{ETV_{Warm,Pumpen}}$$

$$P_{Pumpen} = P_{Pumpen,Kalt} + P_{Pumpen,Warm}$$

Strombedarf der Ventilatoren zur Rückkühlung ( $P_{RK,vent}$ )

Wenn  $|\dot{Q}_{bed,VF,EGM}| + |\dot{Q}_{bed,BF}| + |\dot{Q}_{bed,FL}| = 0$  Kein Hauptbedarf  
 $\rightarrow \dot{Q}_{RK} = 0$

Wenn  $\dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL} > 0$  Hauptbedarf kühlen  
 $\rightarrow \dot{Q}_{RK} = P_{KWM} \cdot \left( \left( \left( \frac{\dot{Q}_{heiz}}{\dot{Q}_{C,KWM}} \right) EER_{KWM} + \left( 1 - \frac{\dot{Q}_{heiz}}{\dot{Q}_{C,KWM}} \right) EER_{Tc} \right) + 1 \right) - \dot{Q}_{heiz}$

Wenn  $\dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL} < 0$  Hauptbedarf heizen  
 $\rightarrow \dot{Q}_{RK} = P_{KWM} \cdot \left( \left( \left( \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{o,KWM}} \right) COP_{KWM} + \left( 1 - \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{o,KWM}} \right) COP_{T0} \right) - 1 \right) - \dot{Q}_{kühl}$

$$P_{RK,vent} = \frac{\dot{Q}_{RK}}{ETV_{RK,vent}}$$

Strombedarf Kühlräume ( $P_{PKR}$  und  $P_{MKR}$ )

$$P_{PKR} = \eta_{Last,PKR} \cdot \frac{\dot{Q}_{o,PKR,max}}{EER_{PKR}}$$

$$P_{MKR} = \eta_{Last,MKR} \cdot \frac{\dot{Q}_{o,MKR,max}}{EER_{MKR}}$$

Strombedarf Aktionskühler ( $P_{AK}$ )

$$P_{AK} = \dot{Q}_{AK}$$

Strombedarf Pluskühlmöbel vertikal geschlossen ( $P_{PKVG}$ )

$$P_{PKVG} = hTEC_{real,PKVG} \cdot n_{PKVG}$$

Strombedarf Minuskühlmöbel vertikal geschlossen ( $P_{MKVG}$ )

$$P_{MKVG} = \left( hTEC_{real,MKVG} + \left( (1 - \eta_{hd}) \cdot f_{RF,MKVG} \cdot f_{Tstd,MKVG} \cdot \frac{TEC_{MKVG}}{24} \cdot \frac{V_{std,MKVG}}{V_{MKVG}} \right) \right) \cdot n_{MKVG}$$

Strombedarf Pluskühlmöbel vertikal offen ( $P_{PKVO}$ )

Wenn Supermarkt M1250  $\rightarrow P_{PKVO} = 0$  (Supermarkt M1250 ohne PKVO)

Wenn Supermarkt M340  $\rightarrow P_{PKVO} = hTEC_{real,PKVO} \cdot n_{PKVO}$

Strombedarf Supermarkt total ( $P_{SM,tot}$ )

$$P_{SM,tot} = P_{Licht} + P_{int} + P_{vent} + P_{KWM} + P_{Pumpen} + P_{RK,vent} + P_{PKR} + P_{MKR} + P_{AK} + P_{PKVG} + P_{MKVG} + P_{PKVO}$$

Strombedarf Kühlsystem total ( $P_{KS,tot}$ )

$$P_{KS,tot} = P_{KWM} + P_{Pumpen} + P_{RK,vent} + P_{PKR} + P_{MKR} + P_{AK} + P_{PKVG} + P_{MKVG} + P_{PKVO}$$

## E.5 Jahressummen Strombedarf

Jahressumme Strombedarf Supermarkt total ( $P_{SM,tot,sum}$ )

$$P_{SM,tot,sum} = \sum_{i=1}^{8760} P_{SM,tot,i}$$

Jahressumme Strombedarf Kühlsystem total ( $P_{KS,tot,sum}$ )

$$P_{KS,tot,sum} = \sum_{i=1}^{8760} P_{KS,tot,i}$$

## Anhang F Details Berechnung Variante 2: Steckerfertig hybrid

Nachfolgend sind die einzelnen Berechnungsschritte für alle Simulations-Konfigurationen mit Variante 2 näher beschrieben.

### F.1 Stündlich berechnete Werte allgemein

Verflüssigungstemperatur zusätzliche Kälte-Wärme-Maschine ( $T_{C,KWM}$ )

$$T_{C,KWM} = T_A + \Delta T_{KWM} + \Delta T_{RK}$$

Verdampfungstemperatur zusätzliche Kältemaschine/Wärmepumpe ( $T_{0,KWM}$ )

$$T_{0,KWM} = T_A - \Delta T_{KWM} - \Delta T_{RK}$$

### F.2 Stündlich berechnete Wärmeströme

Wärmestrom durch Transmission Verkaufsfläche ( $\dot{Q}_{trans,VF}$ )

$$\text{Wenn } T_{A,EGM} < 19\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \dot{Q}_{trans,VF} = \left( \frac{\dot{Q}_{d,heiz,VF}}{19\text{ }^{\circ}\text{C} - (-8\text{ }^{\circ}\text{C})} \right) \cdot (T_{A,EGM} - 19\text{ }^{\circ}\text{C})$$

$$\text{Wenn } 19\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{A,EGM} \leq 24\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \dot{Q}_{trans,VF} = 0$$

$$\text{Wenn } T_{A,EGM} > 24\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \dot{Q}_{trans,VF} = \left( \frac{\dot{Q}_{d,kühl,VF}}{35\text{ }^{\circ}\text{C} - 24\text{ }^{\circ}\text{C}} \right) \cdot (T_{A,EGM} - 24\text{ }^{\circ}\text{C})$$

Wärmestrom durch Transmission Bürofläche ( $\dot{Q}_{trans,BF}$ )

$$\text{Wenn } T_{A,EGM} < 21\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \dot{Q}_{trans,BF} = \left( \frac{\dot{Q}_{d,heiz,BF}}{21\text{ }^{\circ}\text{C} - (-8\text{ }^{\circ}\text{C})} \right) \cdot (T_{A,EGM} - 21\text{ }^{\circ}\text{C})$$

$$\text{Wenn } 21\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{A,EGM} \leq 24\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \dot{Q}_{trans,BF} = 0$$

$$\text{Wenn } T_{A,EGM} > 24\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \dot{Q}_{trans,BF} = \left( \frac{\dot{Q}_{d,kühl,BF}}{35\text{ }^{\circ}\text{C} - 24\text{ }^{\circ}\text{C}} \right) \cdot (T_{A,EGM} - 24\text{ }^{\circ}\text{C})$$

Wärmestrom durch Infiltration ( $\dot{Q}_{inf}$ )

$$\dot{Q}_{inf} = n_{Kunden} \cdot \dot{v}_{inf} \cdot \rho_{L,mIA} \cdot c_{p,L,mIA} \cdot (T_A - T_{SM})$$

Wärmeeintrag durch Kundschaft ( $\dot{Q}_{Kunden}$ )

$$\dot{Q}_{Kunden} = n_{Kunden} \cdot \dot{q}_{Kunden}$$

Wärmeeintrag durch interne Lasten ( $\dot{Q}_{int}$ )

$$\dot{Q}_{int} = \eta_{Last,int} \cdot \dot{Q}_{int,max}$$

Wärmeeintrag durch Beleuchtung der Verkaufsfläche ( $\dot{Q}_{Licht}$ )

$$\text{Wenn Supermarkt offen} \quad \rightarrow \dot{Q}_{Licht} = A_{VF} \cdot \dot{q}_{Licht}$$

$$\text{Wenn Supermarkt geschlossen} \quad \rightarrow \dot{Q}_{Licht} = 0$$

### Wärmeeintrag durch Abwärme Plus- und Minuskühlraum ( $\dot{Q}_{PKR}$ und $\dot{Q}_{MKR}$ )

$$T_{C,KR} = T_A + \Delta T_{KWM} + \Delta T_{RK}$$

$$\begin{aligned} \text{Wenn } T_{C,KR} \leq 25 \text{ }^\circ\text{C} & \rightarrow EER_{PKR} = 3.71 & \rightarrow EER_{MKR} = 1.75 \\ \text{sonst} & \rightarrow EER_{PKR} = 7.6029 e^{-0.029 T_{C,KR}} & \rightarrow EER_{MKR} = 3.1789 e^{-0.024 T_{C,KR}} \end{aligned}$$

$$\dot{Q}_{C,PKR} = \dot{Q}_{0,PKR,max} + \frac{\dot{Q}_{0,PKR,max}}{EER_{PKR}} \rightarrow \dot{Q}_{PKR} = \eta_{Last,PKR} \cdot \dot{Q}_{C,PKR}$$

$$\dot{Q}_{C,MKR} = \dot{Q}_{0,MKR,max} + \frac{\dot{Q}_{0,MKR,max}}{EER_{MKR}} \rightarrow \dot{Q}_{MKR} = \eta_{Last,MKR} \cdot \dot{Q}_{C,MKR}$$

### Wärmeeintrag durch Abwärme Aktionskühler ( $\dot{Q}_{AK}$ )

$$\begin{aligned} \text{Wenn } T_{C,KüMö} \leq 25 \text{ }^\circ\text{C} & \rightarrow f_{EER,AK} = 0.73 \\ & \rightarrow EER_{AK} = 3.44 \\ \text{sonst} & \rightarrow f_{EER,AK} = 0.3557 e^{0.0292 T_{C,KüMö}} \\ & \rightarrow EER_{AK} = 7.0367 e^{-0.029 T_{C,KüMö}} \end{aligned}$$

$$f_{Tstd,AK} = \frac{T_{SM} - T_{PK}}{25 \text{ }^\circ\text{C} - T_{PK}} \cdot f_{EER,AK}$$

$$\begin{aligned} \text{Wenn } T_A \leq 0 \text{ }^\circ\text{C} & \rightarrow f_{RF,AK} = 0.60 \\ \text{sonst} & \rightarrow f_{RF,AK} = \frac{T_A - 35}{87.5} + 1 \end{aligned}$$

$$\text{Wenn Supermarkt offen} \rightarrow f_{\text{ös},AK} = \left( \frac{TECAK + 0.015}{TECAK} \right)$$

$$\text{Wenn Supermarkt geschlossen} \rightarrow f_{\text{ös},AK} = \left( \frac{TECAK - 0.015}{TECAK} \right)$$

$$f_{Kunden,AK} = \frac{0.002 \cdot (T_{SM} - T_{PK})}{3600} \cdot \frac{l_{tot,AK} \cdot b_{disp,AK}}{l_{ref,AK} \cdot b_{ref,AK}} \cdot \left( \frac{75 \cdot \eta_{Kunden}}{37.85} - 75 \right) \cdot \frac{1}{EER_{AK}}$$

$$hTEC_{std,AK} = \frac{TECAK}{24}$$

$$hTEC_{real,AK} = hTEC_{std,AK} \cdot f_{Tstd,AK} \cdot f_{RF,AK} \cdot f_{\text{ös},AK} + f_{Kunden,AK} \cdot f_{RF,AK}$$

$$\dot{Q}_{AK} = hTEC_{real,AK} \cdot n_{AK}$$

### Wärmeabtrag durch Kühlleistung von Pluskühlmöbeln vertikal geschlossen ( $\dot{Q}_{KüMö,PKVG}$ )

$$f_{Tstd,PKVG} = \frac{T_{SM} - T_{PK}}{25 \text{ }^\circ\text{C} - T_{PK}}$$

$$\begin{aligned} \text{Wenn } T_A \leq 0 \text{ }^\circ\text{C} & \rightarrow f_{RF,PKVG} = 0.60 \\ \text{sonst} & \rightarrow f_{RF,PKVG} = \frac{T_A - 35}{87.5} + 1 \end{aligned}$$

$$\text{Wenn Supermarkt offen} \rightarrow f_{\text{ös},PKVG} = \left( \frac{\dot{Q}_{0,std,PKVG} + 0.5 \cdot P_{Licht,PKVG}}{\dot{Q}_{0,std,PKVG}} \right)$$

$$\text{Wenn Supermarkt geschlossen} \rightarrow f_{\text{ös},PKVG} = \left( \frac{\dot{Q}_{0,std,PKVG} - 0.5 \cdot P_{Licht,PKVG}}{\dot{Q}_{0,std,PKVG}} \right)$$

$$f_{Kunden,PKVG} = \frac{0.1465 \cdot (T_{SM} - T_{PK})}{3600} \cdot \frac{l_{Tür,PKVG} \cdot h_{std,PKVG}}{l_{ref,PKVG} \cdot h_{ref,PKVG}} \cdot n_{Tür,PKVG} \cdot \left( \frac{75 \cdot \eta_{Kunden}}{37.85} - 75 \right)$$

$$\dot{Q}_{0,PKVG} = \dot{Q}_{0,std,PKVG} \cdot \frac{V_{std,PKVG}}{V_{PKVG}} \cdot f_{Tstd,PKVG} \cdot f_{RF,PKVG} \cdot f_{\dot{O}_S,PKVG} + f_{Kunden,PKVG} \cdot f_{RF,PKVG}$$

$$\text{Wenn } T_A \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \rightarrow \eta_{sens,PKVG} = 0.85$$

$$\text{sonst} \quad \rightarrow \eta_{sens,PKVG} = \frac{35-T_A}{102.9} + 0.51$$

$$\text{Wenn Supermarkt offen} \quad \rightarrow P_{int,PKVG} = (P_{Licht,PKVG} + P_{vent,PKVG}) \cdot \frac{V_{std,PKVG}}{V_{PKVG}}$$

$$\text{Wenn Supermarkt geschlossen} \quad \rightarrow P_{int,PKVG} = P_{vent,PKVG} \cdot \frac{V_{std,PKVG}}{V_{PKVG}}$$

$$\dot{Q}_{K\u00fcm\u00f6,PKVG} = -1 \cdot (\dot{Q}_{0,PKVG} - P_{int,PKVG}) \cdot \eta_{sens,PKVG} \cdot n_{PKVG}$$

W\u00e4rmeaustrag durch K\u00fchlleistung von Minusk\u00fchlm\u00f6beln vertikal geschlossen ( $\dot{Q}_{K\u00fcm\u00f6,MKVG}$ )

$$f_{Tstd,MKVG} = \frac{T_{SM} - T_{MK}}{25 \text{ } ^\circ\text{C} - T_{MK}}$$

$$\text{Wenn } T_A \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \rightarrow f_{RF,MKVG} = 0.60$$

$$\text{sonst} \quad \rightarrow f_{RF,MKVG} = \frac{T_A - 35}{87.5} + 1$$

$$\text{Wenn Supermarkt offen} \quad \rightarrow f_{\dot{O}_S,MKVG} = \left( \frac{\dot{Q}_{0,std,MKVG} + 0.5 \cdot P_{Licht,MKVG}}{\dot{Q}_{0,std,MKVG}} \right)$$

$$\text{Wenn Supermarkt geschlossen} \quad \rightarrow f_{\dot{O}_S,MKVG} = \left( \frac{\dot{Q}_{0,std,MKVG} - 0.5 \cdot P_{Licht,MKVG}}{\dot{Q}_{0,std,MKVG}} \right)$$

$$f_{Kunden,MKVG} = \frac{0.180 \cdot (T_{SM} - T_{MK})}{3600} \cdot \frac{l_{T\u00fcr,MKVG} \cdot h_{std,MKVG}}{l_{ref,MKVG} \cdot h_{ref,MKVG}} \cdot n_{T\u00fcr,MKVG} \cdot \left( \frac{18 \cdot \eta_{Kunden}}{37.85} - 18 \right)$$

$$\dot{Q}_{0,MKVG} = \dot{Q}_{0,std,MKVG} \cdot \frac{V_{std,MKVG}}{V_{MKVG}} \cdot f_{Tstd,MKVG} \cdot f_{RF,MKVG} \cdot f_{\dot{O}_S,MKVG} + f_{Kunden,MKVG} \cdot f_{RF,MKVG}$$

$$\text{Wenn } T_A \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \rightarrow \eta_{sens,MKVG} = 0.85$$

$$\text{sonst} \quad \rightarrow \eta_{sens,MKVG} = \frac{35-T_A}{102.9} + 0.51$$

$$\text{Wenn Supermarkt offen} \quad \rightarrow P_{int,MKVG} = (P_{Licht,MKVG} + P_{vent,MKVG} + P_{hd,MKVG} \cdot f_{RF,MKVG} \cdot f_{Tstd,MKVG}) \cdot \frac{V_{std,MKVG}}{V_{MKVG}}$$

$$\text{Wenn Supermarkt geschlossen} \quad \rightarrow P_{int,MKVG} = (P_{vent,MKVG} + P_{hd,MKVG} \cdot f_{RF,MKVG} \cdot f_{Tstd,MKVG}) \cdot \frac{V_{std,MKVG}}{V_{MKVG}}$$

$$\dot{Q}_{K\u00fcm\u00f6,MKVG} = -1 \cdot \left( \dot{Q}_{0,MKVG} - P_{int,MKVG} + \left( P_{hd,MKVG} \cdot \frac{3}{4} \cdot f_{Tstd,MKVG} \cdot f_{RF,MKVG} \cdot \frac{V_{std,MKVG}}{V_{MKVG}} \right) \right) \cdot \eta_{sens,MKVG} \cdot n_{MKVG}$$

Wärmeausstrag durch Kühlleistung von Pluskühlmöbeln vertikal offen ( $\dot{Q}_{KüMö,PKVO}$ )

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Grössen  $l_{ref,PKVG}$  und  $h_{ref,PKVG}$  bewusst verwendet werden.

Wenn Supermarkt M1250

(Supermarkt M1250 ohne PKVO)

$$\rightarrow \dot{Q}_{0,PKVO} = 0$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{KüMö,PKVO} = 0$$

Wenn Supermarkt M340

$$\rightarrow f_{Tstd,PKVO} = \frac{T_{SM} - T_{PK}}{25\text{ °C} - T_{PK}}$$

$$\rightarrow \text{Wenn Supermarkt offen und } T_A \leq 0\text{ °C} \quad \rightarrow f_{RF,PKVO} = 0.50$$

$$\rightarrow \text{Wenn Supermarkt offen und } T_A > 0\text{ °C} \quad \rightarrow f_{RF,PKVO} = \frac{T_A - 35}{70} + 1$$

$$\rightarrow \text{sonst} \quad \rightarrow f_{RF,PKVO} = 0.50$$

$$\rightarrow \text{Wenn Supermarkt offen} \quad \rightarrow f_{\ddot{O}S,PKVO} = \left( \frac{\dot{Q}_{0,std,PKVO} + 0.5 \cdot P_{Licht,PKVO}}{\dot{Q}_{0,std,PKVO}} \right) \cdot 1.20$$

$$\rightarrow \text{Wenn Supermarkt geschlossen} \quad \rightarrow f_{\ddot{O}S,PKVO} = \left( \frac{\dot{Q}_{0,std,PKVO} - 0.5 \cdot P_{Licht,PKVO}}{\dot{Q}_{0,std,PKVO}} \right) \cdot 0.80$$

$$\rightarrow f_{Kunden,PKVO} = \frac{0.1465 \cdot (T_{SM} - T_{PK})}{3600} \cdot \frac{l_{disp,PKVO} \cdot h_{std,PKVO}}{l_{ref,PKVG} \cdot h_{ref,PKVG}} \cdot \left( \frac{75 \cdot \eta_{Kunden}}{37.85} - 75 \right)$$

$$\rightarrow \text{Wenn } T_A \leq 0\text{ °C} \quad \rightarrow \eta_{sens,PKVO} = 0.85$$

$$\rightarrow \text{sonst} \quad \rightarrow \eta_{sens,PKVO} = \frac{35 - T_A}{83.3} + 0.43$$

$$\rightarrow \text{Wenn Supermarkt offen} \quad \rightarrow P_{int,PKVO} = (P_{Licht,PKVO} + P_{vent,PKVO}) \cdot \frac{V_{std,PKVO}}{V_{PKVO}}$$

$$\rightarrow \text{Wenn Supermarkt geschlossen} \quad \rightarrow P_{int,PKVO} = P_{vent,PKVO} \cdot \frac{V_{std,PKVO}}{V_{PKVO}}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{KüMö,PKVO} = -1 \cdot (\dot{Q}_{0,PKVO} - P_{int,PKVO}) \cdot \eta_{sens,PKVO} \cdot n_{PKVO}$$

Wärmebedarf Temperierung Frischluft ( $\dot{Q}_{bed,FL}$ )

$$\text{Wenn } 19\text{ °C} \leq T_A \leq 24\text{ °C} \quad \rightarrow \dot{Q}_{bed,FL} = 0$$

$$\text{sonst} \quad \rightarrow \dot{Q}_{bed,FL} = \dot{v}_{Kunden} \cdot n_{Kunden} \cdot \rho_{L,mIA} \cdot c_{p,L,mIA} \cdot (T_A - T_{SM}) \cdot (1 - \eta_{WRG})$$

Wärmebedarf Bürofläche ( $\dot{Q}_{bed,BF}$ )

$$\dot{Q}_{bed,BF} = \dot{Q}_{trans,BF}$$

Temporärer Wärmebedarf Verkaufsfläche ( $\dot{Q}_{bed,VF,temp}$ )

Wärmebedarf der Verkaufsfläche vor Einbezug der Abwärmeverteilung der hybriden Kühlmöbel.

$$\dot{Q}_{bed,VF,temp} = \dot{Q}_{trans,VF} + \dot{Q}_{inf} + \dot{Q}_{Kunden} + \dot{Q}_{int} + \dot{Q}_{Licht} + \dot{Q}_{AK} + \dot{Q}_{KüMö,PKVG} + \dot{Q}_{KüMö,MKVG} + \dot{Q}_{KüMö,PKVO}$$

### F.3 Mittelung temporärer Wärmebedarf Verkaufsfläche

Das dynamische Verhalten der Gebäudemasse um die Verkaufsfläche wird durch einen einfachen gleitenden Mittelwert ihres temporären Wärmebedarfs über 24 h berücksichtigt.

$$\dot{Q}_{bed,VF,temp,EGM}(t) = \frac{1}{24} \cdot \sum_{i=1}^{24} \dot{Q}_{bed,VF,temp}(t-i)$$

### F.4 Abwärmeverteilung hybride Kühlmöbel

Die durch hybride Kühlmöbel entstehende Abwärme kann entweder nach Aussen ( $\dot{Q}_{hyb,A}$ ) oder in den Verkaufsraum ( $\dot{Q}_{hyb,VF}$ ) abgegeben werden. Im Folgenden sind die einzelnen Entscheidungs- und Berechnungsschritte dargelegt, um den Wärmeeintrag der hybriden Kühlmöbel in den Verkaufsraum zu ermitteln.

Wenn  $\dot{Q}_{bed,VF,temp,EGM} \geq 0$  temporärer Hauptbedarf kühlen

$$\rightarrow T_{C,KüMö} = T_A + \Delta T_{KWM} + \Delta T_{RK}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{hyb,VF} = 0$$

→ Wenn  $T_{C,KüMö} \leq 25 \text{ °C}$

$$\rightarrow EER_{PKVG} = 3.40 \quad \rightarrow EER_{MKVG} = 1.98 \quad \rightarrow EER_{PKVO} = 3.64$$

→ sonst

$$\rightarrow EER_{PKVG} = 7.3343 \cdot e^{-0.032 T_{C,KüMö}} \quad \rightarrow EER_{MKVG} = 3.5314 \cdot e^{-0.023 T_{C,KüMö}}$$

$$\rightarrow EER_{PKVO} = 7.8669 \cdot e^{-0.032 T_{C,KüMö}}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{C,PKVG} = \left( \dot{Q}_{0,PKVG} + \frac{\dot{Q}_{0,PKVG}}{EER_{PKVG}} \right) \cdot n_{PKVG}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{C,MKVG} = \left( \dot{Q}_{0,MKVG} + \frac{\dot{Q}_{0,MKVG}}{EER_{MKVG}} \right) \cdot n_{MKVG}$$

→ Wenn Supermarkt M1250

(Supermarkt M1250 ohne PKVO)

$$\rightarrow \dot{Q}_{C,PKVO} = 0$$

→ Wenn Supermarkt M340

$$\rightarrow \dot{Q}_{C,PKVO} = \left( \dot{Q}_{0,PKVO} + \frac{\dot{Q}_{0,PKVO}}{EER_{PKVO}} \right) \cdot n_{PKVO}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{C,KüMö} = \dot{Q}_{C,PKVG} + \dot{Q}_{C,MKVG} + \dot{Q}_{C,PKVO}$$

Wenn  $\dot{Q}_{bed,VF,temp,EGM} < 0$  temporärer Hauptbedarf heizen

$$\rightarrow T_{C,KüMö} = T_{SM} + \Delta T_{C,KüMö}$$

→ Wenn  $T_{C,KüMö} \leq 25 \text{ °C}$

$$\rightarrow EER_{PKVG} = 3.40 \quad \rightarrow EER_{MKVG} = 1.98 \quad \rightarrow EER_{PKVO} = 3.64$$

→ sonst

$$\rightarrow EER_{PKVG} = 7.3343 \cdot e^{-0.032 T_{C,KüMö}} \quad \rightarrow EER_{MKVG} = 3.5314 \cdot e^{-0.023 T_{C,KüMö}}$$

$$\rightarrow EER_{PKVO} = 7.8669 \cdot e^{-0.032 T_{C,KüMö}}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{C,PKVG} = \left( \dot{Q}_{0,PKVG} + \frac{\dot{Q}_{0,PKVG}}{EER_{PKVG}} \right) \cdot n_{PKVG}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{C,MKVG} = \left( \dot{Q}_{0,MKVG} + \frac{\dot{Q}_{0,MKVG}}{EER_{MKVG}} \right) \cdot n_{MKVG}$$

→ Wenn Supermarkt M1250

(Supermarkt M1250 ohne PKVO)

$$\begin{aligned} &\rightarrow \dot{Q}_{C,PKVO} = 0 \\ &\rightarrow \text{Wenn Supermarkt M340} \\ &\quad \rightarrow \dot{Q}_{0,PKVO} = \left( \dot{Q}_{0,PKVO} + \frac{\dot{Q}_{0,PKVO}}{EER_{PKVO}} \right) \cdot n_{PKVO} \\ &\rightarrow \dot{Q}_{C,K\u00fcm\u00f6} = \dot{Q}_{C,PKVG} + \dot{Q}_{C,MKVG} + \dot{Q}_{C,PKVO} \\ &\rightarrow \text{Wenn } \dot{Q}_{C,K\u00fcm\u00f6} \leq |\dot{Q}_{bed,VF,temp,EGM}| \quad \rightarrow \dot{Q}_{hyb,VF} = \dot{Q}_{C,K\u00fcm\u00f6} \\ &\rightarrow \text{sonst} \quad \rightarrow \dot{Q}_{hyb,VF} = |\dot{Q}_{bed,VF,temp,EGM}| \end{aligned}$$

## F.5 W\u00e4rmebedarf Verkaufsfl\u00e4che ( $\dot{Q}_{bed,VF,EGM}$ )

Die Bezeichnung  $\dot{Q}_{bed,VF,EGM}$  wird analog zu Variante 1 verwendet. Es ist jedoch wichtig zu betonen, dass der W\u00e4rmebedarf in diesem Fall lediglich auf einer gemittelten Gr\u00f6\u00dfe basiert und nicht durch ein einfaches gleitendes Mittel berechnet wurde.

$$\dot{Q}_{bed,VF,EGM} = \dot{Q}_{bed,VF,temp,EGM} + \dot{Q}_{hyb,VF}$$

## F.6 St\u00fcndlich berechnete Strombedarfe

Strombedarf zur Beleuchtung der Verkaufsfl\u00e4che ( $P_{Licht}$ )

$$P_{Licht} = \dot{Q}_{Licht}$$

Strombedarf interner W\u00e4rmelasten ( $P_{int}$ )

$$P_{int} = \dot{Q}_{int}$$

Strombedarf der Ventilatoren f\u00fcr Frischluft und W\u00e4rmeverteilung ( $P_{vent}$ )

$$P_{vent,FL} = \dot{v}_{Kunden} \cdot n_{Kunden} \cdot \mu_{vent}$$

$$P_{vent,vert} = \dot{V}_{vert} \cdot \mu_{vent}$$

$$P_{vent} = P_{vent,FL} + P_{vent,vert}$$

Strombedarf zus\u00e4tzliche K\u00e4lte-W\u00e4rme-Maschine ( $P_{KWM}$ )

$$\text{Wenn } |\dot{Q}_{bed,VF,EGM}| + |\dot{Q}_{bed,BF}| + |\dot{Q}_{bed,FL}| = 0$$

Kein Hauptbedarf

$$\rightarrow P_{KWM} = 0$$

$$\text{Wenn } \dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL} > 0$$

Hauptbedarf k\u00fchlen

$$\rightarrow \text{Wenn } \dot{Q}_{bed,VF,EGM} \geq 0$$

$$\rightarrow \text{Wenn } \dot{Q}_{bed,BF} \geq 0 \text{ und } T_A \geq T_{SM}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{k\u00fch} = \dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = 0$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{C,KWM} = \frac{\dot{Q}_{k\u00fch}}{EER_{Tc}} + \dot{Q}_{k\u00fch}$$

$$\rightarrow P_{KWM} = \frac{\dot{Q}_{k\u00fch}}{EER_{Tc}}$$

$$\rightarrow \text{Wenn } \dot{Q}_{bed,BF} < 0 \text{ und } T_A \geq T_{SM}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \dot{Q}_{\text{kühl}} &= \dot{Q}_{\text{bed,VF,EGM}} + \dot{Q}_{\text{bed,FL}} \\ \rightarrow \dot{Q}_{\text{heiz}} &= |\dot{Q}_{\text{bed,BF}}| \\ \rightarrow \dot{Q}_{C,KWM} &= \frac{\dot{Q}_{\text{kühl}}}{EER_{KWM}} + \dot{Q}_{\text{kühl}} \\ \rightarrow P_{KWM} &= \frac{\dot{Q}_{\text{kühl}}}{\frac{\dot{Q}_{\text{heiz}}}{\dot{Q}_{C,KWM}} \cdot EER_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{\text{heiz}}}{\dot{Q}_{C,KWM}}\right) \cdot EER_{Tc}} \end{aligned}$$

→ Wenn  $\dot{Q}_{\text{bed,BF}} \geq 0$  und  $T_A < T_{SM}$

$$\begin{aligned} \rightarrow \dot{Q}_{\text{kühl}} &= \dot{Q}_{\text{bed,VF,EGM}} + \dot{Q}_{\text{bed,BF}} \\ \rightarrow \dot{Q}_{\text{heiz}} &= |\dot{Q}_{\text{bed,FL}}| \\ \rightarrow \dot{Q}_{C,KWM} &= \frac{\dot{Q}_{\text{kühl}}}{EER_{KWM}} + \dot{Q}_{\text{kühl}} \\ \rightarrow P_{KWM} &= \frac{\dot{Q}_{\text{kühl}}}{\frac{\dot{Q}_{\text{heiz}}}{\dot{Q}_{C,KWM}} \cdot EER_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{\text{heiz}}}{\dot{Q}_{C,KWM}}\right) \cdot EER_{Tc}} \end{aligned}$$

→ Wenn  $\dot{Q}_{\text{bed,BF}} < 0$  und  $T_A < T_{SM}$

$$\begin{aligned} \rightarrow \dot{Q}_{\text{kühl}} &= \dot{Q}_{\text{bed,VF,EGM}} \\ \rightarrow \dot{Q}_{\text{heiz}} &= |\dot{Q}_{\text{bed,BF}} + \dot{Q}_{\text{bed,FL}}| \\ \rightarrow \dot{Q}_{C,KWM} &= \frac{\dot{Q}_{\text{kühl}}}{EER_{KWM}} + \dot{Q}_{\text{kühl}} \\ \rightarrow P_{KWM} &= \frac{\dot{Q}_{\text{kühl}}}{\frac{\dot{Q}_{\text{heiz}}}{\dot{Q}_{C,KWM}} \cdot EER_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{\text{heiz}}}{\dot{Q}_{C,KWM}}\right) \cdot EER_{Tc}} \end{aligned}$$

→ Wenn  $\dot{Q}_{\text{bed,VF,EGM}} < 0$

→ Wenn  $\dot{Q}_{\text{bed,BF}} \geq 0$  und  $T_A > T_{SM}$

$$\begin{aligned} \rightarrow \dot{Q}_{\text{kühl}} &= \dot{Q}_{\text{bed,BF}} + \dot{Q}_{\text{bed,FL}} \\ \rightarrow \dot{Q}_{\text{heiz}} &= |\dot{Q}_{\text{bed,VF,EGM}}| \\ \rightarrow \dot{Q}_{C,KWM} &= \frac{\dot{Q}_{\text{kühl}}}{EER_{KWM}} + \dot{Q}_{\text{kühl}} \\ \rightarrow P_{KWM} &= \frac{\dot{Q}_{\text{kühl}}}{\frac{\dot{Q}_{\text{heiz}}}{\dot{Q}_{C,KWM}} \cdot EER_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{\text{heiz}}}{\dot{Q}_{C,KWM}}\right) \cdot EER_{Tc}} \end{aligned}$$

→ Wenn  $\dot{Q}_{\text{bed,BF}} < 0$  und  $T_A > T_{SM}$

$$\begin{aligned} \rightarrow \dot{Q}_{\text{kühl}} &= \dot{Q}_{\text{bed,FL}} \\ \rightarrow \dot{Q}_{\text{heiz}} &= |\dot{Q}_{\text{bed,VF,EGM}} + \dot{Q}_{\text{bed,BF}}| \\ \rightarrow \dot{Q}_{C,KWM} &= \frac{\dot{Q}_{\text{kühl}}}{EER_{KWM}} + \dot{Q}_{\text{kühl}} \\ \rightarrow P_{KWM} &= \frac{\dot{Q}_{\text{kühl}}}{\frac{\dot{Q}_{\text{heiz}}}{\dot{Q}_{C,KWM}} \cdot EER_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{\text{heiz}}}{\dot{Q}_{C,KWM}}\right) \cdot EER_{Tc}} \end{aligned}$$

→ Wenn  $\dot{Q}_{\text{bed,BF}} \geq 0$  und  $T_A \leq T_{SM}$

$$\begin{aligned} \rightarrow \dot{Q}_{\text{kühl}} &= \dot{Q}_{\text{bed,BF}} \\ \rightarrow \dot{Q}_{\text{heiz}} &= |\dot{Q}_{\text{bed,VF,EGM}} + \dot{Q}_{\text{bed,FL}}| \\ \rightarrow \dot{Q}_{C,KWM} &= \frac{\dot{Q}_{\text{kühl}}}{EER_{KWM}} + \dot{Q}_{\text{kühl}} \\ \rightarrow P_{KWM} &= \frac{\dot{Q}_{\text{kühl}}}{\frac{\dot{Q}_{\text{heiz}}}{\dot{Q}_{C,KWM}} \cdot EER_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{\text{heiz}}}{\dot{Q}_{C,KWM}}\right) \cdot EER_{Tc}} \end{aligned}$$

Wenn  $\dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL} < 0$

Hauptbedarf heizen

→ Wenn  $\dot{Q}_{bed,VF,EGM} < 0$

→ Wenn  $\dot{Q}_{bed,BF} \leq 0$  und  $T_A < T_{SM}$

$$\rightarrow \dot{Q}_{kühl} = 0$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL}|$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{0,KWM} = \dot{Q}_{heiz} - \frac{\dot{Q}_{heiz}}{COP_{KWM}}$$

$$\rightarrow P_{KWM} = \frac{\dot{Q}_{heiz}}{COP_{T0}}$$

→ Wenn  $\dot{Q}_{bed,BF} > 0$  und  $T_A < T_{SM}$

$$\rightarrow \dot{Q}_{kühl} = \dot{Q}_{bed,BF}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,FL}|$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{0,KWM} = \dot{Q}_{heiz} - \frac{\dot{Q}_{heiz}}{COP_{KWM}}$$

$$\rightarrow P_{KWM} = \frac{\dot{Q}_{heiz}}{\frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}} \cdot COP_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}}\right) \cdot COP_{T0}}$$

→ Wenn  $\dot{Q}_{bed,BF} \leq 0$  und  $T_A \geq T_{SM}$

$$\rightarrow \dot{Q}_{kühl} = \dot{Q}_{bed,FL}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF}|$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{0,KWM} = \dot{Q}_{heiz} - \frac{\dot{Q}_{heiz}}{COP_{KWM}}$$

$$\rightarrow P_{KWM} = \frac{\dot{Q}_{heiz}}{\frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}} \cdot COP_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}}\right) \cdot COP_{T0}}$$

→ Wenn  $\dot{Q}_{bed,BF} > 0$  und  $T_A \geq T_{SM}$

$$\rightarrow \dot{Q}_{kühl} = \dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,VF,EGM}|$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{0,KWM} = \dot{Q}_{heiz} - \frac{\dot{Q}_{heiz}}{COP_{KWM}}$$

$$\rightarrow P_{KWM} = \frac{\dot{Q}_{heiz}}{\frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}} \cdot COP_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}}\right) \cdot COP_{T0}}$$

→ Wenn  $\dot{Q}_{bed,VF,EGM} \geq 0$

→ Wenn  $\dot{Q}_{bed,BF} \leq 0$  und  $T_A < T_{SM}$

$$\rightarrow \dot{Q}_{kühl} = \dot{Q}_{bed,VF,EGM}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL}|$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{0,KWM} = \dot{Q}_{heiz} - \frac{\dot{Q}_{heiz}}{COP_{KWM}}$$

$$\rightarrow P_{KWM} = \frac{\dot{Q}_{heiz}}{\frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}} \cdot COP_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}}\right) \cdot COP_{T0}}$$

$$\begin{aligned}
&\rightarrow \text{Wenn } \dot{Q}_{bed,BF} > 0 \text{ und } T_A < T_{SM} \\
&\quad \rightarrow \dot{Q}_{kühl} = \dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF} \\
&\quad \rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,FL}| \\
&\quad \rightarrow \dot{Q}_{0,KWM} = \dot{Q}_{heiz} - \frac{\dot{Q}_{heiz}}{COP_{KWM}} \\
&\quad \rightarrow P_{KWM} = \frac{\dot{Q}_{heiz}}{\frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}} \cdot COP_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}}\right) \cdot COP_{T0}} \\
&\rightarrow \text{Wenn } \dot{Q}_{bed,BF} \leq 0 \text{ und } T_A \geq T_{SM} \\
&\quad \rightarrow \dot{Q}_{kühl} = \dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,FL} \\
&\quad \rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,BF}| \\
&\quad \rightarrow \dot{Q}_{0,KWM} = \dot{Q}_{heiz} - \frac{\dot{Q}_{heiz}}{COP_{KWM}} \\
&\quad \rightarrow P_{KWM} = \frac{\dot{Q}_{heiz}}{\frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}} \cdot COP_{KWM} + \left(1 - \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}}\right) \cdot COP_{T0}}
\end{aligned}$$

### Strombedarf der Pumpen ( $P_{Pumpen}$ )

$$\begin{aligned}
\text{Wenn } |\dot{Q}_{bed,VF,EGM}| + |\dot{Q}_{bed,BF}| + |\dot{Q}_{bed,FL}| &= 0 && \text{Kein Hauptbedarf} \\
\rightarrow \dot{Q}_{C,KWM} &= 0 \\
\rightarrow \dot{Q}_{0,KWM} &= 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Wenn } \dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL} &> 0 && \text{Hauptbedarf Kühlen} \\
\rightarrow \dot{Q}_{0,KWM} &= \dot{Q}_{kühl} \\
\rightarrow \text{Wenn } \dot{Q}_{heiz} &= 0 \\
\rightarrow \dot{Q}_{C,KWM} &= P_{KWM} \cdot (EER_{Tc} + 1) \cdot 2 \\
\rightarrow \text{sonst} \\
\rightarrow \dot{Q}_{C,KWM} &= P_{KWM} \cdot \left( \left( \frac{\dot{Q}_{heiz}}{\dot{Q}_{C,KWM}} \right) EER_{KWM} + \left( 1 - \frac{\dot{Q}_{heiz}}{\dot{Q}_{C,KWM}} \right) EER_{Tc} \right) + 1 \cdot 2 - \dot{Q}_{heiz}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Wenn } \dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL} &< 0 && \text{Hauptbedarf Heizen} \\
\rightarrow \dot{Q}_{C,KWM} &= \dot{Q}_{heiz} \\
\rightarrow \text{Wenn } \dot{Q}_{kühl} &= 0 \\
\rightarrow \dot{Q}_{0,KWM} &= P_{KWM} \cdot (COP_{T0} - 1) \cdot 2 \\
\rightarrow \text{sonst} \\
\rightarrow \dot{Q}_{0,KWM} &= P_{KWM} \cdot \left( \left( \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}} \right) COP_{KWM} + \left( 1 - \frac{\dot{Q}_{kühl}}{\dot{Q}_{0,KWM}} \right) COP_{T0} \right) - 1 \cdot 2 - \dot{Q}_{kühl}
\end{aligned}$$

$$P_{Pumpen,Kalt} = \frac{\dot{Q}_{0,KWM}}{ETV_{Kalt,Pumpen}}$$

$$P_{Pumpen,Warm} = \frac{\dot{Q}_{C,KWM}}{ETV_{Warm,Pumpen}}$$

$$P_{Pumpen} = P_{Pumpen,Kalt} + P_{Pumpen,Warm}$$

Strombedarf der Hauptpumpe vom Sekundärkreis der Kühlräume und hybriden Kühlmöbel ( $P_{Hauptpumpe}$ )

Wenn  $\dot{Q}_{hyb,VF} = |\dot{Q}_{bed,VF,EGM}|$

→ Wenn Supermarkt M1250

$$\rightarrow \dot{Q}_{hyb,A} = (\dot{Q}_{C,KüMö} - \dot{Q}_{hyb,VF}) \cdot \left( \frac{(\dot{Q}_{0,PKVG} + EER_{PKVG})}{(\dot{Q}_{0,PKVG} + 7.3343 e^{-0.032 T_{C,KWM}})} + \frac{(\dot{Q}_{0,MKVG} + EER_{MKVG})}{(\dot{Q}_{0,MKVG} + 3.5314 e^{-0.023 T_{C,KWM}})} \right) \cdot \frac{1}{2}$$

→ Wenn Supermarkt M340

$$\rightarrow \dot{Q}_{hyb,A} = (\dot{Q}_{C,KüMö} - \dot{Q}_{hyb,VF}) \cdot \left( \frac{(\dot{Q}_{0,PKVG} + EER_{PKVG})}{(\dot{Q}_{0,PKVG} + 7.3343 e^{-0.032 T_{C,KWM}})} + \frac{(\dot{Q}_{0,MKVG} + EER_{MKVG})}{(\dot{Q}_{0,MKVG} + 3.5314 e^{-0.023 T_{C,KWM}})} + \frac{(\dot{Q}_{0,PKVO} + EER_{PKVO})}{(\dot{Q}_{0,PKVO} + 7.8669 e^{-0.032 T_{C,KWM}})} \right) \cdot \frac{1}{3}$$

sonst

$$\rightarrow \dot{Q}_{hyb,A} = \dot{Q}_{C,KüMö} - \dot{Q}_{hyb,VF}$$

$$P_{Hauptpumpe} = \frac{\dot{Q}_{hyb,A} + \dot{Q}_{PKR} + \dot{Q}_{MKR}}{ETV_{Warm,Pumpen}}$$

Strombedarf der Ventilatoren zur Rückkühlung ( $P_{RK,vent}$ )

Wenn  $|\dot{Q}_{bed,VF,EGM}| + |\dot{Q}_{bed,BF}| + |\dot{Q}_{bed,FL}| = 0$

Kein Hauptbedarf

$$\rightarrow \dot{Q}_{RK} = 0$$

Wenn  $\dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL} > 0$

Hauptbedarf Kühlen

$$\rightarrow \dot{Q}_{RK} = \dot{Q}_{C,KWM} - \dot{Q}_{heiz}$$

Wenn  $\dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL} < 0$

Hauptbedarf Heizen

$$\rightarrow \dot{Q}_{RK} = \dot{Q}_{0,KWM} - \dot{Q}_{kühl}$$

$$P_{RK,vent} = \frac{\dot{Q}_{RK} + \dot{Q}_{hyb,A} + \dot{Q}_{PKR} + \dot{Q}_{MKR}}{ETV_{RK,vent}}$$

Strombedarf Kühlräume ( $P_{PKR}$  und  $P_{MKR}$ )

$$P_{PKR} = \eta_{Last,PKR} \cdot \frac{\dot{Q}_{0,PKR,max}}{EER_{PKR}}$$

$$P_{MKR} = \eta_{Last,MKR} \cdot \frac{\dot{Q}_{0,MKR,max}}{EER_{MKR}}$$

Strombedarf Aktionskühler ( $P_{AK}$ )

$$P_{AK} = \dot{Q}_{AK}$$

### Strombedarf Pluskühlmöbel vertikal geschlossen ( $P_{PKVG}$ )

Der Strombedarf für Kühlmöbel in Variante 2 hängt von der Effizienz ( $EER_{PKVG}$ ) zu jeder Stunde ab. Diese Effizienz wiederum ist von der Verflüssigungstemperatur ( $T_{C,KüMö}$ ) abhängig, die je nach stündlichem, temporärem Wärmebedarf der Verkaufsfläche ( $\dot{Q}_{bed,VF,temp}$ ) unterschiedlich ist. Bisher wurden  $EER_{PKVG}$  und  $T_{C,KüMö}$  auf Grundlage von gemittelten Daten klassifiziert und berechnet. Im Programmskript werden diese nun gelöscht und entsprechend  $\dot{Q}_{bed,VF,temp}$  zu jeder Stunde neu berechnet.

$$\begin{aligned} \text{Wenn } \dot{Q}_{bed,VF,temp} &\geq 0 && \text{temporärer Kühlbedarf} \\ &\rightarrow T_{C,KüMö} = T_A + \\ &\quad \Delta T_{KWM} + \Delta T_{RK} \\ &\rightarrow \text{Wenn } T_{C,KüMö} \leq 25 \text{ } ^\circ\text{C} && \rightarrow EER_{PKVG} = 3.40 \\ &\rightarrow \text{sonst} && \rightarrow EER_{PKVG} = 7.3343 e^{-0.032 T_{C,KüMö}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Wenn } \dot{Q}_{C,KüMö} &\leq |\dot{Q}_{bed,VF,temp}| && \text{temporärer Heizbedarf (alle Kühlmöbel)} \\ &\rightarrow T_{C,KüMö} = T_{SM} + \\ &\quad \Delta T_{C,KüMö} \\ &\rightarrow \text{Wenn } T_{C,KüMö} \leq 25 \text{ } ^\circ\text{C} && \rightarrow EER_{PKVG} = 3.40 \\ &\rightarrow \text{sonst} && \rightarrow EER_{PKVG} = 7.3343 e^{-0.032 T_{C,KüMö}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Wenn } \dot{Q}_{C,KüMö} &> |\dot{Q}_{bed,VF,temp}| && \text{temporärer Heizbedarf (Anteil Kühlmöbel)} \\ &\rightarrow T_{C,SM} = T_{SM} + \Delta T_{C,KüMö} \\ &\rightarrow T_{C,A} = T_A + \Delta T_{KWM} + \Delta T_{RK} \\ &\rightarrow \text{Wenn } T_{C,SM} \leq 25 \text{ } ^\circ\text{C} && \rightarrow EER_{PKVG,SM} = 3.40 \\ &\rightarrow \text{sonst} && \rightarrow EER_{PKVG,SM} = 7.3343 e^{-0.032 T_{C,SM}} \\ &\rightarrow \text{Wenn } T_{C,A} \leq 25 \text{ } ^\circ\text{C} && \rightarrow EER_{PKVG,A} = 3.40 \\ &\rightarrow \text{sonst} && \rightarrow EER_{PKVG,A} = 7.3343 e^{-0.032 T_{C,A}} \\ &\rightarrow EER_{PKVG} = \left( EER_{PKVG,SM} \cdot \frac{\dot{Q}_{hyb,VF}}{\dot{Q}_{C,KüMö}} \right) + \left( EER_{PKVG,A} \cdot \left( 1 - \frac{\dot{Q}_{hyb,VF}}{\dot{Q}_{C,KüMö}} \right) \right) \end{aligned}$$

$$P_{PKVG} = \left( \frac{\dot{Q}_{0,PKVG}}{EER_{PKVG}} + P_{int,PKVG} \right) \cdot n_{PKVG}$$

### Strombedarf Minuskühlmöbel vertikal geschlossen ( $P_{MKVG}$ )

Der Strombedarf für Kühlmöbel in Variante 2 hängt von der Effizienz ( $EER_{MKVG}$ ) zu jeder Stunde ab. Diese Effizienz wiederum ist von der Verflüssigungstemperatur ( $T_{C,KüMö}$ ) abhängig, die je nach stündlichem, temporärem Wärmebedarf der Verkaufsfläche ( $\dot{Q}_{bed,VF,temp}$ ) unterschiedlich ist. Analog den Pluskühlmöbeln vertikal geschlossen werden  $EER_{MKVG}$  und  $T_{C,KüMö}$  gelöscht und entsprechend  $\dot{Q}_{bed,VF,temp}$  zu jeder Stunde neu berechnet.

$$\begin{aligned} \text{Wenn } \dot{Q}_{bed,VF,temp} &\geq 0 && \text{temporärer Kühlbedarf} \\ &\rightarrow T_{C,KüMö} = T_A + \Delta T_{KWM} + \Delta T_{RK} \\ &\rightarrow \text{Wenn } T_{C,KüMö} \leq 25 \text{ } ^\circ\text{C} && \rightarrow EER_{MKVG} = 1.98 \\ &\rightarrow \text{sonst} && \rightarrow EER_{MKVG} = 3.5314 e^{-0.023 T_{C,KüMö}} \end{aligned}$$

Wenn  $\dot{Q}_{C,KüMö} \leq |\dot{Q}_{bed,VF,temp}|$  temporärer Heizbedarf (alle Kühlmöbel)

$\rightarrow T_{C,KüMö} = T_{SM} + \Delta T_{C,KüMö}$

$\rightarrow$  Wenn  $T_{C,KüMö} \leq 25\text{ °C}$   $\rightarrow EER_{MKVG} = 1.98$

$\rightarrow$  sonst  $\rightarrow EER_{MKVG} = 3.5314 e^{-0.023 T_{C,KüMö}}$

Wenn  $\dot{Q}_{C,KüMö} > |\dot{Q}_{bed,VF,temp}|$  temporärer Heizbedarf (Anteil Kühlmöbel)

$\rightarrow T_{C,SM} = T_{SM} + \Delta T_{C,KüMö}$

$\rightarrow T_{C,A} = T_A + \Delta T_{KWM} + \Delta T_{RK}$

$\rightarrow$  Wenn  $T_{C,SM} \leq 25\text{ °C}$   $\rightarrow EER_{MKVG,SM} = 1.98$

$\rightarrow$  sonst  $\rightarrow EER_{MKVG,SM} = 3.5314 e^{-0.023 T_{C,SM}}$

$\rightarrow$  Wenn  $T_{C,A} \leq 25\text{ °C}$   $\rightarrow EER_{MKVG,A} = 1.98$

$\rightarrow$  sonst  $\rightarrow EER_{MKVG,A} = 3.5314 e^{-0.023 T_{C,A}}$

$\rightarrow EER_{MKVG} = \left( EER_{MKVG,SM} \cdot \frac{\dot{Q}_{hyb,VF}}{\dot{Q}_{C,KüMö}} \right) + \left( EER_{MKVG,A} \cdot \left( 1 - \frac{\dot{Q}_{hyb,VF}}{\dot{Q}_{C,KüMö}} \right) \right)$

$$P_{MKVG} = \left( \frac{\dot{Q}_{0,MKVG}}{EER_{MKVG}} + P_{int,MKVG} \right) \cdot n_{MKVG}$$

Strombedarf Pluskühlmöbel vertikal offen ( $P_{PKVO}$ )

Der Strombedarf für Kühlmöbel in Variante 2 hängt von der Effizienz ( $EER_{PKVO}$ ) zu jeder Stunde ab. Diese Effizienz wiederum ist von der Verflüssigungstemperatur ( $T_{C,KüMö}$ ) abhängig, die je nach stündlichem, temporärem Wärmebedarf der Verkaufsfläche ( $\dot{Q}_{bed,VF,temp}$ ) unterschiedlich ist. Analog der oben beschriebenen Berechnung werden  $EER_{PKVO}$  und  $T_{C,KüMö}$  gelöscht und entsprechend  $\dot{Q}_{bed,VF,temp}$  zu jeder Stunde neu berechnet.

Wenn Supermarkt M1250 (Supermarkt M1250 ohne PKVO)

$\rightarrow P_{PKVO} = 0$

Wenn Supermarkt M340

$\rightarrow$  Wenn  $\dot{Q}_{bed,VF,temp} \geq 0$  temporärer Kühlbedarf

$\rightarrow T_{C,KüMö} = T_A + \Delta T_{KWM} + \Delta T_{RK}$

$\rightarrow$  Wenn  $T_{C,KüMö} \leq 25\text{ °C}$   $\rightarrow EER_{PKVO} = 3.64$

$\rightarrow$  sonst  $\rightarrow EER_{PKVO} = 7.8669 e^{-0.032 T_{C,KüMö}}$

$\rightarrow$  Wenn  $\dot{Q}_{C,KüMö} \leq |\dot{Q}_{bed,VF,temp}|$  temporärer Heizbedarf (alle Kühlmöbel)

$\rightarrow T_{C,KüMö} = T_{SM} + \Delta T_{C,KüMö}$

$\rightarrow$  Wenn  $T_{C,KüMö} \leq 25\text{ °C}$   $\rightarrow EER_{PKVO} = 3.64$

$\rightarrow$  sonst  $\rightarrow EER_{PKVO} = 7.8669 e^{-0.032 T_{C,KüMö}}$

$\rightarrow$  Wenn  $\dot{Q}_{C,KüMö} > |\dot{Q}_{bed,VF,temp}|$  temporärer Heizbedarf (Anteil Kühlmöbel)

$\rightarrow T_{C,SM} = T_{SM} + \Delta T_{C,KüMö}$

$\rightarrow T_{C,A} = T_A + \Delta T_{KWM} + \Delta T_{RK}$

$$\begin{aligned}
&\rightarrow \text{Wenn } T_{C,SM} \leq 25 \text{ }^\circ\text{C} && \rightarrow EER_{PKVO,SM} = 3.64 \\
&\rightarrow \text{sonst} && \rightarrow EER_{PKVO,SM} = 7.8669 e^{-0.032 T_{C,SM}} \\
&\rightarrow \text{Wenn } T_{C,A} \leq 25 \text{ }^\circ\text{C} && \rightarrow EER_{PKVO,SM} = 3.64 \\
&\rightarrow \text{sonst} && \rightarrow EER_{PKVO,SM} = 7.8669 e^{-0.032 T_{C,A}} \\
&\rightarrow EER_{PKVO} = \left( EER_{PKVO,SM} \cdot \frac{\dot{Q}_{hyb,VF}}{\dot{Q}_{C,K\u00fcm\u00f6}} \right) + \left( EER_{PKVO,A} \cdot \left( 1 - \frac{\dot{Q}_{hyb,VF}}{\dot{Q}_{C,K\u00fcm\u00f6}} \right) \right)
\end{aligned}$$

$$P_{MKVG} = \left( \frac{\dot{Q}_{0,PKVO}}{EER_{PKVO}} + P_{int,PKVO} \right) \cdot n_{PKVO}$$

Strombedarf Supermarkt total ( $P_{SM,tot}$ )

$$P_{SM,tot} = P_{Licht} + P_{int} + P_{vent} + P_{KWM} + P_{Pumpen} + P_{Hauptpumpe} + P_{RK,vent} + P_{PKR} + P_{MKR} + P_{AK} + P_{PKVG} + P_{MKVG} + P_{PKVO}$$

Strombedarf K\u00fchlsystem total ( $P_{KS,tot}$ )

$$P_{KS,tot} = P_{KWM} + P_{Pumpen} + P_{Hauptpumpe} + P_{RK,vent} + P_{PKR} + P_{MKR} + P_{AK} + P_{PKVG} + P_{MKVG} + P_{PKVO}$$

## F.7 Jahressummen Strombedarf

Jahressumme Strombedarf Supermarkt total ( $P_{SM,tot,sum}$ )

$$P_{SM,tot,sum} = \sum_{i=1}^{8760} P_{SM,tot,i}$$

Jahressumme Strombedarf K\u00fchlsystem total ( $P_{KS,tot,sum}$ )

$$P_{KS,tot,sum} = \sum_{i=1}^{8760} P_{KS,tot,i}$$

## Anhang G Details Berechnung Variante 3: Zentralgekühlt

Nachfolgend sind die einzelnen Berechnungsschritte für alle Simulations-Konfigurationen mit Variante 3 näher beschrieben.

### G.1 Stündlich berechnete Werte allgemein

Verflüssigungstemperatur Kühlmöbel ( $T_{C,KüMö}$ )

$$T_{C,KüMö} = T_{SM} + \Delta T_{C,KüMö}$$

### G.2 Stündlich berechnete Wärmeströme

Wärmestrom durch Transmission Verkaufsfläche ( $\dot{Q}_{trans,VF}$ )

$$\text{Wenn } T_{A,EGM} < 19\text{ °C} \quad \rightarrow \dot{Q}_{trans,VF} = \left( \frac{\dot{Q}_{d,heiz,VF}}{19\text{ °C} - (-8\text{ °C})} \right) \cdot (T_{A,EGM} - 19\text{ °C})$$

$$\text{Wenn } 19\text{ °C} \leq T_{A,EGM} \leq 24\text{ °C} \quad \rightarrow \dot{Q}_{trans,VF} = 0$$

$$\text{Wenn } T_{A,EGM} > 24\text{ °C} \quad \rightarrow \dot{Q}_{trans,VF} = \left( \frac{\dot{Q}_{d,kühl,VF}}{35\text{ °C} - 24\text{ °C}} \right) \cdot (T_{A,EGM} - 24\text{ °C})$$

Wärmestrom durch Transmission Bürofläche ( $\dot{Q}_{trans,BF}$ )

$$\text{Wenn } T_{A,EGM} < 21\text{ °C} \quad \rightarrow \dot{Q}_{trans,BF} = \left( \frac{\dot{Q}_{d,heiz,BF}}{21\text{ °C} - (-8\text{ °C})} \right) \cdot (T_{A,EGM} - 21\text{ °C})$$

$$\text{Wenn } 21\text{ °C} \leq T_{A,EGM} \leq 24\text{ °C} \quad \rightarrow \dot{Q}_{trans,BF} = 0$$

$$\text{Wenn } T_{A,EGM} > 24\text{ °C} \quad \rightarrow \dot{Q}_{trans,BF} = \left( \frac{\dot{Q}_{d,kühl,BF}}{35\text{ °C} - 24\text{ °C}} \right) \cdot (T_{A,EGM} - 24\text{ °C})$$

Wärmestrom durch Infiltration ( $\dot{Q}_{inf}$ )

$$\dot{Q}_{inf} = n_{Kunden} \cdot \dot{v}_{inf} \cdot \rho_{L,mIA} \cdot c_{p,L,mIA} \cdot (T_A - T_{SM})$$

Wärmeeintrag durch Kundschaft ( $\dot{Q}_{Kunden}$ )

$$\dot{Q}_{Kunden} = n_{Kunden} \cdot \dot{q}_{Kunden}$$

Wärmeeintrag durch interne Lasten ( $\dot{Q}_{int}$ )

$$\dot{Q}_{int} = \eta_{Last,int} \cdot \dot{Q}_{int,max}$$

Wärmeeintrag durch Beleuchtung der Verkaufsfläche ( $\dot{Q}_{Licht}$ )

$$\text{Wenn Supermarkt offen} \quad \rightarrow \dot{Q}_{Licht} = A_{VF} \cdot \dot{q}_{Licht}$$

$$\text{Wenn Supermarkt geschlossen} \quad \rightarrow \dot{Q}_{Licht} = 0$$

Kälteleistung Plus- und Minuskühlraum ( $\dot{Q}_{0,PKR}$  und  $\dot{Q}_{0,MKR}$ )

$$\dot{Q}_{0,PKR} = \eta_{Last,PKR} \cdot \dot{Q}_{0,PKR,max}$$

$$\dot{Q}_{0,MKR} = \eta_{Last,MKR} \cdot \dot{Q}_{0,MKR,max}$$

### Wärmeeintrag durch Abwärme Aktionskühler ( $\dot{Q}_{AK}$ )

$$\begin{aligned} \text{Wenn } T_{C,KüMö} \leq 25 \text{ } ^\circ\text{C} & \rightarrow f_{EER,AK} = 0.73 \\ & \rightarrow EER_{AK} = 3.44 \\ \text{sonst} & \rightarrow f_{EER,AK} = 0.3557 e^{0.0292 T_{C,KüMö}} \\ & \rightarrow EER_{AK} = 7.0367 e^{-0.029 T_{C,KüMö}} \end{aligned}$$

$$f_{Tstd,AK} = \frac{T_{SM} - T_{PK}}{25 \text{ } ^\circ\text{C} - T_{PK}} \cdot f_{EER,AK}$$

$$\begin{aligned} \text{Wenn } T_A \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C} & \rightarrow f_{RF,AK} = 0.60 \\ \text{sonst} & \rightarrow f_{RF,AK} = \frac{T_A - 35}{87.5} + 1 \end{aligned}$$

$$\text{Wenn Supermarkt offen} \rightarrow f_{\text{ös},AK} = \left( \frac{TEC_{AK} + 0.015}{TEC_{AK}} \right)$$

$$\text{Wenn Supermarkt geschlossen} \rightarrow f_{\text{ös},AK} = \left( \frac{TEC_{AK} - 0.015}{TEC_{AK}} \right)$$

$$f_{Kunden,AK} = \frac{0.002 \cdot (T_{SM} - T_{PK})}{3600} \cdot \frac{l_{tot,AK} \cdot b_{disp,AK}}{l_{ref,AK} \cdot b_{ref,AK}} \cdot \left( \frac{75 \cdot \eta_{Kunden}}{37.85} - 75 \right) \cdot \frac{1}{EER_{AK}}$$

$$hTEC_{std,AK} = \frac{TEC_{AK}}{24}$$

$$hTEC_{real,AK} = hTEC_{std,AK} \cdot f_{Tstd,AK} \cdot f_{RF,AK} \cdot f_{\text{ös},AK} + f_{Kunden,AK} \cdot f_{RF,AK}$$

$$\dot{Q}_{AK} = hTEC_{real,AK} \cdot n_{AK}$$

### Wärmeaustag durch Kühlleistung von Pluskühlmöbeln vertikal geschlossen ( $\dot{Q}_{KüMö,PKVG}$ )

$$f_{Tstd,PKVG} = \frac{T_{SM} - T_{PK}}{25 \text{ } ^\circ\text{C} - T_{PK}}$$

$$\begin{aligned} \text{Wenn } T_A \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C} & \rightarrow f_{RF,PKVG} = 0.60 \\ \text{sonst} & \rightarrow f_{RF,PKVG} = \frac{T_A - 35}{87.5} + 1 \end{aligned}$$

$$\text{Wenn Supermarkt offen} \rightarrow f_{\text{ös},PKVG} = \left( \frac{\dot{Q}_{0,std,PKVG} + 0.5 \cdot P_{Licht,PKVG}}{\dot{Q}_{0,std,PKVG}} \right)$$

$$\text{Wenn Supermarkt geschlossen} \rightarrow f_{\text{ös},PKVG} = \left( \frac{\dot{Q}_{0,std,PKVG} - 0.5 \cdot P_{Licht,PKVG}}{\dot{Q}_{0,std,PKVG}} \right)$$

$$f_{Kunden,PKVG} = \frac{0.1465 \cdot (T_{SM} - T_{PK})}{3600} \cdot \frac{l_{Tür,PKVG} \cdot h_{std,PKVG}}{l_{ref,PKVG} \cdot h_{ref,PKVG}} \cdot n_{Tür,PKVG} \cdot \left( \frac{75 \cdot \eta_{Kunden}}{37.85} - 75 \right)$$

$$\dot{Q}_{0,PKVG} = \dot{Q}_{0,std,PKVG} \cdot \frac{V_{std,PKVG}}{V_{PKVG}} \cdot f_{Tstd,PKVG} \cdot f_{RF,PKVG} \cdot f_{\text{ös},PKVG} + f_{Kunden,PKVG} \cdot f_{RF,PKVG}$$

$$\begin{aligned} \text{Wenn } T_A \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C} & \rightarrow \eta_{sens,PKVG} = 0.85 \\ \text{sonst} & \rightarrow \eta_{sens,PKVG} = \frac{35 - T_A}{102.9} + 0.51 \end{aligned}$$

$$\text{Wenn Supermarkt offen} \rightarrow P_{int,PKVG} = (P_{Licht,PKVG} + P_{vent,PKVG}) \cdot \frac{V_{std,PKVG}}{V_{PKVG}}$$

$$\text{Wenn Supermarkt geschlossen} \rightarrow P_{int,PKVG} = P_{vent,PKVG} \cdot \frac{V_{std,PKVG}}{V_{PKVG}}$$

$$\dot{Q}_{KüMö,PKVG} = -1 \cdot (\dot{Q}_{0,PKVG} - P_{int,PKVG}) \cdot \eta_{sens,PKVG} \cdot n_{PKVG}$$

Wärmeausstrag durch Kühlleistung von Minuskühlmöbeln vertikal geschlossen ( $\dot{Q}_{KüMö,MKVG}$ )

$$f_{Tstd,MKVG} = \frac{T_{SM} - T_{MK}}{25\text{ °C} - T_{MK}}$$

Wenn  $T_A \leq 0\text{ °C}$   $\rightarrow f_{RF,MKVG} = 0.60$

sonst  $\rightarrow f_{RF,MKVG} = \frac{T_A - 35}{87.5} + 1$

Wenn Supermarkt offen  $\rightarrow f_{\ddot{O}S,MKVG} = \left( \frac{\dot{Q}_{0,std,MKVG} + 0.5 \cdot P_{Licht,MKVG}}{\dot{Q}_{0,std,MKVG}} \right)$

Wenn Supermarkt geschlossen  $\rightarrow f_{\ddot{O}S,MKVG} = \left( \frac{\dot{Q}_{0,std,MKVG} - 0.5 \cdot P_{Licht,MKVG}}{\dot{Q}_{0,std,MKVG}} \right)$

$$f_{Kunden,MKVG} = \frac{0.180 \cdot (T_{SM} - T_{MK})}{3600} \cdot \frac{l_{Tür,MKVG} \cdot h_{std,MKVG}}{l_{ref,MKVG} \cdot h_{ref,MKVG}} \cdot n_{Tür,MKVG} \cdot \left( \frac{18 \cdot \eta_{Kunden}}{37.85} - 18 \right)$$

$$\dot{Q}_{0,MKVG} = \dot{Q}_{0,std,MKVG} \cdot \frac{V_{std,MKVG}}{V_{MKVG}} \cdot f_{Tstd,MKVG} \cdot f_{RF,MKVG} \cdot f_{\ddot{O}S,MKVG} + f_{Kunden,MKVG} \cdot f_{RF,MKVG}$$

Wenn  $T_A \leq 0\text{ °C}$   $\rightarrow \eta_{sens,MKVG} = 0.85$

sonst  $\rightarrow \eta_{sens,MKVG} = \frac{35 - T_A}{102.9} + 0.51$

Wenn Supermarkt offen  $\rightarrow P_{int,MKVG} = (P_{Licht,MKVG} + P_{vent,MKVG} + P_{hd,MKVG} \cdot f_{RF,MKVG} \cdot f_{Tstd,MKVG}) \cdot \frac{V_{std,MKVG}}{V_{MKVG}}$

Wenn Supermarkt geschlossen  $\rightarrow P_{int,MKVG} = (P_{vent,MKVG} + P_{hd,MKVG} \cdot f_{RF,MKVG} \cdot f_{Tstd,MKVG}) \cdot \frac{V_{std,MKVG}}{V_{MKVG}}$

$$\dot{Q}_{KüMö,MKVG} = -1 \cdot \left( \dot{Q}_{0,MKVG} - P_{int,MKVG} + \left( P_{hd,MKVG} \cdot \frac{3}{4} \cdot f_{Tstd,MKVG} \cdot f_{RF,MKVG} \cdot \frac{V_{std,MKVG}}{V_{MKVG}} \right) \right) \cdot \eta_{sens,MKVG} \cdot \eta_{MKVG}$$

Wärmeausstrag durch Kühlleistung von Pluskühlmöbeln vertikal offen ( $\dot{Q}_{KüMö,PKVO}$ )

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Grössen  $l_{ref,PKVG}$  und  $h_{ref,PKVG}$  bewusst verwendet werden.

Wenn Supermarkt M1250

(Supermarkt M1250 ohne PKVO)

$$\rightarrow \dot{Q}_{0,PKVO} = 0$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{KüMö,PKVO} = 0$$

Wenn Supermarkt M340

$$\rightarrow f_{Tstd,PKVO} = \frac{T_{SM} - T_{PK}}{25\text{ °C} - T_{PK}}$$

$\rightarrow$  Wenn Supermarkt offen und  $T_A \leq 0\text{ °C}$   $\rightarrow f_{RF,PKVO} = 0.50$

$\rightarrow$  Wenn Supermarkt offen und  $T_A > 0\text{ °C}$   $\rightarrow f_{RF,PKVO} = \frac{T_A - 35}{70} + 1$

$\rightarrow$  sonst  $\rightarrow f_{RF,PKVO} = 0.50$

$\rightarrow$  Wenn Supermarkt offen  $\rightarrow f_{\ddot{O}S,PKVO} = \left( \frac{\dot{Q}_{0,std,PKVO} + 0.5 \cdot P_{Licht,PKVO}}{\dot{Q}_{0,std,PKVO}} \right) \cdot 1.20$

$\rightarrow$  Wenn Supermarkt geschlossen  $\rightarrow f_{\ddot{O}S,PKVO} = \left( \frac{\dot{Q}_{0,std,PKVO} - 0.5 \cdot P_{Licht,PKVO}}{\dot{Q}_{0,std,PKVO}} \right) \cdot 0.80$

$$\rightarrow f_{Kunden,PKVO} = \frac{0.1465 \cdot (T_{SM} - T_{PK})}{3600} \cdot \frac{l_{disp,PKVO} \cdot h_{std,PKVO}}{l_{ref,PKVG} \cdot h_{ref,PKVG}} \cdot \left( \frac{75 \cdot \eta_{Kunden}}{37.85} - 75 \right)$$

$$\rightarrow \text{Wenn } T_A \leq 0 \text{ }^\circ\text{C} \quad \rightarrow \eta_{sens,PKVO} = 0.85$$

$$\rightarrow \text{sonst} \quad \rightarrow \eta_{sens,PKVO} = \frac{35-T_A}{83.3} + 0.43$$

$$\rightarrow \text{Wenn Supermarkt offen} \quad \rightarrow P_{int,PKVO} = (P_{Licht,PKVO} + P_{vent,PKVO}) \cdot \frac{V_{std,PKVO}}{V_{PKVO}}$$

$$\rightarrow \text{Wenn Supermarkt geschlossen} \quad \rightarrow P_{int,PKVO} = P_{vent,PKVO} \cdot \frac{V_{std,PKVO}}{V_{PKVO}}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{K\u00fcm\u00f6,PKVO} = -1 \cdot (\dot{Q}_{0,PKVO} - P_{int,PKVO}) \cdot \eta_{sens,PKVO} \cdot n_{PKVO}$$

W\u00e4rmebedarf Temperierung Frischluft ( $\dot{Q}_{bed,FL}$ )

$$\text{Wenn } 19 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_A \leq 24 \text{ }^\circ\text{C} \quad \rightarrow \dot{Q}_{bed,FL} = 0$$

$$\text{sonst} \quad \rightarrow \dot{Q}_{bed,FL} = \dot{v}_{Kunden} \cdot n_{Kunden} \cdot \rho_{L,mIA} \cdot c_{p,L,mIA} \cdot (T_A - T_{SM}) \cdot (1 - \eta_{WRG})$$

W\u00e4rmebedarf B\u00fcrofl\u00e4che ( $\dot{Q}_{bed,BF}$ )

$$\dot{Q}_{bed,BF} = \dot{Q}_{trans,BF}$$

W\u00e4rmebedarf Verkaufsfl\u00e4che ( $\dot{Q}_{bed,VF}$ )

$$\dot{Q}_{bed,VF} = \dot{Q}_{trans,VF} + \dot{Q}_{inf} + \dot{Q}_{Kunden} + \dot{Q}_{int} + \dot{Q}_{Licht} + \dot{Q}_{AK} + \dot{Q}_{K\u00fcm\u00f6,PKVG} + \dot{Q}_{K\u00fcm\u00f6,MKVG} + \dot{Q}_{K\u00fcm\u00f6,PKVO}$$

### G.3 Mittelung W\u00e4rmebedarf Verkaufsfl\u00e4che

Das dynamische Verhalten der Geb\u00e4udemasse um die Verkaufsfl\u00e4che wird durch einen einfachen gleitenden Mittelwert ihres W\u00e4rmebedarfs \u00fcber 24 h ber\u00fccksichtigt.

$$\dot{Q}_{bed,VF,EGM}(t) = \frac{1}{24} \cdot \sum_{i=1}^{24} \dot{Q}_{bed,VF}(t-i)$$

### G.4 Heiz- und K\u00fchlbeford Supermarkt ( $\dot{Q}_{heiz}$ und $\dot{Q}_{k\u00fchhl}$ )

$$\text{Wenn } \dot{Q}_{bed,VF,EGM} \geq 0 \text{ und } \dot{Q}_{bed,BF} \geq 0 \text{ und } \dot{Q}_{bed,FL} \geq 0$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{k\u00fchhl} = \dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = 0$$

$$\text{Wenn } \dot{Q}_{bed,VF,EGM} \geq 0 \text{ und } \dot{Q}_{bed,BF} \geq 0 \text{ und } \dot{Q}_{bed,FL} < 0$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{k\u00fchhl} = \dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,BF}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,FL}|$$

$$\text{Wenn } \dot{Q}_{bed,VF,EGM} \geq 0 \text{ und } \dot{Q}_{bed,BF} < 0 \text{ und } \dot{Q}_{bed,FL} < 0$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{k\u00fchhl} = \dot{Q}_{bed,VF,EGM}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,BF}| + |\dot{Q}_{bed,FL}|$$

$$\text{Wenn } \dot{Q}_{bed,VF,EGM} \geq 0 \text{ und } \dot{Q}_{bed,BF} < 0 \text{ und } \dot{Q}_{bed,FL} \geq 0$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{k\u00fchhl} = \dot{Q}_{bed,VF,EGM} + \dot{Q}_{bed,FL}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,BF}|$$

Wenn  $\dot{Q}_{bed,VF,EGM} < 0$  und  $\dot{Q}_{bed,BF} \geq 0$  und  $\dot{Q}_{bed,FL} \geq 0$   
 $\rightarrow \dot{Q}_{k\u00fchhl} = \dot{Q}_{bed,BF} + \dot{Q}_{bed,FL}$   
 $\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,VF,EGM}|$

Wenn  $\dot{Q}_{bed,VF,EGM} < 0$  und  $\dot{Q}_{bed,BF} \geq 0$  und  $\dot{Q}_{bed,FL} < 0$   
 $\rightarrow \dot{Q}_{k\u00fchhl} = \dot{Q}_{bed,BF}$   
 $\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,VF,EGM}| + |\dot{Q}_{bed,FL}|$

Wenn  $\dot{Q}_{bed,VF,EGM} < 0$  und  $\dot{Q}_{bed,BF} < 0$  und  $\dot{Q}_{bed,FL} < 0$   
 $\rightarrow \dot{Q}_{k\u00fchhl} = 0$   
 $\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,VF,EGM}| + |\dot{Q}_{bed,BF}| + |\dot{Q}_{bed,FL}|$

Wenn  $\dot{Q}_{bed,VF,EGM} < 0$  und  $\dot{Q}_{bed,BF} < 0$  und  $\dot{Q}_{bed,FL} \geq 0$   
 $\rightarrow \dot{Q}_{k\u00fchhl} = \dot{Q}_{bed,FL}$   
 $\rightarrow \dot{Q}_{heiz} = |\dot{Q}_{bed,VF,EGM}| + |\dot{Q}_{bed,BF}|$

## G.5 St\u00fcndlich berechnete Strombedarfe

Strombedarf zur Beleuchtung der Verkaufsfl\u00e4che ( $P_{Licht}$ )

$$P_{Licht} = \dot{Q}_{Licht}$$

Strombedarf interner W\u00e4rmelasten ( $P_{int}$ )

$$P_{int} = \dot{Q}_{int}$$

Strombedarf der Ventilatoren f\u00fcr Frischluft und W\u00e4rmeverteilung ( $P_{vent}$ )

$$P_{vent,FL} = \dot{v}_{Kunden} \cdot n_{Kunden} \cdot \mu_{vent}$$

$$P_{vent,vert} = \dot{V}_{vert} \cdot \mu_{vent}$$

$$P_{vent} = P_{vent,FL} + P_{vent,vert}$$

Strombedarf Aktionsk\u00fchler ( $P_{AK}$ )

$$P_{AK} = \dot{Q}_{AK}$$

Strombedarf K\u00fchlm\u00f6bel ( $P_{PKVG}$ ,  $P_{MKVG}$  und  $P_{PKVO}$ )

$$P_{PKVG} = P_{int,PKVG} \cdot n_{PKVG}$$

$$P_{MKVG} = P_{int,MKVG} \cdot n_{MKVG}$$

Wenn Supermarkt M1250

(Supermarkt M1250 ohne PKVO)

$$\rightarrow P_{PKVO} = 0$$

Wenn Supermarkt M340

$$\rightarrow P_{PKVO} = P_{int,PKVO} \cdot n_{PKVO}$$

### Strombedarf der Pumpen ( $P_{Pumpen}$ )

$$P_{Pumpen,Kalt} = \frac{\dot{Q}_{kühl}}{ETV_{Kalt,Pumpen}}$$

$$P_{Pumpen,Warm} = \frac{\dot{Q}_{heiz}}{ETV_{Warm,Pumpen}}$$

$$P_{Pumpen} = P_{Pumpen,Kalt} + P_{Pumpen,Warm}$$

### Strombedarf zentrale CO<sub>2</sub>-Kälteanlage ( $P_{CO2}$ )

#### Eingaben zur Simulation

Aussentemperatur

$$T_A$$

Kälteleistung Pluskühlung

$$\dot{Q}_{PK} = \dot{Q}_{0,PKR} + \dot{Q}_{0,PKVG} \cdot n_{PKVG} + \dot{Q}_{0,PKVO} \cdot n_{PKVO}$$

Kälteleistung Minuskühlung

$$\dot{Q}_{MK} = \dot{Q}_{0,MKR} + \dot{Q}_{0,MKVG} \cdot n_{MKVG}$$

Kälteleistung Klimakälte

$$\dot{Q}_{KK} = \dot{Q}_{kühl}$$

Wärmeleistung Heizung

$$\dot{Q}_{heiz}$$

#### Ausgaben aus der Simulation

Elektrische Leistung Verdichter Pluskühlung

$$P_{verd,PK}$$

Elektrische Leistung Verdichter Minuskühlung

$$P_{verd,MK}$$

Elektrische Leistung Verdichter Klimakälte

$$P_{verd,KK}$$

Wärmeleistung Enthitzer (WT für WN)

$$\dot{Q}_{EH}$$

Vom Enthitzer nicht gedeckter Wärmebedarf

$$\Delta \dot{Q}_{EH}$$

Wärmeleistung Gaskühler

$$\dot{Q}_{GK}$$

$$P_{CO2} = P_{PK} + P_{MK} + P_{KK}$$

### Strombedarf zusätzliche Wärmepumpe ( $P_{WP}$ )

$$T_{0,WP} = T_A - \Delta T_{GK}$$

Wenn  $\Delta \dot{Q}_{EH} > 0$

temporärer Heizbedarf (Anteil Kühlmöbel)

$$\rightarrow P_{WP} = 0$$

sonst

→ Wenn  $T_{0,WP} \geq 15 \text{ °C}$

$$\rightarrow COP_{WP} = 8.92$$

→ sonst

$$\rightarrow COP_{WP} = 0.0001 T_{0,WP}^3 + 0.005 T_{0,WP}^2 + 0.1496 T_{0,WP} + 5.1536$$

$$\rightarrow P_{WP} = \frac{\dot{Q}_{heiz} - \Delta \dot{Q}_{EH}}{COP_{WP}}$$

### Strombedarf Ventilatoren Gaskühler ( $P_{GK,vent}$ )

$$\text{Wenn } \Delta \dot{Q}_{EH} > 0 \quad \rightarrow P_{GK,vent} = \frac{\dot{Q}_{GK} + \dot{Q}_{EH} - \dot{Q}_{Heiz}}{ETV_{GK,vent}}$$

$$\text{sonst} \quad \rightarrow P_{GK,vent} = \frac{\dot{Q}_{GK} + (P_{WP} \cdot (COP_{WP} - 1))}{ETV_{GK,vent}}$$

Strombedarf Supermarkt total ( $P_{SM,tot}$ )

$$P_{SM,tot} = P_{Licht} + P_{int} + P_{vent} + P_{Pumpen} + P_{PKVG} + P_{MKVG} + P_{PKVO} + P_{AK} + P_{CO2} + P_{WP} + P_{GK}$$

Strombedarf Kühlsystem total ( $P_{KS,tot}$ )

$$P_{KS,tot} = P_{Pumpen} + P_{PKVG} + P_{MKVG} + P_{PKVO} + P_{AK} + P_{CO2} + P_{WP} + P_{GK}$$

## G.6 Jahressummen Strombedarf

Jahressumme Strombedarf Supermarkt total ( $P_{SM,tot,sum}$ )

$$P_{SM,tot,sum} = \sum_{i=1}^{8760} P_{SM,tot,i}$$

Jahressumme Strombedarf Kühlsystem total ( $P_{KS,tot,sum}$ )

$$P_{KS,tot,sum} = \sum_{i=1}^{8760} P_{KS,tot,i}$$

## Anhang H Details zur Simulation der CO<sub>2</sub>-Booster Kälteanlage

### H.1 Ein-, Ausgaben und Parameter der CO<sub>2</sub>-Simulation

Tabelle 19: Ein-, Ausgaben und Parameter der Simulation zur CO<sub>2</sub>-Booster Kälteanlage.

<b>Eingaben:</b>	<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>
Aussentemperatur	$T_A$	°C
Kälteleistung Minuskühlung	$\dot{Q}_{MK}$	kW
Kälteleistung Pluskühlung	$\dot{Q}_{PK}$	kW
Kälteleistung Klimakälte	$\dot{Q}_{KK}$	kW
Wärmeleistung Heizung	$\dot{Q}_{heiz}$	kW
Supermarkt Typ: M340/M1250 (PK offen vorhanden ja/nein)	-	-
<b>Ausgaben:</b>		
Elektrische Leistung Verdichter MK	$P_{verd,MK}$	kW
Elektrische Leistung Verdichter PK	$P_{verd,PK}$	kW
Elektrische Leistung Verdichter Klimakälte	$P_{verd,KK}$	kW
Leistung Enthitzer (WT für Wärmenutzung)	$\dot{Q}_{EH}$	kW
Leistung Gaskühler	$\dot{Q}_{GK}$	kW
<b>Parameter:</b>		
Verdampfungstemperatur MK	-30 °C	
Verdampfungstemperatur PK	-4 °C falls Supermarkt mit offenen Kühlmöbel -2 °C falls Supermarkt ohne offenen Kühlmöbel	
Verdampfungstemperatur KK	10 °C	
Austrittstemperatur Mitteldruck Enthitzer	32 °C	
Minimale Subkritische Verflüssigungstemperatur Gaskühler	15 °C falls $\dot{Q}_{KK} > 0$ kW 10 °C sonst	
Temperaturdifferenz am Gaskühler Austritt CO <sub>2</sub> zu Umgebung Transkritisch	4 K	
Temperaturdifferenz am Gaskühler Austritt CO <sub>2</sub> zu Umgebung Subkritisch	3 K	
Temperaturdifferenz am Mitteldruck Enthitzer Austritt CO <sub>2</sub> zu Umgebung	5 K	
Minimale CO <sub>2</sub> Austrittstemperatur Mitteldruck Enthitzer	10 °C	
Überhitzung MK-Verdampfer	10 K	
Überhitzung PK-Verdampfer	10 K	
Überhitzung KK-Verdampfer	2 K	
Unterkühlung IWT	3 K	
Maximaler Hochdruck	100 bar	
Mitteldruck	38 bar	

## H.2 Erläuterungen zur Berechnung

Der Kältemittelmassenstrom des MK-Verdichters entspricht dem Massenstrom über den MK-Kühlstellen (inkl. Kühlraum) sowie dem eingespritzten Massenstrom vor dem internen Wärmeübertrager. Durch die Einspritzung wird sichergestellt, dass die Überhitzung vor dem Verdichter maximal 20 K beträgt. Diese kann aufgrund von Lastschwankungen (PK und MK) variieren. Ist die Überhitzung kleiner als 20 K wird kein Kältemittel eingespritzt, da dies die Effizienz verschlechtert.

Der Kältemittelmassenstrom des PK-Verdichters setzt sich aus dem Massenstrom des MK-Verdichters, dem Massenstrom der PK-Kühlstelle sowie dem Flashgas-Massenstrom des Mitteldrucks zusammen.

Die Teilmassenströme über den Kühlstellen können aufgrund der vordefinierten Parameter Mitteldruck, Verdampfungstemperatur (PK und MK), Überhitzung (PK und MK) sowie der Inputgrösse Kältebedarf (PK und MK) direkt berechnet werden. Der Flashgas-Massenstrom ist abhängig vom gewählten Hochdruck.

Der Hochdruck der Anlage wird je nach thermischem Bedarf unterschiedlich bestimmt. Hat der Supermarkt keinen Heizbedarf, erfolgt die Hochdruckregelung nach optimalem COP. Dazu erfolgt die Berechnung im subkritischen Bereich gemäss des Grundlagenberichts über Kälteverdichter [9] nach der Formel

$$p_{HP,SK,opt} = ZG(\max[T_A + \Delta T_{GK,SK}, T_{C,SK,min}], x = 1.0).$$

Dabei entspricht  $ZG(\cdot)$  einer thermodynamischen Zustandsgleichung und  $x$  dem  $\text{CO}_2$  Dampfgehalt auf der Sattdampfkurve. Weiter ist die Temperaturdifferenz der Austrittstemperatur des  $\text{CO}_2$  aus dem Gaskühler zur Umgebungstemperatur  $\Delta T_{GK,SK}$  gegeben durch

$$\Delta T_{GK,SK} = \max\left[\frac{1}{4}T_A + \frac{5}{4} [^\circ\text{C}], \Delta T_{GK,SK,min} = 4 \text{ K}\right].$$

Die Berechnung für den transkritischen Bereich erfolgt gemäss [6] durch

$$p_{HP,TK,opt} = 2.7(T_A + \Delta T_{GK,TK}) \left[\frac{\text{bar}}{^\circ\text{C}}\right] - 6.0[\text{bar}],$$

mit der Temperaturdifferenz des  $\text{CO}_2$  zur Umgebung gemäss [9]

$$\Delta T_{GK,TK} = \min\left[-\frac{1}{8}T_A + \frac{51}{8} [^\circ\text{C}], \Delta T_{GK,TK,max} = 3 \text{ K}\right].$$

Besteht ein Heizbedarf, wird der Hochdruck so weit erhöht, dass der Heizbedarf durch den WT für Wärmenutzung gedeckt werden kann. Durch die Formulierung eines «äusseren» und «inneren» nichtlinearen Optimierungsproblems mit entsprechenden Nebenbedingungen, kann der Hochdruck ( $p_{HD}$ ), der Flashgas-Massenstrom ( $\dot{m}_{FG}$ ) und der Klimakälte-Massenstrom ( $\dot{m}_{KK}$ ) ermittelt werden.

Die Effizienz der jeweiligen Verdichter ist abhängig vom eingesetzten Modell sowie aktuellem Betriebspunkt. Diese wird in dieser Untersuchung beim MK-Verdichter durch einen konstanten isentropen Wirkungsgrad von 0.65 und beim PK-Verdichter und KK-Verdichter durch variable isentrope Wirkungsgrade abgebildet. Diese basieren auf empirisch ermittelten Polynomen, basierend auf den Ergebnissen des Grundlagenberichts über Kälteverdichter [9] gegeben durch

$$\eta_{KK} = 1.66 \cdot 10^{-6} p_{HD}^3 - 4.62 \cdot 10^{-4} p_{HD}^2 + 4.23 \cdot 10^{-2} p_{HD} - 0.593,$$

$$\eta_{PK} = 1.725 \cdot 10^{-6} p_{HD}^3 - 4.23 \cdot 10^{-4} p_{HD}^2 + 3.32 \cdot 10^{-2} p_{HD} - 0.124.$$

Anhand der Verdichter Wirkungsgrade kann dann die Austrittsenthalpie der Verdichter und somit deren Leistungsaufnahme ( $P_{verd}$ ) berechnet werden.

$$P_{verd} = \dot{m}_{verd} * (h_{verd,out} - h_{verd,in})$$