



**School of
Engineering**

IEFE Institut für Energiesysteme
und Fluid-Engineering

IEFE Energy Papers, 7(2018), Nr. 1

Free Cooling in der Klimakälte

Untersuchung des Potentials
in der Schweiz

Datum: 17. Mai 2018
Autoren: Stefan Rohrer, Martin König,
Frank Tillenkamp
Auftraggeber: Bundesamt für Energie BFE
Martin Stettler
3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Impressum

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften
School of Engineering
IEFE Institut für Energiesysteme und Fluid- Engineering
Technikumstrasse 9
CH-8400 Winterthur

www.zhaw.ch/iefe
info.iefe@zhaw.ch

DOI: 10.21256/zhaw-1369

Alle Rechte vorbehalten

© Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Winterthur, 2018

IEFE ist ein Institut der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

Experten

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

- Brunner Arnold (Brunner Consulting)
- Dumortier Robert
- Kriegers Michael (Meierhans und Partner AG)

Danksagung

Die Autoren danken dem BFE für die finanzielle Unterstützung des Projektes. Insbesondere Martin Stettler sei ausdrücklich gedankt.

Der Dank für die wertvolle Unterstützung und die konstruktive Zusammenarbeit geht auch an die mitwirkenden Experten Arnold Brunner (Brunner Consulting), Robert Dumortier, Michael Kriegers (Meierhans und Partner) und Thomas Lang (zweiweg GmbH).

Für weitere fachliche Unterstützung danken wir Luk End (Leplan AG) und Matthias Brügger (Leplan AG).

Abstract

In dieser Arbeit wurde das Potential von Free Cooling (direkte Rückkühlung des Kühlmediums mit Einbezug der Umgebung) in der Klimakälte bezogen auf die Schweiz untersucht. Die zahlreichen Ergebnisse und Diagramme aus dieser Arbeit ermöglichen dem Leser anhand weniger Schritte das Free Cooling Potential in Abhängigkeit von Vorlauftemperatur, Anwendungsart, Standort, Schaltung und Art der Rückkühlung abzuschätzen und so die Sinnhaftigkeit von Free Cooling oder das Optimierungspotential zu beurteilen. Eine Beschreibung dieses Vorgehens inkl. zahlreicher Hilfestellungen ist im Anhang ersichtlich.

Die Ergebnisse zeigen, dass der einflussreichste Parameter die benötigte Vorlauftemperatur des Kühlmediums ist. Werden vom Verbraucher Temperaturen unterhalb von 14°C benötigt, fällt das Free Cooling Potential bis auf ein paar wenige Prozent zusammen und ist daher nicht zu empfehlen, sofern keine grösseren internen Lasten (z.B. Rechenzentrum) vorhanden sind.

Weiter ist das Potential stark von den klimatischen Verhältnissen am Standort abhängig. Kältere Regionen wie die Alpen ermöglichen über das Jahr einen längeren Free Cooling Betrieb als vergleichsweise wärmere Regionen wie das Mittelland oder das Tessin. Nutzt man trockene oder hybride Rückkühler nur zur Vorkühlung, kann sich das Potential verdoppeln.

Die weitaus grössten Potentiale bieten Wasseranbindungen (See-, Fluss- oder Grundwasser) oder Erdsonden. Jedoch müssen die Potentiale dieser Anbindungen von Fall zu Fall separat beurteilt werden, denn Boden- resp. Grundwassertemperaturen sind stark vom Ort abhängig und bei der einfachen Modellrechnung in dieser Arbeit wurden keine dynamischen Effekte bei der Abgabe von Wärme an den Boden berücksichtigt. Bei der Anbindung einer Erdwärmesonde muss zudem beachtet werden, dass das Free Cooling eine mögliche Sondenregeneration konkurriert. Weiter müssen die Gesetze bezüglich Grundwassernutzung hinsichtlich Erwärmung eingehalten werden.

Da eine Wärmenutzung der Kältemaschine einer Wärmeabgabe an die Umgebung (Free Cooling Betrieb) klar vorzuziehen ist, muss immer geprüft werden, ob ein Free Cooling Betrieb nicht die Kapazität einer möglichen Wärmenutzung gefährdet.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
Symbolverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Modellierung, Abgrenzungen und Vereinfachungen bei der Berechnung	2
2.1 Modellierung	2
2.2 Untersuchte Parameter	2
2.3 Lastprofil	11
2.4 Annahmen und Vereinfachungen bei der Berechnung	14
2.5 Auswirkungen der getroffenen Vereinfachungen	15
3 Ergebnisse	17
3.1 Definition der ausgewerteten Grössen	17
3.2 Einfluss der Vorlauftemperatur des Kühlmediums auf das Potential	18
3.3 Einfluss der Schaltung auf das Potential	19
3.4 Einfluss der Jahresmitteltemperatur der Aussenluft auf das Potential (Standort)	19
3.5 Einfluss der Rückkühlart auf das Potential	20
3.6 Einfluss des Free Coolings auf die elektrische Energie	22
3.7 Einfluss des Free Coolings auf eine potentielle Wärmenutzung	23
3.8 Klassifizierung der Potentiale aus wirtschaftlicher Sicht	24
4 Fazit	28
4.1 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Industriekälteanwendungen	32
4.2 Ausblick	32
Literatur	33
Abbildungsverzeichnis	34
Tabellenverzeichnis	35
A Hilfe zur Beurteilung des Free Cooling Potentials in der Schweiz	36
A.1 Trockenrückkühlung	36
A.2 Hybridrückkühlung	36
A.3 Erdwärmesonde und Grundwasseranbindung	39
A.4 Auswertung der Diagramme	39
A.5 Interpolation für abweichende Parameter	42
B Zusätzliche Diagramme	43
B.1 Potential mit Trockenrückkühlung	43
B.2 Änderung elektrische Energie mit Trockenrückkühlung	48
B.3 Potential mit Hybridrückkühlung	53
B.4 Änderung elektrische Energie mit Hybridrückkühlung	58
B.5 Potential Erdwärmesonde	63
B.6 Potential Grundwasseranbindung	64

Abkürzungsverzeichnis

BFE	Bundesamt für Energie
IEFE	Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering
KGA	Kühlgrenzabstand
ZHAW	Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
A_{NGF}	Nettogeschossfläche	m^2
$T_{K,VL}$	Vorlauftemperatur des Kühlmediums	$^{\circ}C$
$T_{K,RL}$	Rücklauftemperatur des Kühlmediums	$^{\circ}C$
$T_{R,VL}$	Vorlauftemperatur der Rückkühlung	$^{\circ}C$
$T_{R,RL}$	Rücklauftemperatur der Rückkühlung	$^{\circ}C$
T_0	Verdampfungstemperatur des Kältemaschinenprozesses	$^{\circ}C$
T_C	Kondensationstemperatur des Kältemaschinenprozesses	$^{\circ}C$
T_{Ref}	Referenztemperatur für die Rückkühlung	$^{\circ}C$
ΔT_{WT}	Temperaturdifferenz Wärmeübertrager	K
W_{El}	Elektrische Energie ohne Free Cooling	kWh
$W_{El,FC}$	Elektrische Energie im Free Cooling Betrieb	kWh
Q_{Soll}	Soll Wärmelast	kWh
Q_{Syst}	Im System gespeicherte Energie	kWh
$Q_{K,Soll}$	Anfallende Kältelast	kWh
$Q_{K,KM}$	Wärmemenge abgeführt durch Kältemaschine	kWh
$Q_{K,FC}$	Wärmemenge abgeführt durch Free Cooling	kWh
$Q_{H,Soll}$	Anfallende Wärmelast	kWh
Q_C	Kondensationsenergie ohne Free Cooling	kWh
$Q_{C,FC}$	Kondensationsenergie im Free Cooling Betrieb	kWh
Φ_i	Spezifische interne Wärmelasten	W/m^2
Φ_e	Spezifische externe Wärmelasten	W/m^2
Φ_s	Spezifische solare Wärmelasten	W/m^2
Φ_T	Spezifische Wärmelasten aus der Transmission	W/m^2
Φ_V	Spezifische Wärmelasten aus der Aussenluftzufuhr	W/m^2
$\Phi_{TV,H,Max}$	Max. spezifische Wärmelasten am Sommerauslegetag aus der Transmission und der Aussenluftzufuhr	W/m^2 W/m^2
$\Phi_{TV,K,Max}$	Min. spezifische Kältelast am Winterauslegetag aus der Transmission und der Aussenluftzufuhr	W/m^2 W/m^2
Θ_e	Aussenlufttemperatur	$^{\circ}C$
$\Theta_{e,a}$	Jahresmitteltemperatur der Aussenluft	$^{\circ}C$
$\Theta_{e,H}$	Auslegungstemperatur für den Heizbetrieb	$^{\circ}C$
$\Theta_{e,K}$	Auslegungstemperatur für den Kühlbetrieb	$^{\circ}C$

$\Theta_{R,H}$	Auslegungsraumtemperatur im Heizbetrieb	$^{\circ}C$
$\Theta_{R,K}$	Auslegungsraumtemperatur im Kühlbetrieb	$^{\circ}C$
$\Theta_{G,a}$	Mittlere Bodentemperatur	$^{\circ}C$

Index	Beschreibung
--------------	---------------------

a	Jahr
\ddot{U}	Übergangszeit
h	Stunde

1 Einleitung

In der Klimakälte wird Free Cooling oft als energiesparende Massnahme angewandt. Als Free Cooling wird eine Bypass-Schaltung eines Kältemaschinenkreises mit direkter Rückkühlung des Kühlmediums durch die Umgebung verstanden, nicht eine Evakuierung der Wärme mittels nächtlicher Fensterlüftung oder Lüftungsanlage. Während des Betriebs des Free Coolings wird die Kältemaschine nicht oder nur teilweise benötigt. Dies steht im Gegensatz zu einer allfälligen Wärmenutzung der Kältemaschine. Wird der Kältemittelkreis für das Free Cooling still gelegt, könnte die Wärmenutzung gefährdet werden. Kommt es zu einem ungedeckten Bedarf, muss die Wärme auf andere Weise bereitgestellt werden (z.B. fossil). Um eine Abschätzung des Free Cooling Potentials machen zu können, fehlen allgemeingültige Beurteilungskriterien und Richtlinien. Das Ziel ist es, eine vergleichbare Beurteilung der Sinnhaftigkeit von Free Cooling zu erstellen. Dabei wird die Wärmemenge, welche durch Free Cooling abgeführt werden kann, mit der jährlich anfallende Kühllast eines Gebäudes verglichen. Dadurch kann eine Aussage getroffen werden, zu welchem Grad die benötigte Kühllast durch Free Cooling gedeckt werden könnte.

Dieser Bericht enthält die Ergebnisse einer Untersuchung des Free Cooling Potentials mittels einer Modellrechnung. Das gesamte System wird als Vereinfachung quasistatisch betrachtet. Dies bedeutet, dass Speichereffekte in der Gebäudemasse und in allfälligen Kälte- oder Wärmespeichern nicht berücksichtigt werden. Die anfallenden Lasten der betrachteten Gebäude wurden durch die Abbildung von Standard-Nutzungsbedingungen definiert. Untersucht wurden die Auswirkungen von verschiedenen Klimakälteanwendungen, Temperaturniveaus, Klimaverhältnissen (Standorte), Schaltungen und Rückkühlarten auf das Free Cooling Potential. Insgesamt wurden so 1'200 Parameterkombinationen ausgewertet.

Im Anhang der Arbeit befindet sich eine Hilfestellung zur Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse. Dadurch ist es möglich, die Einflüsse der wichtigsten Parameter auf das Free Cooling Potential abzuschätzen. Zudem wird aufgezeigt, wie Erkenntnisse zu abweichenden Parameter aus den vorhandenen Ergebnissen abgeleitet werden können. Weiter befinden sich die Ergebnisdigramme zu allen Parameterkombinationen im Anhang.

2 Modellierung, Abgrenzungen und Vereinfachungen bei der Berechnung

Die Untersuchungen sollen Erkenntnisse über sinnvolle Einsatzbereiche von Freecooling im Bereich der Klimakälte liefern. Hierzu muss eine Klimakälteanlage in einem Beispielgebäude betrachtet werden. Das Gebäude kann gemeinsam mit der Klimakälteanlage als Gesamtsystem interpretiert werden, welches modelliert und untersucht werden kann.

2.1 Modellierung

Die Modellierung des Gesamtsystems basiert auf thermodynamischen Auswertungen von Stundenintervallen über ein Kalenderjahr. Für jede Parameterkombination wurde ein Rechnungsgang durchgeführt, in dem die entsprechenden Randbedingungen der gewählten Parameter berücksichtigt wurden. Das gesamte System wird dabei als quasistatisch betrachtet. Dies bedeutet, dass Speichereffekte in der Gebäudemasse und in allfälligen Kälte- oder Wärmespeichern nicht berücksichtigt werden (vgl. Kap. 2.4). Zur vereinfachten Modellbildung wird das Gesamtsystem der Klimakälteanlage mit Free Cooling in drei Teilsysteme aufgeteilt: die Kälteerzeugung, die Rückkühlung (Wärmeabgabe) und die Verteilsystem des Kühlmediums (Wärmeaufnahme) (vgl. Abb. 1). Diese werden als Parameter bezeichnet. Insgesamt wurden 1'200 Parameterkombinationen untersucht. Die einzelnen Parameter werden in Kap. 2.2 genauer beschrieben.

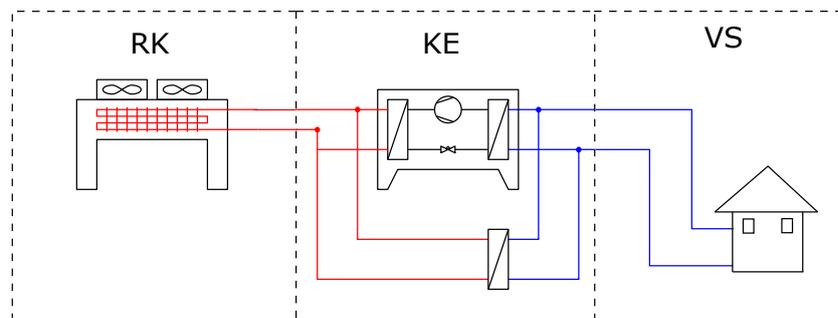


Abbildung 1 – Einteilung des Gesamtsystems in drei Teilsysteme

(RK: Rückkühlung (Wärmeabgabe) / KE: Kälteerzeugung / VS: Verteilsystem (Wärmeaufnahme))

2.2 Untersuchte Parameter

Als Parameter werden die veränderbaren Teilsysteme und Randbedingungen bezeichnet. Folgende Parameter wurden in die Simulation miteinbezogen:

- Die Schaltung der Kälteerzeugung
- Die Art der Rückkühlung (Wärmeabgabe)
- Die Vorlauftemperatur des Kühlmediums
- Der Standort und die damit verbundenen Randbedingungen
- Die Art der Kühlanwendung

Betrachtet wurden, wenn nicht anders angegeben, alle möglichen Parameterkombinationen. Die einzelnen Parameter und allfällige Abgrenzungen werden in Folge aufgeführt.

2.2.1 Schaltung der Kälteerzeugung

Die Kälteerzeugung beinhaltet die Kältemaschine sowie Komponenten zur Wärmeübertragung vom Verteilsystem zur Rückkühlung für den Free Cooling Betrieb. Die Temperaturunterschiede der Wärmeübertrager ΔT_{WT} wurden als Mittelwerte der anzustrebenden Werte gemäss VDMA 24247-8 [1] gewählt. Für den Kältemaschinenprozess wurden zudem folgende Randbedingungen definiert:

- Kältemittel: *R134a*
- Einstufiger Prozess mit halbhermetischem Hubkolbenverdichter
- Verdampfungstemperatur T_0 : Abhängig von der Vorlauftemperatur des Kühlmediums $T_{K,VL}$ und den Temperaturunterschieden über die jeweiligen Wärmeübertrager ΔT_{WT}
- Kondensationstemperatur T_C : Abhängig von der Rücklauftemperatur des Kühlmediums $T_{R,RL}$, den Temperaturunterschieden über die jeweiligen Wärmeübertrager ΔT_{WT} und der Einsatzgrenze des Verdichters

Um den Einfluss von verschiedenen hydraulischen Anbindungen zu klären, wurden insgesamt fünf verschiedene Schaltungen betrachtet. Die Schaltungen wurden vorgängig im Rahmen eines Experten-Workshops bestimmt. Jede Schaltung wurde pro Parameterkombination mit und ohne Free Cooling simuliert. Dies lässt einen Vergleich zwischen Free Cooling Betrieb und herkömmlichem Kältemaschinenbetrieb zu. In der Folge sind die einzelnen Schaltungen beschrieben.

a) Schaltung 1:

Kopplung Verbraucher- und Rückkühlkreis, Bivalent-Alternative Betriebsart¹

Die Kopplung des Verbraucher- und des Rückkühlkreises mit Hilfe eines Wärmeübertragers, welcher parallel zur Kältemaschine angeordnet ist (vgl. Abb. 2), stellt eine einfache Einbindung des Free Coolings dar, für die kein eigener Rückkühler nötig ist. Jedoch bedingt der zusätzliche Wärmeübertrager zwischen Kühlstelle und Wärmeabgabe eine höhere Temperaturdifferenz zwischen der Vorlauftemperatur des Kühlmediums $T_{K,VL}$ und der Rücklauftemperatur der Wärmeabgabe $T_{R,RL}$.

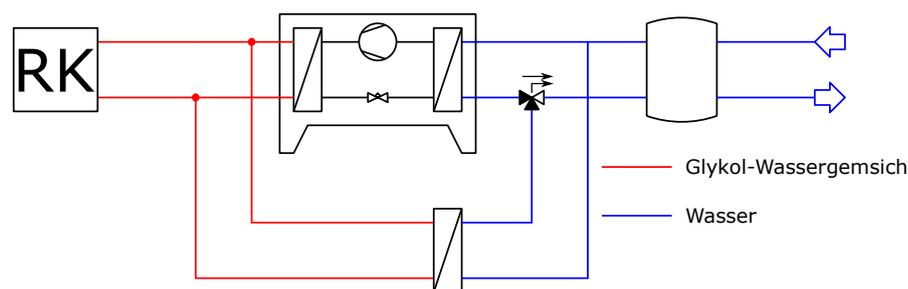


Abbildung 2 – Schematische Darstellung Schaltung 1

¹Die anfallende Kühllast wird durch die Kältemaschine oder das Free Cooling gedeckt. Es ist kein Mischbetrieb möglich.

d) Schaltung 4:

Luft-Rückkühleinheit mit direkter Kondensation erweitert um einen Luftrückkühler für das Free Cooling, Bivalent-Alternative Betriebsart

Durch die direkte Kondensation (vgl. Abb. 5) kann die Temperaturdifferenz zwischen Umgebungstemperatur T_U und der Kondensationstemperatur T_C tief gehalten werden. Dadurch kann bei gleichen Umgebungsbedingungen im Vergleich zur indirekten Kondensation (Schaltungen 3 & 4) mit einer geringeren Kondensationstemperatur gerechnet werden.

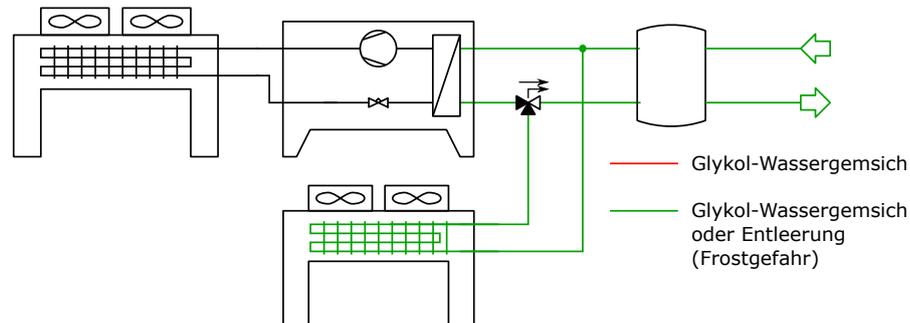


Abbildung 5 – Schematische Darstellung Schaltung 4

e) Schaltung 5:

Luft-Rückkühleinheit mit direkter Kondensation erweitert um einen Luftrückkühler für das Free Cooling, Bivalent-Parallele Betriebsart

Schaltung 5 (vgl. Abb. 6) kombiniert die direkte Kondensation mit der Bivalent-Parallelen Betriebsart.

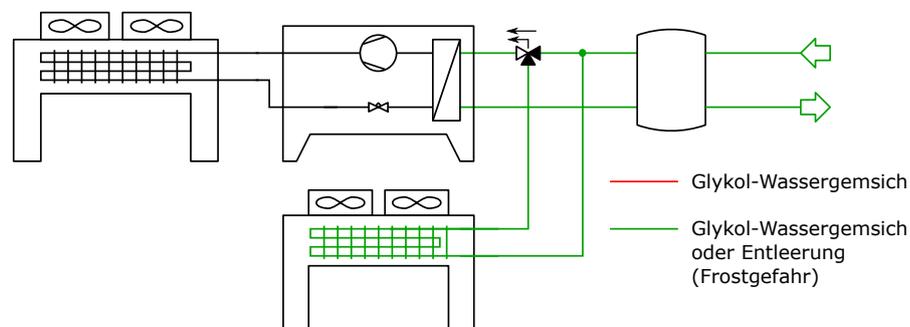


Abbildung 6 – Schematische Darstellung Schaltung 5

f) Referenzschaltung 0: Gleichberechtigte Kälte- / Wärmenutzung

Diese Schaltung soll den Stand der Technik darstellen. Bei der gleichberechtigten Kälte- / Wärmenutzung (vgl. Abb. 7) werden Speicher mit fixen Temperaturen auf der kalten sowie auf der warmen Seite eingesetzt. Die Kältemaschine wird kältegeführt betrieben. Ist kein Wärmebedarf vorhanden, wird der Wärmespeicher nötigenfalls durch die Rückkühlung abgekühlt. Durch die fixen Temperaturen in den Speichern kann die Kältemaschine in definierten Zuständen betrieben werden, was einen effizienten Betrieb ermöglichen soll.

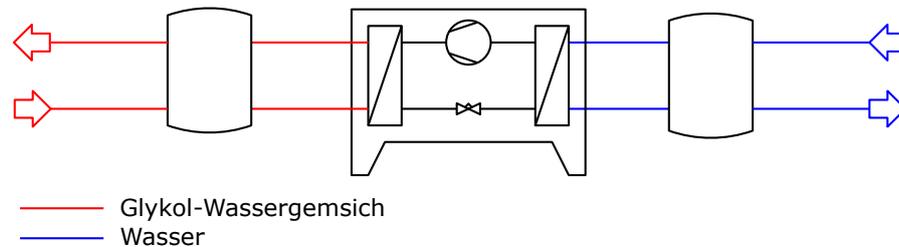


Abbildung 7 – Schematische Darstellung Schaltung 0

Abgrenzung:

Aufgrund der getroffenen Vereinfachungen in der Modellrechnung (vgl. Kap. 2.4) kann die Speicherbewirtschaftung nicht abgebildet werden. Dadurch kann die Schaltung 0 in die Schaltungen 1-3 ohne Free Cooling Betrieb überführt werden. Da die Schaltungen 1-3 ohne Free Cooling simuliert werden, ist eine separate Simulation der Schaltung 0 hinfällig.

Eine weitere Exploration der Unterschiede von Schaltung 0 zu den restlichen Schaltungen wäre interessant. Jedoch bedingt dies eine transiente Betrachtung des Kältebedarfs, des Wärmebedarfs, des Speicherverhaltens sowie eine Implementation einer kompletten Regelung für die Speicherbewirtschaftung, was den Simulationsaufwand stark vergrößern würde.

2.2.2 Art der Rückkühlung (Wärmeabgabe)

Die Rückkühlung beinhaltet die Wärmeabgabe an die Umgebung. Die Art der Rückkühlung beeinflusst massgeblich die Rücklauftemperatur der Wärmeabgabe $T_{R,RL}$ und somit die mögliche Betriebszeit des Free Coolings.

Die Rückkühler wurden mit einer maximalen Kapazität simuliert, welche nicht überschritten wird. Als maximale Kapazität wurde die Auslegungslast der Gebäudekühlung definiert, welche standort- und anwendungsspezifisch gemäss SIA 2024 [2] berechnet wurde. Das bedeutet, dass Rückkühler, welche nur fürs Free Cooling eingesetzt werden (vgl. Schaltung 2-5), die komplette Auslegungslast abführen können. Die Auslegung berücksichtigt standortspezifische Randbedingungen der Aussenluft (gem. Sommer-Auslegungsdaten SIA 2028 [3]) sowie anwendungsspezifische Grössen (gem. SIA 2024 [2]). Die Kühlgrenzabstände wurden zudem als konstant betrachtet. In der Folge werden die betrachteten Rückkühlarten beschrieben.

a) Trockenrückkühler:

Der Kühlgrenzabstand (KGA)³ für den Trockenrückkühler wurde gemäss Richtlinie SWKI 2003-3 [4] festgelegt. Die Referenztemperatur T_{Ref} ist die standortabhängige Aussenlufttemperatur Θ_e . Die benötigte elektrische Energie für die Rückkühlung (Ventilatoren) wurde nach dem Rechenmodell von Pack Calculation Pro berechnet [5].

b) Hybridrückkühler:

Bei der Auslegung von Hybridrückkühlern ist ein wesentlicher Faktor die Wahl des Umschaltzeitpunktes von Trocken- auf Nasskühlung (abhängig von der Aussentemperatur). Bei der Berechnung des Hybridrückkühlers wurde von einer durchgehenden Besprühung des Rückkühlers ausgegangen, obwohl dies nicht den Regelfall darstellt. Dadurch soll das maximal mögliche Potential von Hybridrückkühlern erörtert werden. Der Kühlgrenzabstand wurde gemäss Richtlinie SWKI 2003-3 [4] festgelegt. Die Referenztemperatur ist die standortabhängige Feuchtkugelttemperatur (Psychrometertemperatur). Die benötigte elektrische Energie für die Rückkühlung (Ventilatoren) wurde nach dem Rechenmodell von Pack Calculation Pro berechnet [5].

Abgrenzung:

Bei der Auswertung des Hybridrückkühlers ist die benötigte elektrische Energie für die Ventilatoren miteinbezogen worden. Die elektrische Energie für die Besprühung sowie der Wasserverbrauch wurden nicht beachtet. Die nötigen Aufwendungen für eine Wasserbehandlung sind ebenfalls nicht berücksichtigt.

c) Erdsonde:

Der Kühlgrenzabstand der Erdsonde wurde gemäss Auslegungsdaten SIA 384/6 [6] definiert. Als Referenztemperatur dient die standortabhängige Bodentemperatur gem. vereinfachtem Berechnungsverfahren SIA 384/6 [6]. Die benötigte elektrische Energie für die Rückkühlung (Umwälzpumpe) wurde gemäss SIA 384/3 [7] berechnet.

Abgrenzung:

Die Temperaturerhöhung der Erdsonde durch den Wärmeeintrag des Free Coolings und der Kältemaschine wurde in den Berechnungen nicht berücksichtigt (keine geothermische Modellierung). Zudem kann die Bodentemperatur an den Standorten nur abgeschätzt werden. Diese Vereinfachungen lassen keine scharfe Abgrenzung des Potentials der Erdsonde zu, jedoch kann

³Temperaturunterschied zwischen der Rücklauftemperatur der Wärmeabgabe und der Referenztemperatur
 $KGA = T_{R,RL} - T_{Ref}$

das maximal mögliche Potential abgeschätzt werden.

Für die Schaltungen 2 bis 5 wird die Rückkühlung per Erdsonde ausgeschlossen, da davon ausgegangen wird, dass die Erdsonde in diesen Fällen auch zum Geo Cooling genutzt würde. Dadurch liessen sich die Schaltungen 2 bis 5 in die Schaltung 1 überführen.

d) Grundwasseranbindung:

Der Kühlgrenzabstand der Grundwasseranbindung wurde als Mittelwert der anzustrebenden Werte für Plattenwärmeübertrager gemäss VDMA 24247-8 [1] gewählt. Als Referenztemperatur dient die standortabhängige Bodentemperatur für die Erstbewertung nach SIA 384/7 [8], welche der Grundwassertemperatur gleichgesetzt wurde (aufgeführt unter Kap. 2.2.4). Die benötigte elektrische Energie für die Rückkühlung (Umwälzpumpe), wurde gemäss SIA 384/3 [7] berechnet.

Abgrenzung:

Allfällige Schwankungen der Grundwassertemperatur wurden in den Berechnungen nicht berücksichtigt. Zudem kann die Bodentemperatur an den Standorten nur abgeschätzt werden. Diese Vereinfachungen lassen keine scharfe Abgrenzung des Potentials der Grundwasseranbindung zu, jedoch kann das maximal mögliche Potential abgeschätzt werden.

Eine Nutzung von Seewasser wurde nicht separat behandelt. Wird jedoch davon ausgegangen, dass das Seewasser aus geeigneter Tiefe angesaugt wird, kann vereinfacht ebenfalls mit konstanten Temperaturen gerechnet werden. Das heisst, das Potential einer Seewassernutzung kann durch den Vergleich der Wassertemperaturen (vgl. Kap. 2.2.4) abgeschätzt werden.

Auf die Betrachtung der Flusswassernutzung wurde verzichtet, denn dabei muss mit grossen Temperaturschwankungen über dem Jahr gerechnet werden. Daher ist die getroffene Vereinfachung nicht sinnvoll für die Betrachtung von Flusswasser.

Für die Schaltungen 2 bis 5 wird die Rückkühlung per Wasseranbindung ausgeschlossen, da davon ausgegangen wird, dass die Grundwasseranbindung auch zur Kühlung genutzt würde. Dadurch liessen sich die Schaltungen 2 bis 5 in die Schaltung 1 überführen.

2.2.3 Vorlauftemperatur des Kühlmediums

Die Vorlauftemperatur des Kühlmediums $T_{K,VL}$ ist ein Parameter des Abgabesystems. Durch die Wahl des Temperaturniveaus des Kühlmediums wird auch die Temperatur für das Free Cooling festgelegt. Dadurch wird massgeblich die mögliche Betriebszeit des Free Coolings beeinflusst. Für die Berechnungen wurden folgende Temperaturen gewählt:

- 6°C (SIA 382/1)
- 10°C (SIA 382/1)
- 14°C (SIA 382/1)
- 18°C (Interpolation)
- 22°C (IT-Anwendung)

Diese beinhalten die nach SIA 382/1 [9] vorgeschriebenen minimalen Vorlauftemperaturen, sowie eine Vorlauftemperatur, welche für IT-Anwendungen üblich ist und einen Zwischenwert zur Interpolation bei abweichenden Vorlauftemperaturen. Die Vorlauftemperaturen werden als konstant angenommen. Es wird somit keine Schiebung der Vorlauftemperaturen berücksichtigt.

2.2.4 Standort und die damit verbundenen Randbedingungen

Die Wahl des Standortes beeinflusst durch die unterschiedlichen Umgebungsbedingungen den Kühl- und Heizbedarf einer Anwendung sowie die minimale Temperatur der Wärmeabgabe an die Umgebung $T_{R,RL}$. Zur Beurteilung der Standortabhängigkeit werden fünf verschiedene Standorte untersucht. Bei der Auswahl der Standorte wurde auf eine unterschiedliche Jahresmitteltemperatur und eine möglichst breite, geografische Abdeckung geachtet. Die gewählten Standorte können in drei Regionen mit ähnlichen klimatischen Bedingungen unterteilt werden: Mittelland, Alpen und Tessin. Diese Einteilung dient der einfacheren Auswertung der Ergebnisse.

Die Daten zur Berechnung wurden von Meteo Schweiz bezogen (Stundenmittel 2 m über Boden). Ausgewertet wird ein Intervall von einem Kalenderjahr. Es wird bewusst auf langjährige Mittelwerte verzichtet, da diese die Temperaturschwankungen glätten. In den Jahren 2010 bis 2016 weist das Jahr 2013 über alle betrachteten Stationen die kleinste Abweichung der Jahresmittelwerte zur Norm auf (gem. Meteo Schweiz). Daher wird das Jahr 2013 als Bezugsjahr verwendet. In Tab. 1 sind die für die Berechnung verwendeten Grössen für die jeweiligen Stationen aufgeführt:

Tabelle 1 – Verwendete Wetterdaten

Messwert	Einheit	Granularität
Lufttemperatur 2 m über Boden	$^{\circ}C$	Stundenmittel
Feuchttemperatur (Psychrometertemperatur) 2 m über Boden	$^{\circ}C$	Stundenmittel
Luftdruck auf Stationshöhe (QFE)	hPa	Stundenmittel
Relative Luftfeuchtigkeit 2 m über Boden	%	Stundenmittel
Globalstrahlung	W/m^2	Stundenmittel

Tab. 2 listet die untersuchten Standorte und deren Randbedingungen auf. Massgebend für die Auswertung sind die Regionen und die damit verbundenen Jahresmitteltemperaturen der Umgebungsluft $\Theta_{e,a}$ und Bodentemperaturen $\Theta_{G,a}$. Daher wird in der Auswertung auf die Regionen verwiesen. Sollen Anwendungen ausgewertet werden, welche sich stark von den ausgewiesenen Fällen unterscheiden, kann das Potential in einer ersten Näherung durch eine Interpolation zwischen vorhandenen Werten bestimmt werden (vgl. A.5).

Tabelle 2 – Standorte und deren Randbedingungen

Region	Standort	m ü. M.	Jahresmitteltemp. der Aussenluft	Bodentemp. (Grundwassertemp.)
Mittelland	Basel / Binningen	316m	10.3 $^{\circ}C$	12.4 $^{\circ}C$
	Genève-Cointrin	410m	10.2 $^{\circ}C$	12.6 $^{\circ}C$
	Zürich / Kloten	426m	9.4 $^{\circ}C$	11.3 $^{\circ}C$
Alpen	Davos	1594m	3.6 $^{\circ}C$	7.2 $^{\circ}C$
Tessin	Lugano	273m	12.8 $^{\circ}C$	14.4 $^{\circ}C$

2.2.5 Art der Kühlanwendung

Zur Unterscheidung von verschiedenen Nutzungsarten wurden vier Standard-Nutzungsbedingungen gemäss SIA 2024 [2] ausgewählt. Bei der Auswahl wurde auf einen vorhandenen Kühlbedarf und eine möglichst breite Streuung des Anteils der internen Wärmelast zur gesamten Wärmelast an den Sommer-Auslegungstage geachtet (vgl. Gl. 1).

$$\text{Anteil interne Wärmelast} = \frac{\Phi_i}{\Phi_i + \Phi_e} \quad (1)$$

Folgende Nutzungsbedingungen wurden berücksichtigt (vgl. Tab. 3).

Tabelle 3 – Untersuchte Standard-Nutzungsbedingung

Anwendung	Bez. gem . SIA 2024	Anteil interne Wärmelast
Spital/Arztpraxis	Behandlungsräume	51%
Bürogebäude	Grossraumbüro	57%
Kaufhaus	Fachmarkt, Warenhaus	83%
Rechenzentrum	Serverraum	99%

2.3 Lastprofil

Für jede Parameterkombination wurde ein Lastprofil mit stündlichen Wärme- resp. Kältelasten berechnet. Darin wurden folgende Einflüsse berücksichtigt:

- Wärme- / Kältelasten durch Transmission Φ_T und aus der Aussenluftzuführung Φ_V
- Interne Lasten Φ_i
- Solare Einträge Φ_s
- Die stündlich anfallenden Wärme- / Kältelasten Q_{Soll}
- Die Freigabe für den Kühl- resp. Heizbetrieb

Die stündlich anfallenden Soll-Wärmelasten wurden gem. SIA 2024 [2] berechnet (vgl. Gl. 2). Ist die Soll-Wärmelast negativ, liegt eine Kühllast vor (vgl. Gl. 3). Ist die Soll-Wärmelast positiv, liegt eine Heizlast vor (vgl. Gl. 4)

$$Q_{Soll} = (\Phi_T + \Phi_v + \Phi_i + \Phi_s) \cdot A_{NGF} \cdot 1 \text{ h}/1000 \quad [kWh] \quad (2)$$

$$Q_{Soll} \leq 0 \quad \Rightarrow \quad Q_{K,Soll} = Q_{Soll} \quad (3)$$

$$Q_{Soll} \geq 0 \quad \Rightarrow \quad Q_{H,Soll} = Q_{Soll} \quad (4)$$

Dadurch lassen sich Lastprofile erstellen, welche den Standort sowie die Anwendung berücksichtigen (vgl. Abb. 8). Die einzelnen Lastanteile werden nachfolgend beschrieben.

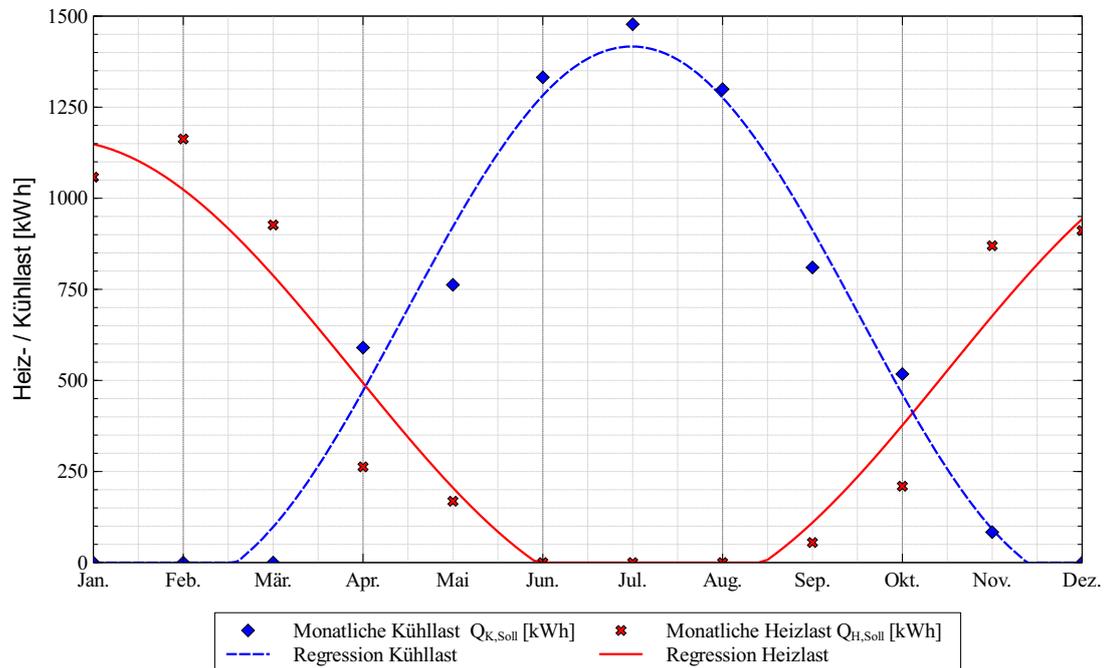


Abbildung 8 – Monatlicher Kühl- und Heizbedarf

(Standort: Mittelland ($\Theta_{e,a} = 9.4^\circ C$) / Anwendung: Bürogebäude)

2.3.1 Lasten durch Transmission und durch die Aussenluftzufuhr:

Es wurde angenommen, dass die Lasten, welche durch Transmission Φ_T und durch die Aussenluftzufuhr Φ_V zustande kommen, linear abhängig von der Aussenlufttemperatur Θ_e sind (vgl. Abb. 9). Beide Lasten werden gemeinsam in der Grösse Φ_{TV} berechnet. Die Last aus der Aussenluftzufuhr beinhaltet die Lasten, welche durch die mechanische Lüftung und durch die Infiltration zustande kommen. Die Wärmerückgewinnung der mechanischen Lüftung wird dabei berücksichtigt. Die Last aus der Transmission beinhaltet die Transmission über opake und transparente Bauteile.

- Die Maximalwerte für den Heizfall $\Phi_{TV,H,Max}$ und für den Kühlfall $\Phi_{TV,K,Max}$ liegen an den Auslegungstagen im Sommer und im Winter vor.
- Nähert sich die Aussenlufttemperatur Θ_e der vorgegebenen Raumtemperatur im Winter $\Theta_{R,K}$ oder im Sommer $\Theta_{R,H}$ an, werden die Lasten gleich Null.
- Zwischenwerte werden linear interpoliert.
- Wird die Aussenlufttemperatur Θ_e grösser als die Auslegungstemperatur im Winter $\Theta_{e,H}$ oder im Sommer $\Theta_{e,K}$, wird mit der maximalen Last gerechnet.

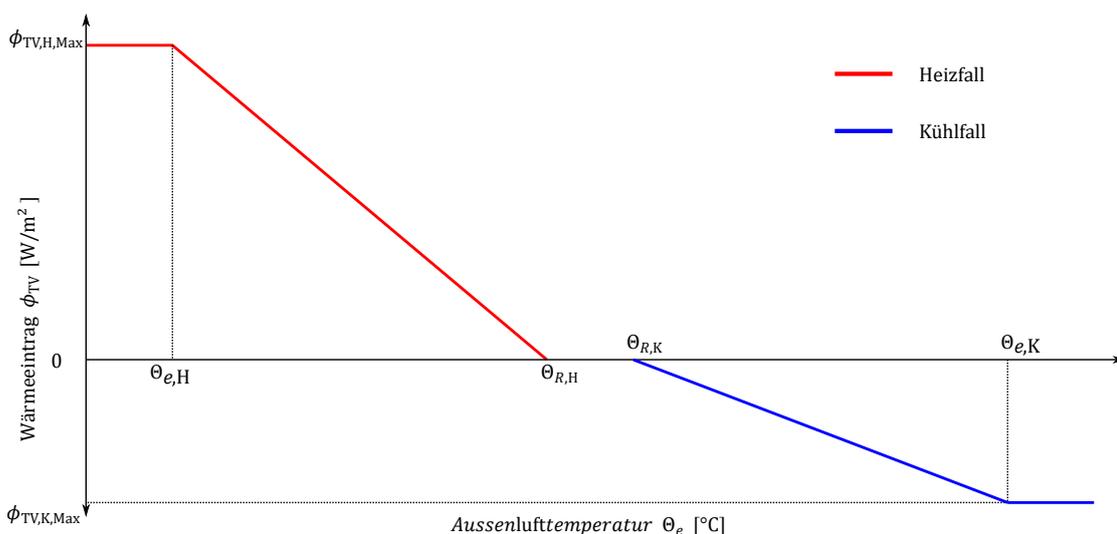


Abbildung 9 – Berechnung der Wärme- / Kältelasten durch Transmission und durch die Aussenluftzufuhr

Auslegung für den Kühlfall

Die maximale Last im Kühlfall $\Phi_{TV,K,Max}$ wurde gemäss SIA 2024 [2] standort- und anwendungsspezifisch berechnet. Die Auslegungstemperatur $\Theta_{e,K}$ wurde nach den maximalen Temperaturen während den drei Sommer-Auslegungsdaten gem. SIA 2028 [3] gewählt. Gebäudespezifische Grössen sowie die vorgegebene Raumtemperatur $\Theta_{R,K}$ wurden gem. SIA 2024 [2] definiert.

Auslegung für den Heizfall

Die maximale Last im Heizfall $\Phi_{TV,H,Max}$ wurde gemäss SIA 2024 [2] standort- und anwendungsspezifisch berechnet. Die Auslegungstemperatur $\Theta_{e,H}$ wurde nach den Auslegungswerten für die Norm-Heizlast gem. SIA 2028 [3] definiert. Gebäudespezifische Grössen sowie die vorgegebene Raumtemperatur $\Theta_{R,H}$ wurden gem. SIA 2024 [2] definiert.

2.3.2 Interne Lasten:

Die internen Lasten Φ_i wurden gem. SIA 2024 [2] berechnet. Darin sind die Wärmeeinträge durch Geräte Φ_A , durch Personen Φ_p sowie durch Beleuchtung Φ_L berücksichtigt (vgl. Gl. 5). Bei der Berechnung wurden die Personalbelegung, die Auslastung der Betriebseinrichtungen sowie die Nutzungstage gem. SIA 2024 [2] miteinbezogen.

$$\Phi_T = \Phi_A + \Phi_p + \Phi_L \quad [W/m^2] \quad (5)$$

2.3.3 Solare Einträge:

Solare Einträge Φ_S wurden gem. SIA 2024 [2] berechnet. Die Globalstrahlung wurde standortspezifisch angepasst. Miteinbezogen wurde ein aussenliegender Sonnenschutz. Gebäudespezifische Grössen wurden abhängig von der Anwendung gem. SIA 2024 [2] übernommen.

2.3.4 Freigabe für Kühl- resp. Heizbetrieb:

Neben der Berechnung der anfallenden Lasten wurden Kriterien zur Regulierung des Kühl- resp. Heizbetriebs festgelegt.

- Die Kühlfreigabe wird erteilt, wenn in den vergangenen 72h die Aussentemperaturen niemals unter $16.0^\circ C$ fielen (gleitende Schwellwertbetrachtung $\Theta_e > 16.0^\circ C$).
- Die Heizfreigabe wird erteilt, wenn in den vergangenen 72h die Aussentemperaturen nie $16.0^\circ C$ überschritten haben (gleitende Schwellwertbetrachtung $\Theta_e < 16.0^\circ C$).

Die Implementation der Kühl- und Heizfreigabe mit der Totzeit von 72h verhindert Schwankungen im Lastprofil, welche ansonsten durch die quasistatische Betrachtung hervorgerufen würden. Beim Rechenzentrum wird auf Grund der sehr hohen internen Lasten eine ganzjährige Kühlfreigabe definiert.

2.4 Annahmen und Vereinfachungen bei der Berechnung

Auf Grund der Komplexität der betrachteten Systeme mussten für die Berechnungen im ersten Ansatz diverse Annahmen und Vereinfachungen getroffen werden:

Dynamik und Speicherverhalten

Bei den Berechnungen wird kein Speicherverhalten berücksichtigt. Das bedeutet, dass die gesamten anfallenden Lasten innerhalb eines Zeitschrittes (von einer Stunde) durch das System abtransportiert werden (vgl. Gl. 6):

$$\frac{dQ_{Syst}}{dt} \approx \Delta Q_{Syst,h=i} = Q_{soll,h=i} + Q_{K,FC,h=i} + Q_{K,KM,h=i} = 0 \quad (6)$$

$\Delta Q_{Syst,h=i}$	Die Änderung der Energiemenge im System zur Stunde i
$Q_{soll,h=i}$	Soll-Wärmelast zur Stunde i
$Q_{K,FC,h=i}$	Wärmemenge abgeführt durch Free Cooling zur Stunde i
$Q_{K,KM,h=i}$	Wärmemenge abgeführt durch Kältemaschine zur Stunde i

Dies führt zu einer quasistatischen Betrachtung des Systems. Das heisst, es wird keine Speicherbewirtschaftung berücksichtigt und auch die Gebäudemasse wird vernachlässigt. Die Möglichkeit einen Kältespeicher zu Zeiten tiefer Aussentemperaturen zu laden, um diesen später bei erhöhten Aussentemperaturen zu nutzen, wird daher nicht abgebildet.

Betrachtung von einzelnen Nutzungen

Jede Parameterkombination wird einzeln betrachtet ohne gegenseitigen Einfluss. Das heisst die gesamte anfallende Last wird durch eine Nutzungsart bestimmt. Das bedeutet somit auch, dass eine Quernutzung zwischen den einzelnen Anwendungen nicht möglich ist und bedingt, dass im reinen Klimakältebetrieb keine Gleichzeitigkeit von Wärme- und Kältelast vorkommt.

Dimensionierung Free Cooling Rückkühler

Der Rückkühler wird so gross gewählt, dass er bei jeder Anwendung genügend Kapazität besitzt, um die maximale Kühlleistung am Auslegungspunkt abzugeben (vgl. Kap. 2.2.2). Die Rückkühler welche nur fürs Free Cooling eingesetzt werden (vgl. Schaltung 2-5), können demnach die komplette Auslegungslast abführen. Fallen Lasten an, welche grösser sind als die definierte Kapazität der Rückkühler, wird die abgegebene Wärmemenge durch die Kapazität des Rückkühlers begrenzt. Massgebend für den Free Cooling Betrieb sind die Referenztemperatur für die Rückkühlung T_{Ref} , die Temperaturdifferenz über die Wärmeübertrager ΔT_{WT} und die Vorlauftemperatur des Kühlmediums $T_{K,VL}$.

Durchgehende Besprühung der Hybridkühler

Bei der hybriden Rückkühlung wurde die Feuchtkugeltemperatur (Psychrometertemperatur) als Referenztemperatur T_{Ref} verwendet. Das bedeutet, es wird von einer durchgehenden Besprühung des Rückkühlers ausgegangen. Durch diese Vereinfachung wird das maximal mögliche Potential abgeschätzt.

Temperaturdifferenzen über die Wärmeübertrager

Die Temperaturdifferenzen über die Wärmeübertrager ΔT_{WT} und die Kühlgrenzabstände der Rückkühler wurden als konstant angenommen. Diese wurden als Mittelwerte der anzustrebenden Werte gemäss VDMA 24247-8 [1], SIA 384/6 [6] oder SWKI 2003-3 [4] gewählt.

Temperaturverhältnisse Grundwasseranbindung und Erdsonde

Die Grundwassertemperatur wurde als konstant angenommen und gemäss Erstbewertung nach SIA 384/7 [8] definiert. Zudem wurde angenommen, dass der Wärmeeintrag in das Grundwasser unlimitiert möglich ist.

Die Temperaturerhöhung der Erdsonde durch den Wärmeeintrag des Free Coolings und der Kältemaschine wurde in den Berechnungen nicht berücksichtigt. Zudem wurde die Bodentemperatur an den Standorten gem. vereinfachtem Berechnungsverfahren SIA 384/6 [6] abgeschätzt.

Durch diese Vereinfachung wird das maximal mögliche Potential abgeschätzt.

Elektrische Energie für Sekundäraggregate

Die elektrische Energie, welche für die Sekundäraggregate (Carterheizung, Begleitheizbänder, Maschinensteuerung, etc.) benötigt wird, wurde in der Simulation nicht berücksichtigt.

2.5 Auswirkungen der getroffenen Vereinfachungen

Im folgenden Abschnitt werden die möglichen Auswirkungen der getroffenen Vereinfachungen beschrieben.

Dynamik und Speicherverhalten

Die Vereinfachung der quasistatischen Betrachtung hat zur Folge, dass keine Speichereffekte durch das Gebäude oder durch die Kältespeicherbewirtschaftung ausgenutzt werden können. Würden ein Kältespeicher während den kühleren Nachtstunden durch Free Cooling abgekühlt, könnte ein Teil der anfallenden Kältelast ggf. durch die Speichernutzung abgedeckt werden. Es könnte demnach sein, dass diese Vereinfachung das Ergebniss des Potentials beeinflusst.

Die quasistatische Betrachtung hat auch einen Einfluss auf eine mögliche Wärmenutzung. In der Übergangszeit können keine Wärmespeichernutzungen abgebildet werden, was keine endgültige Aussage zur Gefährdung der Wärmenutzung durch Free Cooling zulässt.

Betrachtung von einzelnen Nutzungen

Die Simulation von einzelnen Nutzungsarten hat zur Folge, dass während eines Rechnungsschritts nie gleichzeitig Wärme- und Kältelasten vorhanden sind. Demnach wird zum Beispiel eine mögliche Wärmenutzung (Quernutzung) eines Rechenzentrums, welches sich in einem Bürogebäude befindet, nicht ausgewiesen. Im Zusammenhang mit der quasistatischen Betrachtung, welche keine Speichernutzung zulässt, ist eine klare Aussage zur möglichen Wärmenutzung nicht möglich.

Dimensionierung Free Cooling Rückkühler und Temperaturdifferenzen über die Wärmeübertrager

Die getroffenen Vereinfachungen bei der Auslegung der Wärmeübertrager haben fixe Kapazitäten und Kühlgrenzabstände zur Folge. Werden die Wärmeübertrager grösser oder kleiner dimensioniert, wirkt sich das auf die möglichen Kühlgrenzabstände und somit auch auf das Potential des Free Coolings aus.

Durchgehende Besprühung der Hybridkühler

Durch die getroffenen Vereinfachungen bei den Hybridkühlern wird mit der physikalisch maximal möglichen Abkühlung gerechnet. Dadurch wird das maximale Potential ausgewiesen. Das tatsächliche Potential, welches durch die Hybridrückkühlung erreicht wird, sollte zwischen dem Potential der Trockenrückkühlung und dem maximal möglichen Potential liegen.

Temperaturverhältnisse Grundwasseranbindung und Erdsonde

Die vereinfachten Temperaturverhältnisse bei der Erdsonde und bei der Grundwasseranbindung lassen keine Aussagen zum effektiven Potential dieser Anwendungen zu, da grundlegende Eigenschaften der Anwendungen nicht berücksichtigt werden. Jedoch können mögliche Potentiale grob abgeschätzt werden, um die Sinnhaftigkeit weiterer Untersuchungen zu klären.

3 Ergebnisse

3.1 Definition der ausgewerteten Grössen

Free Cooling Potential

Das Potential soll Aufschluss zur Sinnhaftigkeit des Free Coolings unter Betrachtung der gesamten Kältelast geben. Dafür wurde für jede Parameterkombination die abgeführte Wärmemenge durch das Free Cooling in einem Jahr $\sum Q_{K,FC,a}$ mit der gesamten anfallenden Kältelast über einem Jahr $\sum Q_{K,Soll,a}$ verglichen (vgl. Gl. 7). Damit kann eine Aussage getroffen werden, zu welchem Grad die benötigte Kühllast durch Free Cooling gedeckt werden kann.

$$\text{Potential} = \frac{\sum Q_{K,FC,a}}{\sum Q_{K,Soll,a}} \cdot 100\% \quad (7)$$

Beispiel:

Potential = 0%: Kein Free Cooling Betrieb über das gesamte Jahr möglich
 Potential = 50%: 50% der gesamten anfallenden Kühllast durch Free Cooling gedeckt
 Potential = 100%: Gesamte anfallende Kühllast durch Free Cooling gedeckt

Einsparung der elektrischen Energie

Zur Beurteilung der Einsparmöglichkeiten an elektrischer Energie wurde für jede Parameterkombination die durch das Free Cooling eingesparte elektrische Energie ($\sum W_{El,a} - \sum W_{El,FC,a}$) mit dem gesamten Energieaufwand im herkömmlichen Maschinenbetrieb $\sum W_{El,a}$ verglichen (vgl. Gl. 8). Dadurch sollen Erkenntnisse gewonnen werden wie sich das Einsparpotential der elektrischen Energie zum Potential des Free Coolings verhält.

$$\Delta W_{El} = \frac{\sum W_{El,a} - \sum W_{El,FC,a}}{\sum W_{El,a}} \cdot 100\% \quad (8)$$

Beispiel:

$\Delta W_{El} = 0\%$: Kein Einsparung an elektrischer Energie durch Free Cooling
 $\Delta W_{El} = 50\%$: 50% der elektrischen Energie im herkömmlichen Maschinenbetrieb durch Free Cooling eingespart
 $\Delta W_{El} = 100\%$: Gesamte elektrische Energie im herkömmlichen Maschinenbetrieb durch Free Cooling eingespart

3.2 Einfluss der Vorlauftemperatur des Kühlmediums auf das Potential

Die Vorlauftemperatur des Kühlmediums $T_{K,VL}$ hat von allen Parametern den entscheidendsten Einfluss auf das Potential des Free Coolings. Beispielhaft soll die Auswertung des Free Cooling Potentials für einen Standort im Mittelland mit einer Trockenrückkühlung betrachtet werden (vgl. Abb. 10). Das Beispiel zeigt, dass sich das Free Cooling Potential mit sinkender Vorlauftemperatur des Kühlmedium $T_{K,VL}$ verringert. Bei einer Vorlauftemperatur des Kühlmediums $T_{K,VL} < 10^\circ\text{C}$ sinkt das Potential bereits auf unter 2%. Ausnahme bildet das Rechenzentrum.

Die Tendenz des sinkenden Potentials mit sinkender Vorlauftemperatur gilt für alle Standorte, Rückkühlarten, Anwendungen und Schaltungen. Am stärksten reagieren Anwendungen mit niedrigem Anteil an internen Lasten (Spital/Arztpraxis, Bürogebäude, vgl. Kap. 2.2). Das Niveau des Potentials ist abhängig von der betrachteten Parameterkombination. Das maximale Potential für Vorlauftemperatur des Kühlmediums $T_{K,VL} < 10^\circ\text{C}$ über alle Parameterkombinationen liegt bei 7%. Ausnahme bildet das Rechenzentrum. Durch die ganzjährig aktive Kühlung im Rechenzentrum kann trotz tiefer Vorlauftemperatur $T_{K,VL}$ ein beträchtlicher Teil der anfallenden Kühllast von Free Cooling übernommen werden.

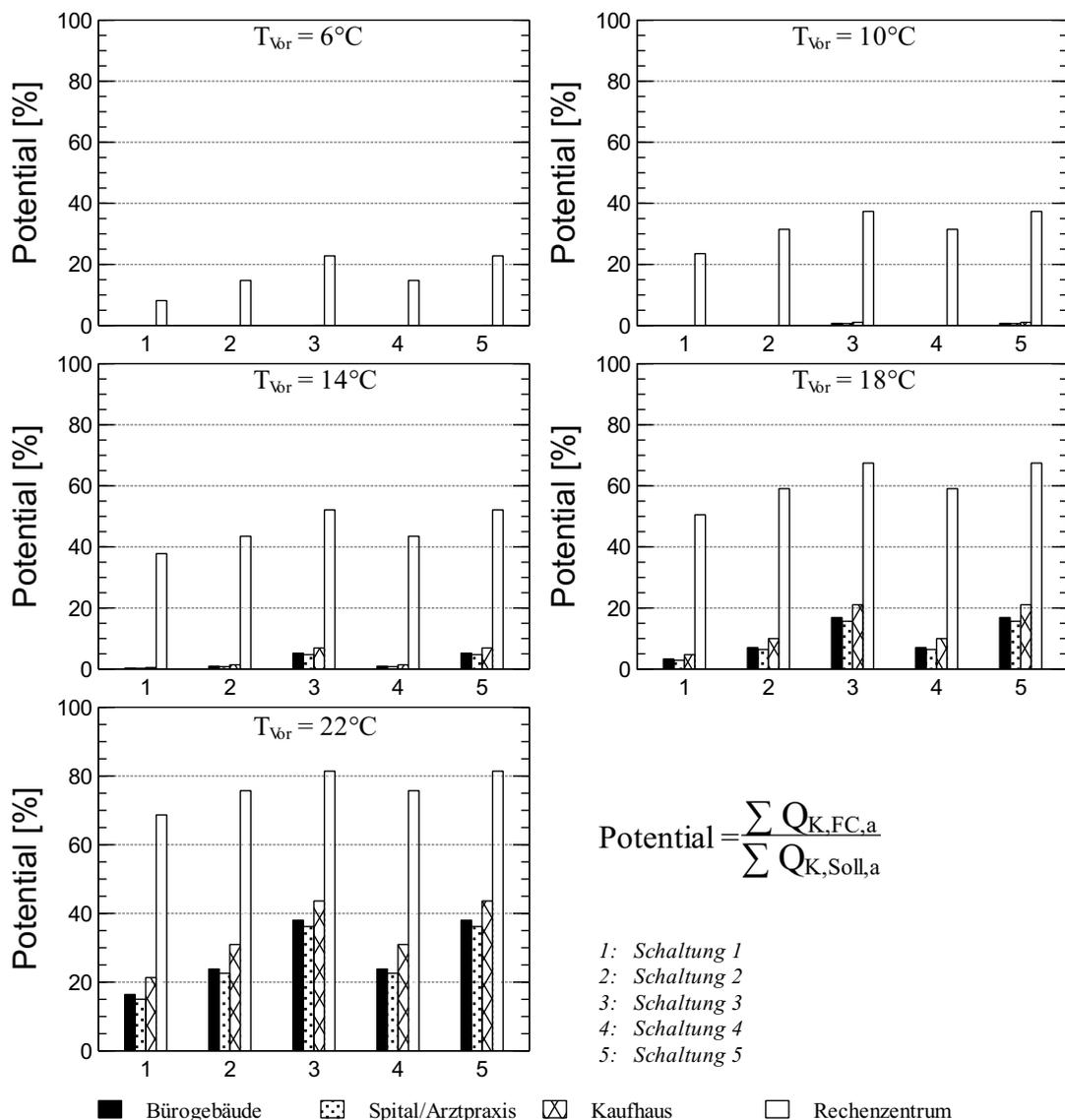


Abbildung 10 – Auswertung des Free Cooling Potentials im Mittelland ($\Theta_{e,a} = 9.4^\circ\text{C}$), Rückkühlung: Trocken

3.3 Einfluss der Schaltung auf das Potential

Das Potential wird weiter durch die Wahl der Schaltung beeinflusst. Beispielhaft soll wiederum die Auswertung des Free Cooling Potentials für einen Standort im Mittelland mit einer Trockenrückkühlung betrachtet werden (vgl. Abb. 10). Über alle Standorte, Rückkühlarten, Anwendungen und Vorlauftemperaturen des Kühlmediums hinweg, können drei Einflüsse der Schaltung auf das Potential des Free Coolings festgestellt werden:

Temperaturdifferenz über die Wärmeübertrager

Grosse Temperaturdifferenzen über die Wärmeübertrager ΔT_{WT} beeinflussen das Free Cooling Potential negativ, da sie die nötige Spreizung zwischen Vorlauftemperatur des Kühlmediums $T_{K,VL}$ und Rücklauftemperatur der Rückkühlung $T_{R,RL}$ erhöhen. Parameterkombinationen mit der Schaltung 1 (grösste Temperaturdifferenzen über die Wärmeübertrager ΔT_{WT} , vgl. Kap. 2.2) weisen daher jeweils das geringste Potential auf.

Betriebsart des Free Coolings

Die Betriebsart des Free Coolings hat unabhängig von allen anderen Parametern einen Einfluss auf die Performance (vgl. Kap. 2.2). Durch die Bivalent-Parallele Betriebsart kann der Rücklauf des Kühlmediums vorgekühlt werden, sobald die Rücklauftemperatur der Rückkühlung $T_{R,RL}$ tiefer ist als jene des Kühlmediums $T_{K,RL}$. Dadurch kann die Betriebszeit des Free Coolings erweitert werden. Es zeigt sich, dass die Schaltungen 3 & 5 (mit Bivalent-Paralleler Betriebsart) generell das höhere Potential aufweisen als die vergleichbaren Schaltungen 2 & 4 mit Bivalent-Alternativer Betriebsart.

Art des Kondensators

Die Schaltungen 2 & 3 sowie die Schaltungen 4 & 5 unterscheiden sich jeweils nur durch die Art der Kondensation (vgl. Kap. 2.2). Jedoch kann kein Einfluss auf das Potential des Free Coolings festgestellt werden. Schaltungen, welche sich nur durch direkte oder indirekte Kondensation unterscheiden, weisen bei sonst gleicher Parameterkombinationen jeweils das gleiche Potential auf. Auch bei der Einsparung der elektrischen Energie können nur sehr geringe Abweichungen ausgewiesen werden.

3.4 Einfluss der Jahresmitteltemperatur der Aussenluft auf das Potential (Standort)

Die Jahresmitteltemperatur der Aussenluft $\Theta_{e,a}$ ist direkt abhängig vom Standort und beeinflusst sowohl die Referenztemperatur der Rückkühlung T_{Ref} sowie das Lastprofil der Anwendung. Über alle Parameterkombinationen kann ein Einfluss der Jahresmitteltemperatur der Aussenluft $\Theta_{e,a}$ auf das Potential des Free Coolings festgestellt werden. Ausschlaggebend für die Unterschiede im Potential ist vor allem die Abhängigkeit der Rücklauftemperatur der Rückkühlung $T_{R,RL}$ von der Aussenlufttemperatur Θ_e . Beispielhaft soll die Auswertung des Free Cooling Potentials mit Trockenrückkühlung und einer Vorlauftemperatur des Kühlmediums $T_{K,VL} = 14^\circ\text{C}$ für die verschiedenen Regionen betrachtet werden (vgl. Abb. 11).

Unabhängig von den restlichen Parametern kann festgestellt werden, dass tiefe Umgebungstemperaturen das Free Cooling Potential steigert. So kann für die Alpenregion jeweils das grössere Potential ausgewiesen werden als bei vergleichbaren Anwendungen im Mittelland oder im Tessin. Die Standorte des Mittellandes zeigen nur geringfügige Änderungen im Potential.

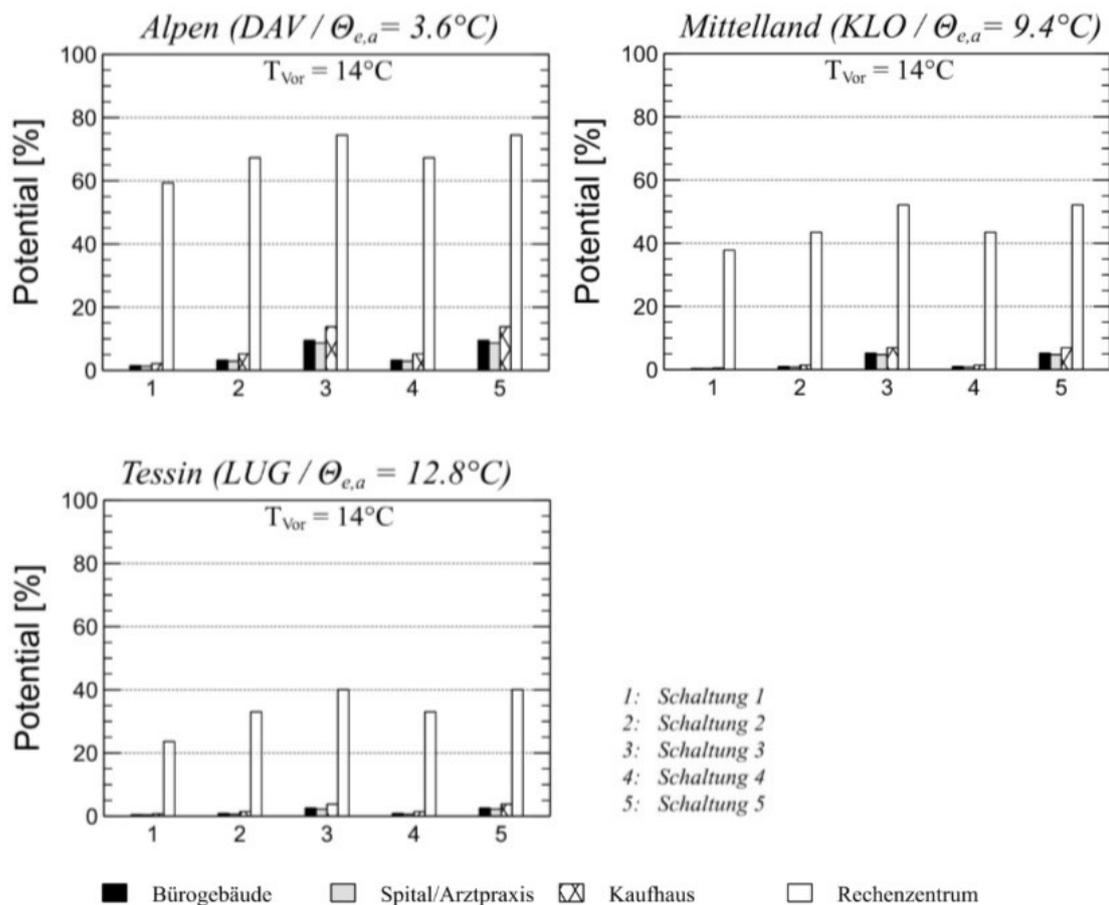


Abbildung 11 – Free Cooling Potential für die verschiedenen Regionen, Rückkühlung: Trocken

3.5 Einfluss der Rückkühlart auf das Potential

Hybridrückkühlung

Durch Hybridrückkühlung lässt sich das Potential des Free Coolings im Vergleich zur Trockenrückkühlung je nach Parameterkombination stark steigern und zum Teil mehr als verdoppeln. Beispielhaft soll die Auswertung des Free Cooling Potentials bei einer Vorlauftemperatur des Kühlmediums $T_{K,VL} = 14^{\circ}\text{C}$ und $T_{K,VL} = 22^{\circ}\text{C}$ für das Mittelland mit Hybrid- und Trockenrückkühler betrachtet werden (vgl. Abb. 12). Jedoch muss berücksichtigt werden, dass die Hybridrückkühlung vereinfacht betrachtet wurde (vgl. Kap. 2.4). Die Ergebnisse repräsentieren das maximal mögliche Potential, welches durch eine Hybridrückkühlung möglich ist. Erwartungsgemäss müsste das reale Potential der Hybridrückkühlung zwischen derjenigen der Trockenrückkühlung und den hier ausgewiesenen Werten liegen.

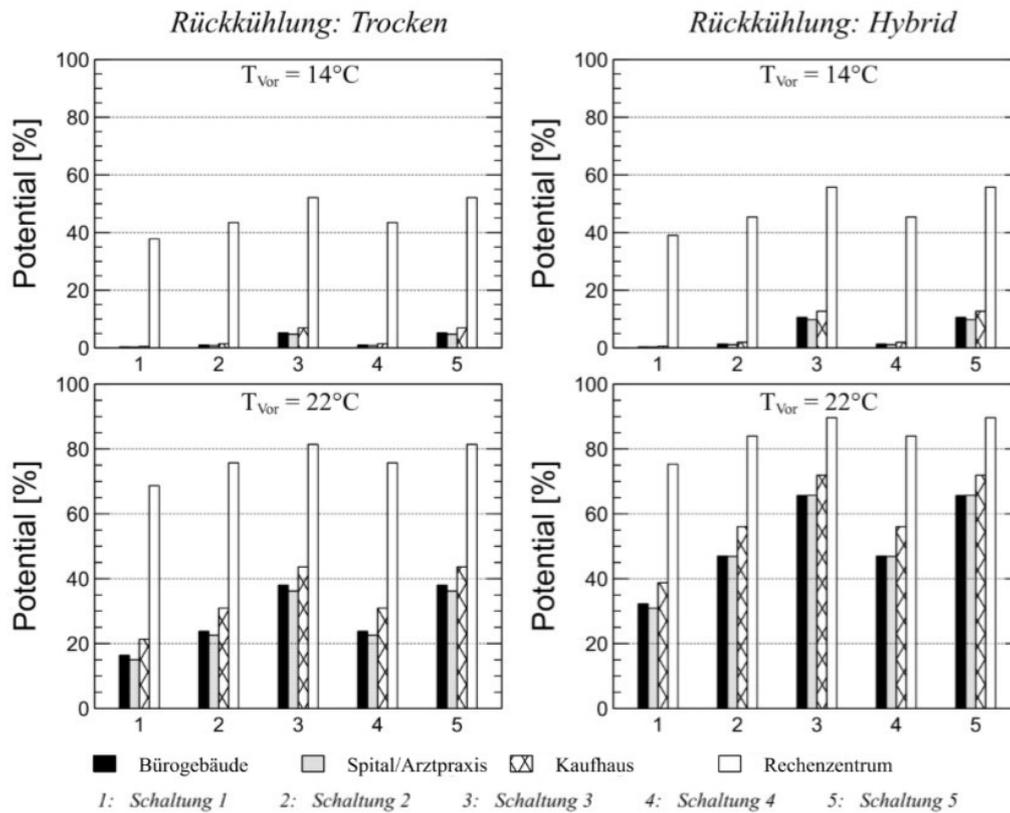


Abbildung 12 – Free Cooling Potential für das Mittelland ($\Theta_{e,a} = 9.4^\circ\text{C}$)

Erdwärmesonde und Grundwasseranbindung

Die Bodentemperaturen für die Erdwärmesonde und Grundwasseranbindung wurden gem. SIA 384/6 [6] vereinfacht abgeschätzt (vgl. Tab. 4). Durch die getroffenen Vereinfachungen (vgl. Kap. 2.4) kann lediglich eine Abschätzung des maximal möglichen Potentials der Erdwärmesonde und der Grundwasseranbindung getroffen werden.

Die Auswertungen zeigen ein grosses Potential bei hohen Vorlauftemperaturen (vgl. Abb. 13). Dabei muss beachtet werden, dass bei der Berechnung der Erdwärmesonde und der Grundwasseranbindung von idealen Wärmeabgaben ausgegangen wurde. Das bedeutet, dass eine Wärmeabgabe zu jedem Zeitpunkt möglich ist, ohne dass dies Auswirkungen auf die Temperatur im Grundwasser oder im Erdreich hat. Speziell bei der Grundwasseranbindung (auch zutreffend auf andere Wasseranbindungen wie Seewasser, Flusswasser, etc.) ist zu beachten, dass eine Wärmeabgabe durch gesetzliche Limitierungen beschränkt sein kann. Eine genauere Aussage würde einer weiteren Untersuchung voraussetzen, in der das dynamische Verhalten der Erdwärmesonde sowie Grundwasseranbindung unter Berücksichtigung der Wärmeeinträge analysiert wird.

Tabelle 4 – Bodentemperaturen an den Standorten nach vereinfachter Abschätzung SIA 384/6 [6]

Region	Standort	Bodentemp. (Grundwassertemp.)
Mittelland	Basel / Binningen	12.4°C
	Genève-Cointrin	12.6°C
	Zürich / Kloten	11.3°C
Alpen	Davos	7.2°C
Tessin	Lugano	14.4°C

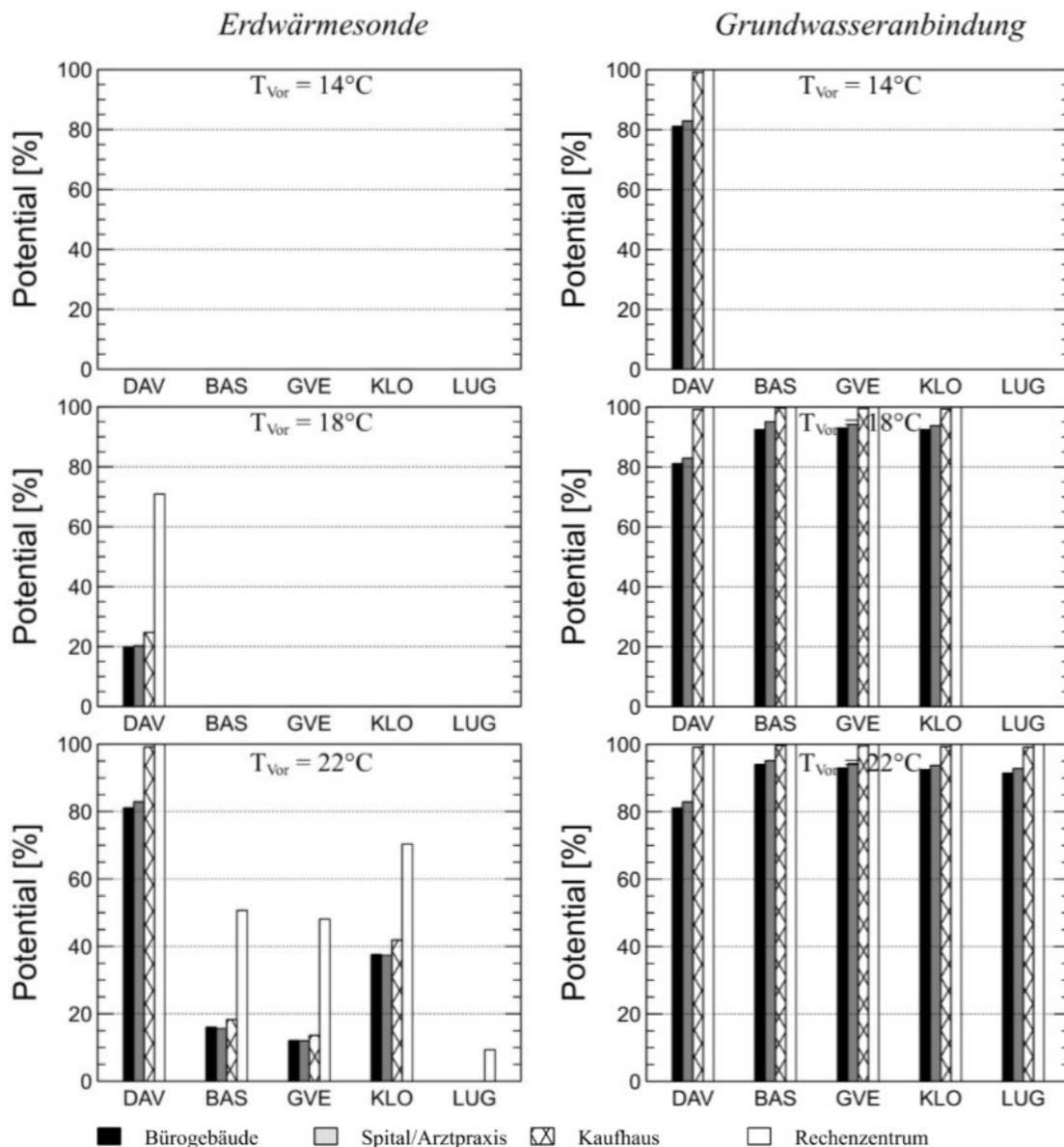


Abbildung 13 – Free Cooling Potential für die Erdwärmesonde und Grundwasseranbindung

3.6 Einfluss des Free Coolings auf die elektrische Energie

Bei der Berechnung der für die Kühlung benötigten elektrischen Energie wurde der Kältemaschinenkompressor sowie die elektrische Leistung der Rückkühlung ausgewertet. Der Kältemaschinenkompressor ist im Grossteil der betrachteten Fälle der Hauptverbraucher (Größenordnung: 85%). Durch den Free Cooling Betrieb kann somit die Hauptlast der elektrischen Leistung eingespart werden. Wird der Kältekreis jedoch stillgelegt, ändern sich die Temperaturverhältnisse im Rückkühler. Dies hat einen erhöhten elektrischen Energiebedarf der Rückkühlung zur Folge. Die Auswertungen zeigen, dass die Einsparung der benötigten elektrischen Energie in ähnlicher Größenordnung ist wie das Potentials des Free Coolings. Jedoch ist die Einsparung der benötigten elektrischen Energie geringer, bedingt durch den erhöhten Bedarf bei der Rückkühlung (vgl. Abb. 14). Sie ist im Mittelwert über alle Anwendungen um Faktor von ca. 0.8 kleiner als das ausgewiesene Potential des Free Coolings. Allerdings treten starke Unterschiede zwischen den verschiedenen Parameterkombinationen auf, sodass die effektive Abweichung parameterspezifisch betrachtet werden muss.

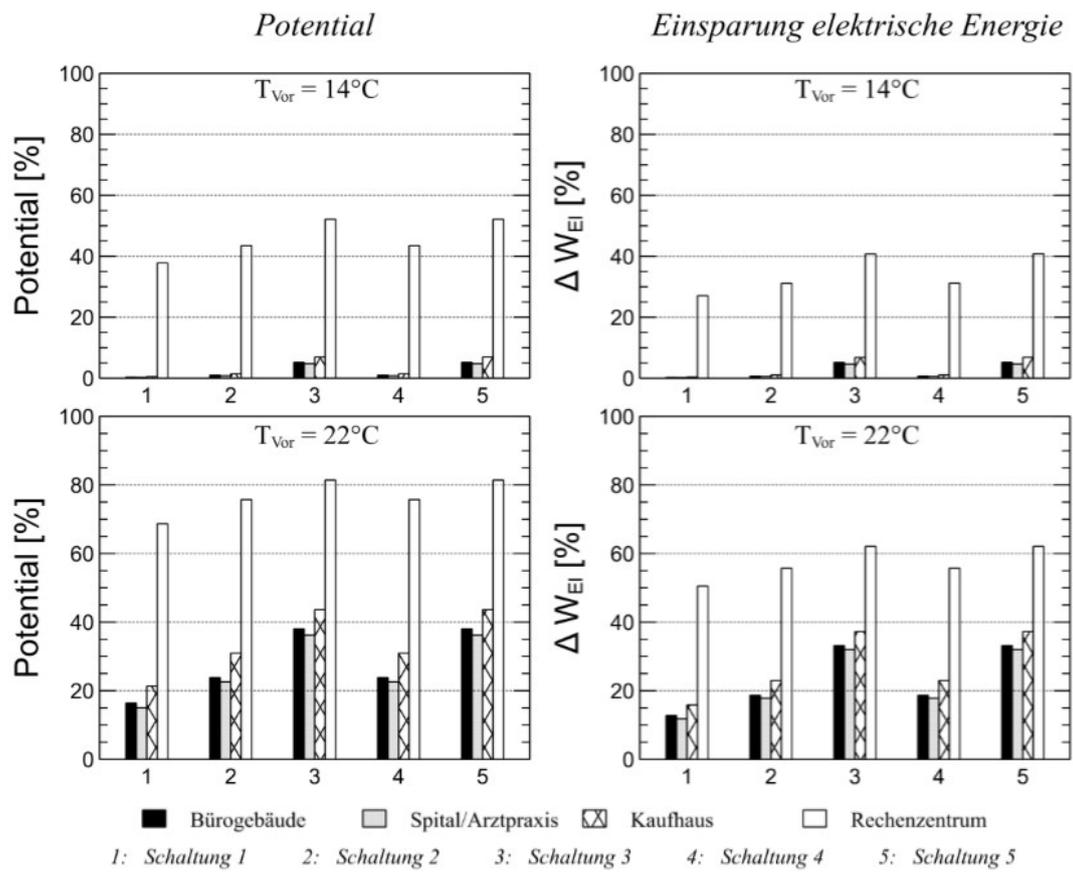


Abbildung 14 – Free Cooling Potential und Einsparung der Elektrischen Energie, Standort: Mittelland ($\Theta_{e,a} = 9.4^{\circ}\text{C}$), Rückkühlung: Trocken

3.7 Einfluss des Free Coolings auf eine potentielle Wärmenutzung

Bedingt durch die getroffenen Vereinfachungen (vgl. Kap. 2.4) wird kein Speicherverhalten und keine Quernutzung berücksichtigt. Dadurch ist eine Aussage zur Wärmenutzung der Kältemaschine nicht möglich. Betrachtet man jedoch den Jahresverlauf der monatlichen Kühl- und Wärmelasten fällt auf, dass in mehr als der Hälfte der Zeit im selben Monat Kühl- und Heizlasten anfallen (vgl. Abb. 15, grün hinterlegt). Wird die anfallende Wärme der Kältemaschine eingespeichert, könnte demnach ein Teil der anfallenden Heizlast durch die Wärmenutzung gedeckt werden. Wird der Kältemaschinenkreis zur dieser Zeit ausgeschaltet, weil ein Free Colling Betrieb möglich ist, wird die Wärmelieferung dadurch gefährdet oder muss anders realisiert werden. Da eine Wärmenutzung der Kältemaschine einer Wärmeabgabe an die Umgebung (Free Cooling Betrieb) klar vorzuziehen ist, muss demnach geprüft werden, ob ein Free Cooling Betrieb ggf. die Kapazität einer möglichen Wärmenutzung gefährdet.

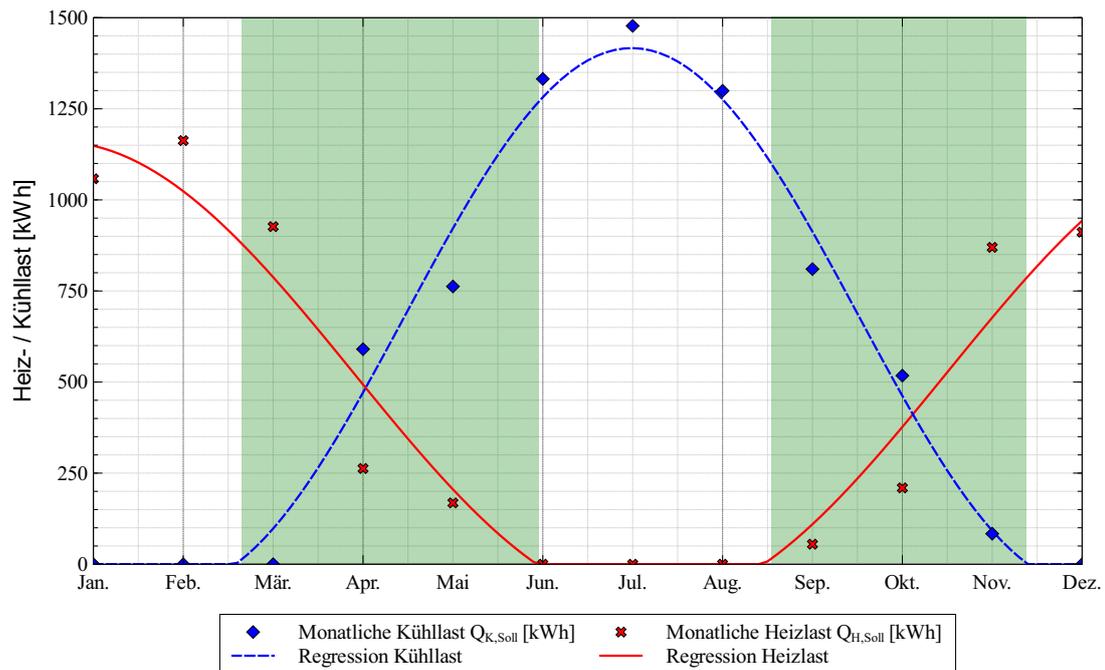


Abbildung 15 – Monatlicher Kühl- und Heizbedarf, Standort: Mittelland ($\Theta_{e,a} = 9.4^{\circ}C$), Anwendung: Bürogebäude

3.8 Klassifizierung der Potentiale aus wirtschaftlicher Sicht

Auch wenn Free Cooling aus energetischer Sicht sinnvoll wäre, kann es sein, dass es aus wirtschaftlicher Betrachtungsweise nicht immer angemessen ist. Die Art und Weise wie das Free Cooling in die Anlage eingebaut wird und welche Investitionen dafür nötig sind, entscheidet, ob sich Free Cooling wirtschaftlich lohnt oder nicht. Um dem Leser eine Hilfestellung zu bieten, wird an dieser Stelle eine Berechnung der Wirtschaftlichkeit für eine 200 kW Kälteanlage präsentiert. Die benötigten Parameter sind in Tab. 5 zusammengestellt. Die Berechnung der Daten für die Kältemaschine wurde mit dem Kälte-Tool von *Energie Schweiz* [10] berechnet. Sämtliche Investitionskosten wurden über die Dauer von 15 Jahren linear abgeschrieben.

Berechnet wurden zwei Fälle (Worst und Best Case). Der Unterschied der beiden liegt in der Höhe der Investition und den jährlichen Unterhaltskosten für den Betrieb des Free Coolings. Die Investitionskosten belaufen sich abgeschätzt auf 20'000 bis 40'000 CHF. Die periodisch anfallenden Unterhaltskosten sind stark von der Art und Weise der Einbindung und der Rückkühlart abhängig. Im besten Fall benötigt man fast keine zusätzlichen Kosten. Im Worst Case hingegen wird davon ausgegangen, dass die Unterhaltskosten des Free Coolings die Hälfte der anfallenden Unterhaltskosten für die Kältemaschine betragen.

Um die jährlichen Kosten einer Anlage mit Free Cooling gleich hoch zu halten wie eine Anlage ohne, muss ein minimales Free Cooling Potential von mindestens 11% (Best Case) bez. 39% (Worst Case) vorhanden sein. Bei der Ermittlung dieser Werte wurde davon ausgegangen, dass die Einsparung der elektrischen Energie um den Faktor 0.8 kleiner ist als das Free Cooling Potential.

Tabelle 5 – Parameter für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Anlagen mit Betrieb von Free Cooling. Die Wirtschaftlichkeit der Kältemaschine wurde mit Hilfe des Kälte-Tools von *Energie Schweiz* berechnet.

Parameter	Einheit	Best Case	Worst Case
Kältemittel der Anlage	[-]	R410A	
Kälteleistung	kW	200	
elektrische Leistungsaufnahme	kW	47	
ESEER	[-]	5.5	
Berechnungsmodell im Kälte-Tool	[-]	Standard-Profil	
Produzierte Kältemenge	kWh/a	400'000	
Benötigte elektrische Energie	kWh/a	82'900	
Stromtyp	[-]	CH-Mix	
Strompreis	Rp/kWh	18	
Stromkosten ohne Free Cooling	CHF/a	14'922	
Lebensdauer der Anlage	Jahre	15	
Unterhaltskosten Kälteanlage	CHF/a	4'100	
Investitionskosten Kälteanlage	CHF	103'000	
Investitionskosten Free Cooling	CHF	20'000	40'000
Unterhaltskosten Free Cooling	CHF/a	0	2'000
Minimales Free Cooling Potential um Jahreskosten mit Free Cooling gleich hoch zu halten wie ohne.	%	11	39

Da die Investitionskosten und die jährlichen Unterhaltskosten für eine Free Cooling Anlage stark variieren können, wurde die Berechnung der Wirtschaftlichkeit nochmals etwas ausgeweitet und in Abb. 16 visualisiert. Die Grafik zeigt, welches minimale Free Cooling Potential nötig ist, um eine Anlage wirtschaftlich zu betreiben (schwarze Linien). Die Anlagengrösse bleibt mit einer Kälteleistung von 200 kW jedoch gleich wie bei der Berechnung in Tab. 5. Abb. 16 bietet dem Betrachter eine Hilfe zur ersten Abschätzung eines notwendigen Potentials. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Linien unterschiedlicher Investitionskosten für das Free Cooling in Abhängigkeit der jährlichen Unterhaltskosten für das Free Cooling eingezeichnet.

Durch die Einführung von Benchmarks soll dem Leser eine Hilfe zur Beurteilung der Diagramme aus der Arbeit geboten werden. Die Benchmarks wurden an die Berechnung der Wirtschaftlichkeit angelehnt. Für die ökonomische Betrachtung wurden folgende Benchmarks ausgewählt: "Free Cooling wird nicht empfohlen", "Free Cooling ist zu prüfen" und "Free Cooling wird empfohlen".

Da das Potential stark von den gewählten Parametern abhängt, ist eine generell gültige Aussage zur Sinnhaftigkeit von Free Cooling nicht möglich. Durch die Einführung von ökonomischen Benchmarks können die einzelnen Fälle jedoch klassifiziert werden. Die Höhe der Benchmarks wurde an die Berechnung der wirtschaftlichen Free Cooling Potentiale (vgl. Abb. 16) angelegt. Die Benchmarks wurden wie folgt definiert:

"Free Cooling wird nicht empfohlen":	Potential < 10 %
"Free Cooling ist zu prüfen":	10 % ≤ Potential ≤ 40 %
"Free Cooling wird empfohlen":	Potential > 40 %

Beispielhaft soll die Klassifizierung mit Hilfe der Benchmarks für das Free Cooling Potential eines Standorts des Mittellands betrachtet werden (vgl. Abb. 17). Das Beispiel beinhaltet insgesamt 100 Parameterkombinationen, davon fallen 64 in die Kategorie "Free Cooling wird nicht empfohlen", 22 in die Kategorie "Free Cooling ist zu prüfen" und 14 in die Kategorie "Free

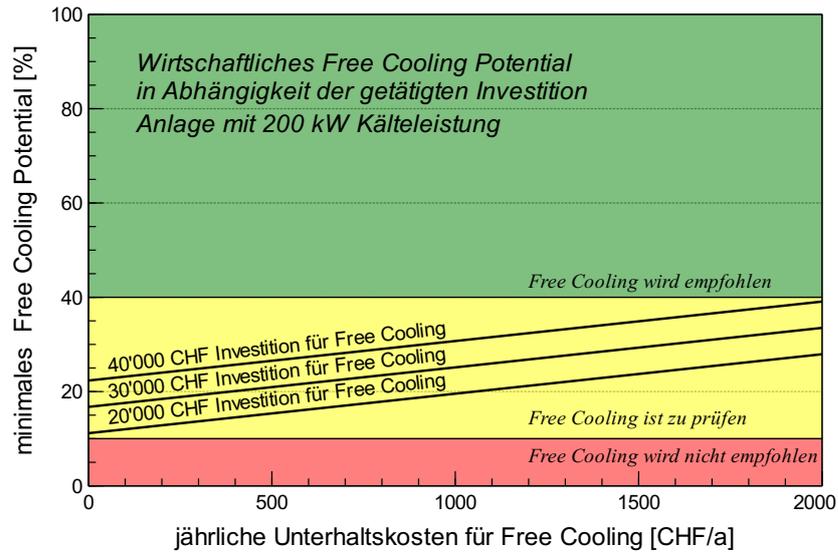


Abbildung 16 – Darstellung von wirtschaftlichen Free Cooling Potentialen in Abhängigkeit der getätigten Investitionen und jährlichen Unterhaltskosten Kosten für einen Free Cooling Betrieb, gültig für eine Anlage mit 200 kW und den Parametern nach Tab. 5.

“Free Cooling wird empfohlen“. Auffallend ist, dass die Fälle mit der Bewertung “Free Cooling wird empfohlen“ oder “Free Cooling ist zu prüfen“ über hohe Vorlauftemperaturen des Kühlmediums verfügen oder sehr hohe intern Lasten aufweisen (vgl. Kap. 3.2).

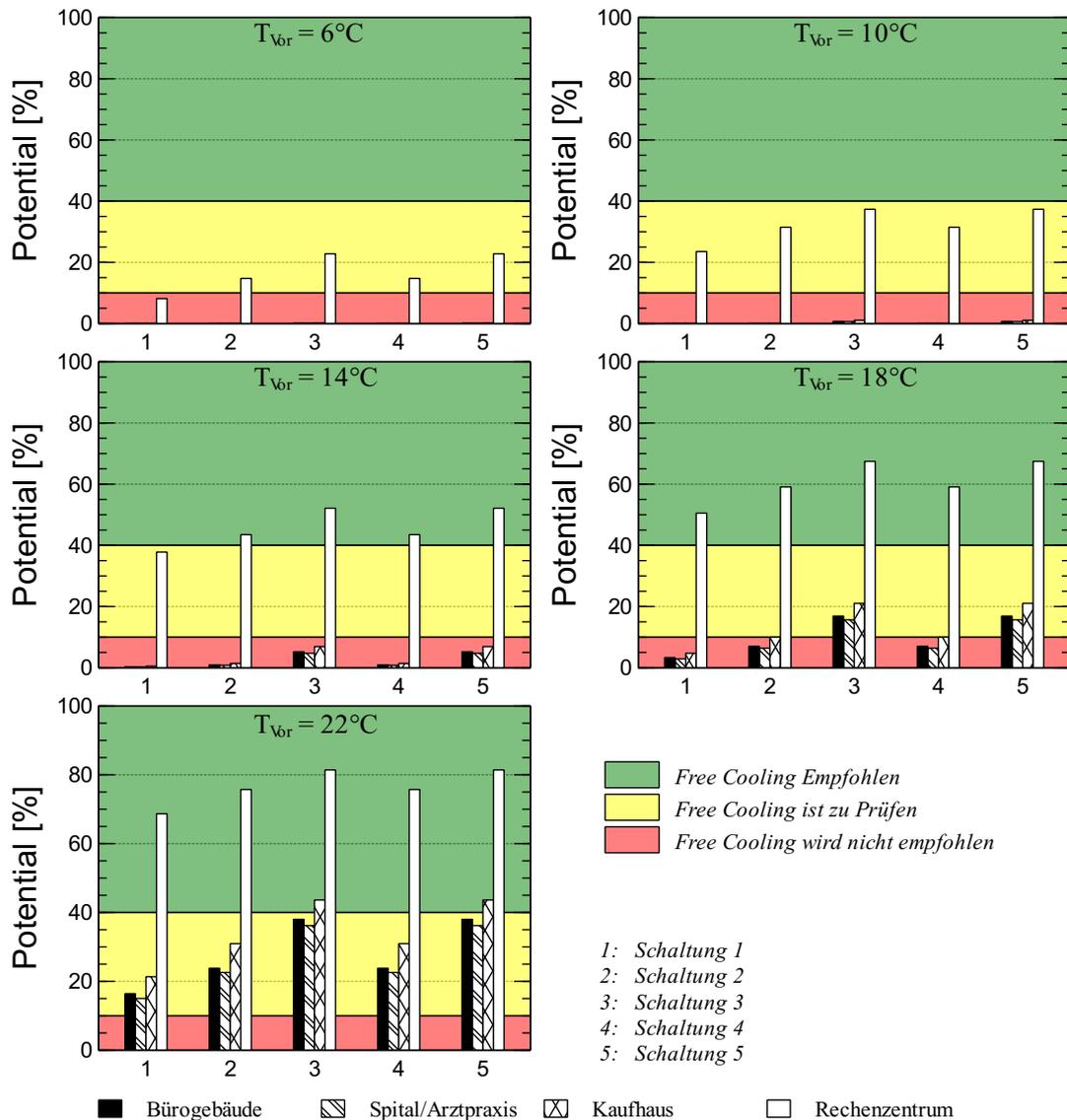


Abbildung 17 – Anwendung der Benchmarks im Mittelland ($\Theta_{e,a} = 9.4^\circ\text{C}$), Rückkühlung: Trocken

Werden die Benchmarks auf alle 1'200 ausgewerteten Fälle angewandt, fallen 700 (58.3 %) Parameterkombinationen in die Kategorie "Free Cooling wird nicht empfohlen", 280 (23.3 %) in die Kategorie "Free Cooling ist zu prüfen" und 220 (18.3 %) in die Kategorie "Free Cooling wird empfohlen". Die Tendenz, dass Fälle mit hohen Vorlauftemperaturen des Kühlmediums oder hohen internen Lasten besser abschneiden, kann auch im Ganzen beobachtet werden (vgl. Kap. 3.2). Das heisst nur ca. ein Drittel aller betrachteten Parameterkombinationen besitzt nach dieser Beurteilung ein Potential, bei dem ein Free Cooling zu prüfen ist oder bei dem es empfohlen wird.

4 Fazit

Vorlauftemperatur des Kühlmediums

Die Auswertung zeigt deutlich, dass Free Cooling in der Klimakälte nur unter sehr spezifischen Randbedingungen ein Potential zur Effizienzsteigerung aufweist. Die zentrale Grösse, welche das Potential des Free Coolings dominiert, ist die Vorlauftemperatur des Kühlmediums (vgl. Abb. 18). Bei Vorlauftemperaturen unter 14°C sinkt das Potential im Grossteil der betrachteten Fälle unter 5%. Somit besteht dann weder ein grosses Potential zur Effizienzsteigerung noch ein signifikanter ökonomischer Nutzen. Weiter sollte zur Kenntnis genommen werden, dass Anwendungen mit einer Vorlauftemperatur des Kühlmediums über 18°C , bei denen teils hohe Potentiale vorhanden sind, in Klimakälteanwendungen selten auftreten. Ausnahme bilden IT-Anwendungen oder Klimakälteanwendungen mit Thermoaktiven-Bauteilsystemen (TABS). Die Anstrengungen sollten daher dahin gehen, mit möglichst hohen Vorlauftemperaturen zu fahren.

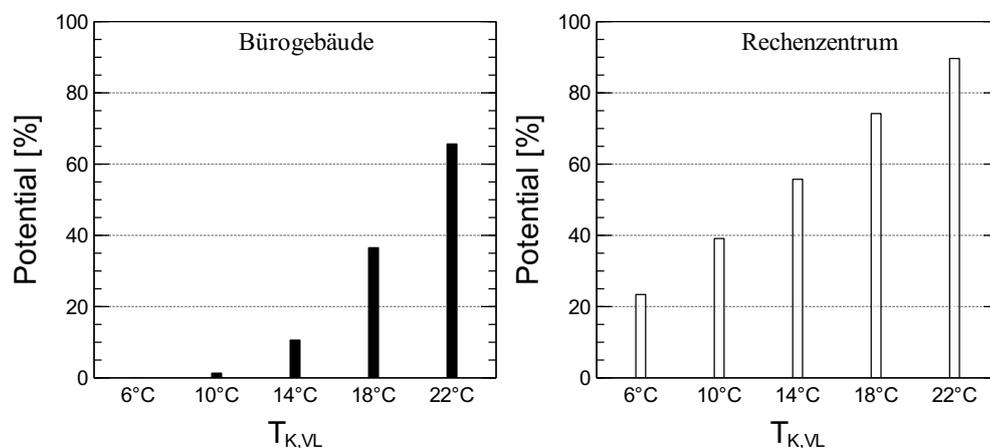


Abbildung 18 – Potential bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen des Kühlmediums $T_{K,VL}$ bei den Anwendungen Bürogebäude und Rechenzentrum, Standort: Mittelland ($\Theta_{e,a} = 9.4^{\circ}\text{C}$), Rückkühlung: Trocken, Schaltung 3

Standort und die damit verbundenen Randbedingungen

Ein weiterer, wichtiger Parameter ist die Aussenlufttemperatur des Standorts. Die Aussenlufttemperatur wirkt sich sowohl auf die anfallenden Lasten sowie auf die Rückkühlung aus. Abb. 19 zeigt die örtliche Jahresmitteltemperatur der Aussenluft $\Theta_{e,a}$ in der Schweiz. Auffallend ist eine relativ homogene Temperatur über dem gesamten Mittelland. Das widerspiegelt sich auch in den vergleichbaren Resultaten der ausgewerteten Standorte im Mittelland (vgl. Basel / Binningen, Zürich / Kloten und Genève-Cointrin). Vergleichsweise höhere Potentiale lassen sich in der Alpenregion erzielen, in der die Jahresmitteltemperatur vergleichsweise gering ist (vgl. Standort Davos). Jedoch muss beachtet werden, dass sich der Hauptmarktanteil der Klimakälteanwendungen im Mittelland befindet.

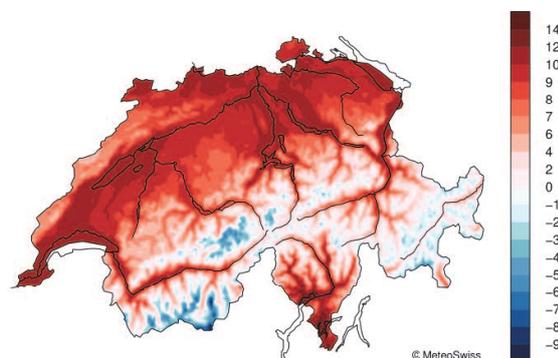


Abbildung 19 – Jahresmitteltemperatur der Aussenluft $\Theta_{e,a}$ in der Schweiz ⁴

⁴Quelle: *MeteoSchweiz 2018: Klimabulletin Jahr 2017. Zürich [11]*

Lastprofil

Hohe interne Lasten wirken sich positiv auf das Free Cooling Potential aus. Vergleicht man die Kühllasten zweier Anwendungen mit unterschiedlichem Anteil an internen Lasten (Spital/Arztpraxis = 51% und Kaufhaus = 83%, vgl. Abb. 20), zeigt sich, dass die Kühlperiode bei höherem internen Lastanteil vergleichsweise länger dauert. Dadurch kann das Potential zur kühleren Frühlings- und Herbstperiode genutzt werden.

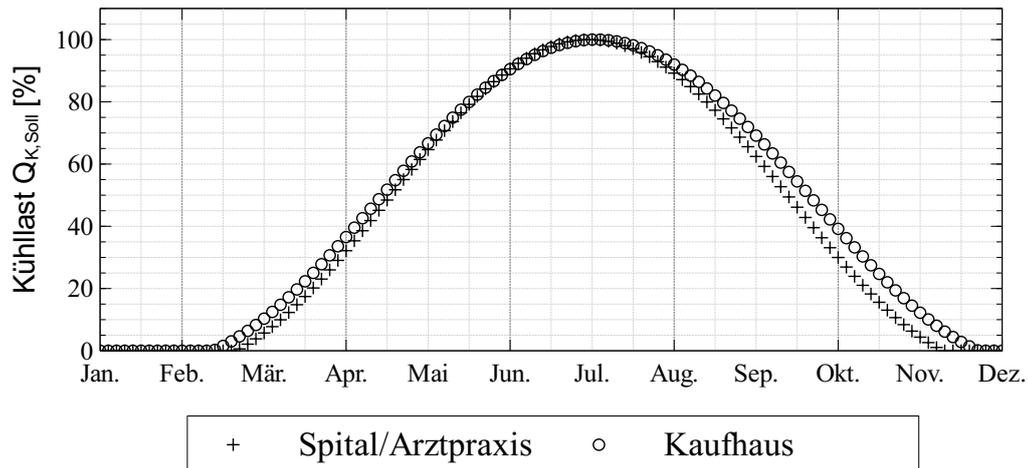


Abbildung 20 – Monatlicher Kühlbedarf der Anwendungen Spital/Arztpraxis und Kaufhaus im Vergleich, Kühlbedarf als prozentualer Anteil der maximalen Last, Standort: Mittelland ($\Theta_{e,a} = 9.4^\circ\text{C}$)

Speziell zu erwähnen ist das Rechenzentrum. Neben dem extrem hohen internen Lastanteil (99%) wird im Rechenzentrum auch ganzjährig gekühlt (vgl. Abb. 21). Dadurch kann das Potential der kalten Wintermonate ausgenutzt werden, wodurch sich ein Free Cooling Betrieb anbietet. Jedoch muss beachtet werden, dass bei Anwendungen wie dem Rechenzentrum nur noch bedingt von Klimakälte gesprochen werden kann. Auf Grund der Ergebnisse lassen sich aber Rückschlüsse auf das Potential des Free Coolings in Industriekälteanwendungen ziehen (vgl. Kap. 4.1).

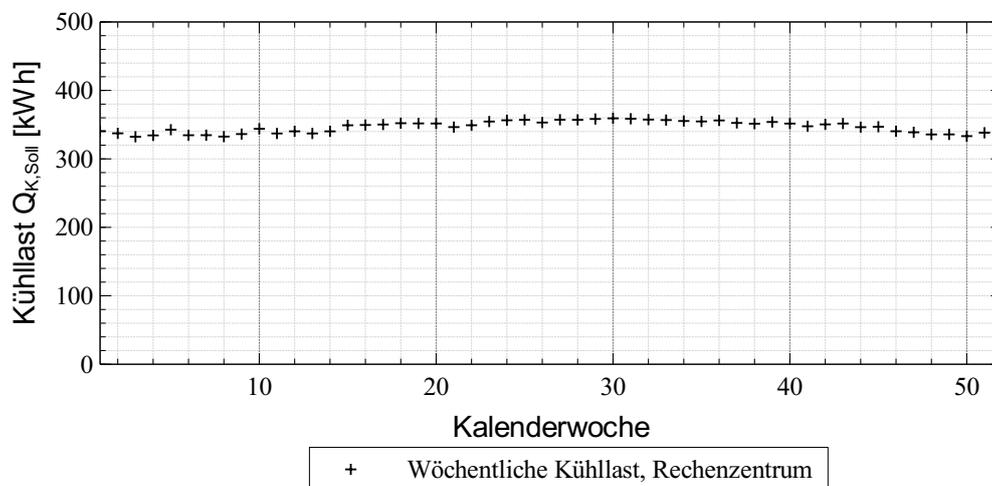


Abbildung 21 – Wöchentlicher Kühlbedarf der Anwendungen Rechenzentrum, Standort: Mittelland ($\Theta_{e,a} = 9.4^\circ\text{C}$)

Schaltung der Kälteerzeugung

Die Wahl der Schaltung beeinflusst den Temperaturunterschied zwischen der Aussenlufttemperatur Θ_e und Vorlauftemperatur des Kühlmediums $T_{K,VL}$. Schaltung 1 weist durch die Notwendigkeit eines Trennwärmetauschers den grössten Temperaturunterschied auf. Dadurch schneidet die Schaltung 1 bei allen Parameterkombinationen am schlechtesten ab (vgl. Abb. 22).

Durch eine Bivalent-Parallele Betriebsweise (Schaltung 3 & 5) besteht die Möglichkeit, Free Cooling und die Kältemaschine gleichzeitig zu betreiben. Dadurch kann ein Teil der Kühllast übernommen werden, sobald die Aussenlufttemperatur Θ_e unter der Rücklauftemperatur des Kühlmediums $T_{K,RL}$ liegt. Somit kann ein Teil der Kühllast früher als bei Bivalent-Alternativer Betriebsart (Schaltung 2 & 4) durch das Free Cooling übernommen werden (vgl. Abb. 22).

Die direkte Kondensation (Schaltung 4 & 5) hat im Vergleich zu den ähnlichen Schaltungen mit indirekte Kondensation (Schaltung 2 & 3) keine Änderung des Potentials zur Folge.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich die Schaltungen 3 & 5 mit Bivalent-Paralleler Betriebsweise am besten eignen um Free Cooling zu betreiben. Auf den Einsatz von Schaltung 1 sollte, bedingt durch den erhöhten Temperaturunterschied, abgesehen werden. Es ist zu beachten, dass die Schaltungen 2 - 5 ohne Trennwärmetauscher simuliert wurden. Muss auf Grund von Frostgefahr ein Trennwärmetauscher eingebaut werden, wird das Potential dieser Schaltungen auf die Grössenordnung der Schaltung 1 sinken.

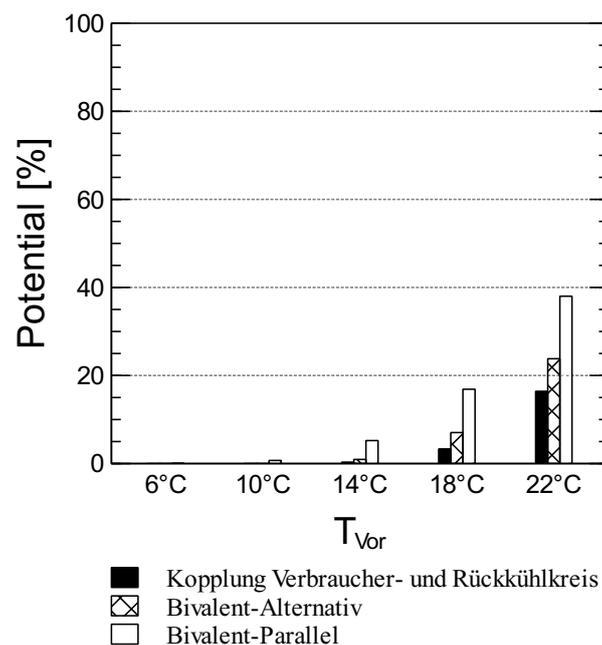


Abbildung 22 – Vergleich des Potential bei verschiedenen Schaltungen
Standort: Mittelland ($\Theta_{e,a} = 9.4^\circ C$), Rückkühlung: Trocken, Bürogebäude

Art der Rückkühlung (Wärmeabgabe)

Durch die hybride Rückkühlung kann die Referenztemperatur der Rückkühlung T_{Ref} gesenkt werden (vgl. Kap. 2.2.2). Dies beeinflusst im Free Cooling Betrieb direkt die Vorlauftemperatur des Kühlmediums $T_{K,VL}$. Durch die hybride Rückkühlung kann daher das Potential teilweise beträchtlich gesteigert werden (vgl. Abb. 23). Durch die getroffenen Vereinfachungen (vgl. Kap. 2.4) wird das maximale Potential der hybriden Rückkühlung ausgewiesen. Das tatsächliche Potential, welches durch die Hybridrückkühlung erreicht wird, sollte erwartungsgemäss zwischen dem Potential der Trockenrückkühlung und dem maximal möglichen Potential liegen.

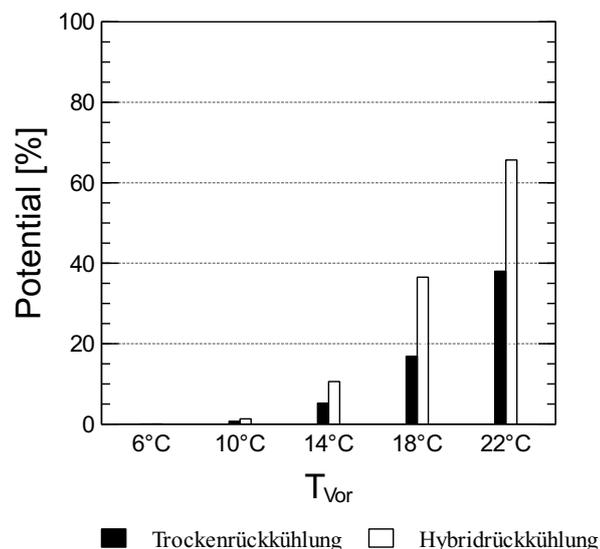


Abbildung 23 – Vergleich des Potential bei trockener und hybrider Rückkühlung
Standort: Mittelland ($\Theta_{e,a} = 9.4^{\circ}C$), Bürogebäude, Schaltung 3

Gefährdung der Wärmenutzung einer Kältemaschine durch das Free Cooling

Wird die anfallende Wärme der Kältemaschine zur Nutzung im Heizkreis eingespeichert, könnte demnach ein Teil der anfallenden Heizlast durch diese Wärmenutzung gedeckt werden. Dies würde zu einer Reduktion von konventionellen Brennstoffen (meistens fossil) führen. Wird der Kältemaschinenkreis für das Free Cooling still gelegt, wird die Wärmenutzung dadurch gefährdet. Da eine Wärmenutzung der Kältemaschine einem Free Cooling Betrieb klar vorzuziehen ist, muss demnach geprüft werden, ob ein Free Cooling Betrieb ggf. die Kapazität einer möglichen Wärmenutzung gefährdet. Dazu muss eine Einzelfallbetrachtung durchgeführt werden, in der auch eine mögliche Quernutzung betrachtet wird. Bei der Anbindung einer Erdwärmesonde muss zudem eine mögliche Regeneration der Sonde durch die Wärme der Kältemaschine beachtet werden, welche durch das Free Cooling ebenfalls gefährdet werden könnte.

Klassifizierung der Potentiale aus wirtschaftlicher Sicht

Durch eine Klassifizierung können Einzelfälle betreffend ihrer Wirtschaftlichkeit eingeteilt werden. Nach einer ersten Abschätzung (vgl. Kap. 3.8) erfolgt eine Einteilung in die Kategorien, “Free Cooling wird nicht empfohlen“ (Potential kleiner als 10%), “Free Cooling ist zu prüfen“ (Potential zwischen 10% und 30%) und “Free Cooling wird empfohlen“ (Potential grösser als 30%). Bei der Untersuchung wurden insgesamt 1’200 Parameterkombinationen simuliert. Dabei fallen 700 (58.3 %) in die Kategorie “Free Cooling wird nicht empfohlen“, 280 (23.3 %) in die Kategorie “Free Cooling ist zu prüfen“ und 220 (18.3 %) in die Kategorie “Free Cooling wird empfohlen“. Grösseres wirtschaftliches Potential tritt nur bei Fällen mit hoher Vorlauftemperatur des Kühlmediums oder mit sehr hohen internen Lasten auf.

4.1 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Industriekälteanwendungen

Durch die Betrachtung des Rechenzentrums lassen sich einige Rückschlüsse zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Industriekälteanwendungen ziehen. Wird davon ausgegangen, dass bei einer Industriekälteanwendung ein ganzjähriger Kühlbedarf vorhanden ist, kann abgestützt auf die Ergebnisse des Rechenzentrums mit einem erhöhten Free Cooling Potential gerechnet werden. Liegen zudem hohe Temperaturen des Kühlmediums vor, wirkt sich dies zusätzlich positiv auf das Potential aus. Aus dieser Sichtweise könnte Free Cooling für gewisse Industriekälteanwendungen sehr interessant sein. Die genauen Zusammenhänge müssten jedoch genauer untersucht werden. Zudem darf auch bei Industriekälteanwendungen nicht vergessen werden, dass eine mögliche Wärmenutzung einer Wärmeabgabe an die Umgebung klar vorzuziehen ist.

4.2 Ausblick

Mit den Ergebnissen in diesem Bericht ist es möglich, das Free Cooling Potential anhand weniger Schritten abzuschätzen. Dazu sind verschiedene Diagramme und eine Beschreibung des Vorgehens im Anhang A und B abgelegt. Die darin enthaltene grobe Aufteilung der Ergebnisse unter Berücksichtigung der einzelnen Parameter (vgl. Kap. A.1 / A.2 / A.3) geben weiteren Aufschluss darüber, welche Auswirkungen die verschiedenen Parameter auf das Free Cooling Potential haben. Die grobe Abschätzung des Potentials nach Anhang A kann als Hilfestellung bei der Planung von neuen Anlagen oder der Beurteilung der Sinnhaftigkeit des Free Coolings beigezogen werden. Detailliertere Untersuchungen des Free Cooling Potentials wird besonders für Anbindungen an Wasser oder Erdwärmesonden benötigt sowie bei einer Wärmenutzung der Kältemaschine während der Übergangszeit.

Literatur

- [1] *VDMA 24247: Energieeffizienz von Kälteanlagen, Teil 8: Komponenten – Wärmeübertrager*. Technical report, VDMA, 2011.
- [2] *SIA 2024: Standard-Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik*. Technical report, SIA, 2006.
- [3] *SIA 2028: Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik*. Technical report, SIA, 2010.
- [4] *SWKI:2003-3: Rückkühlung*. Technical report, SWKI, 2005.
- [5] Morten Juel Skovrup. *Pack Calculation Pro: Users Guide Version 4.10, S.77-81*. IPU, Lyngby, 2010.
- [6] *SIA 384/6: Erdwärmesonde*. Technical report, SIA, 2010.
- [7] *SIA 384/3: Heizungsanlagen in Gebäuden Energiebedarf*. Technical report, SIA, 2013.
- [8] *SIA 384/7: Grundwasserwärmenutzung*. Technical report, SIA, 2015.
- [9] *SIA 382/1: Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen*. Technical report, SIA, 2014.
- [10] Energie Schweiz. *Kälte-Tool zur Abschätzung des Stromverbrauchs, der Umweltauswirkungen und der Lebenszykluskosten von Kälte- und Klimakälteanlagen, Version 3.1(2018)*. unter: <https://www.energieschweiz.ch/page/de-ch/planungshilfen-fuer-kaelteanlagen> (abgerufen am 10.04.2018).
- [11] MeteoSchweiz. *Klimabulletin 2017*. Zürich, 2018.

Abbildungsverzeichnis

1	Einteilung des Gesamtsystems in drei Teilsysteme	2
2	Schematische Darstellung Schaltung 1	3
3	Schematische Darstellung Schaltung 2	4
4	Schematische Darstellung Schaltung 3	4
5	Schematische Darstellung Schaltung 4	5
6	Schematische Darstellung Schaltung 5	5
7	Schematische Darstellung Schaltung 0	6
8	Monatlicher Kühl- und Heizbedarf	11
9	Berechnung der Wärme- / Kältelasten durch Transmission und durch die Aus- senluftzufuhr	12
10	Auswertung des Free Cooling Potentials im Mittelland ($\Theta_{e,a} = 9.4^{\circ}C$), Rück- kühlung: Trocken	18
11	Free Cooling Potential für die verschiedenen Regionen, Rückkühlung: Trocken	20
12	Free Cooling Potential für das Mittelland ($\Theta_{e,a} = 9.4^{\circ}C$)	21
13	Free Cooling Potential für die Erdwärmesonde und Grundwasseranbindung . .	22
14	Free Cooling Potential und Einsparung der Elektrischen Energie, Standort: Mit- telland ($\Theta_{e,a} = 9.4^{\circ}C$), Rückkühlung: Trocken	23
15	Monatlicher Kühl- und Heizbedarf, Standort: Mittelland ($\Theta_{e,a} = 9.4^{\circ}C$), An- wendung: Bürogebäude	24
16	Darstellung von wirtschaftlichen Free Cooling Potentialen in Abhängigkeit der getätigten Investitionen und jährlichen Unterhaltskosten Kosten für einen Free Cooling Betrieb, gültig für eine Anlage mit 200 kW und den Parametern nach Tab. 5.	26
17	Anwendung der Benchmarks im Mittelland ($\Theta_{e,a} = 9.4^{\circ}C$), Rückkühlung: Trocken	27
18	Potential bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen des Kühlmediums $T_{K,VL}$ bei den Anwendungen Bürogebäude und Rechenzentrum, Standort: Mittelland ($\Theta_{e,a} = 9.4^{\circ}C$), Rückkühlung: Trocken, Schaltung 3	28
19	Caption for LOF	28
20	Monatlicher Kühlbedarf der Anwendungen Spital/Arztpraxis und Kaufhaus im Vergleich, Kühlbedarf als prozentualer Anteil der maximalen Last, Standort: Mittelland ($\Theta_{e,a} = 9.4^{\circ}C$)	29
21	Wöchentlicher Kühlbedarf der Anwendungen Rechenzentrum, Standort: Mittel- land ($\Theta_{e,a} = 9.4^{\circ}C$)	29
22	Vergleich des Potential bei verschiedenen Schaltungen Standort: Mittelland ($\Theta_{e,a} =$ $9.4^{\circ}C$), Rückkühlung: Trocken, Bürogebäude	30
23	Vergleich des Potential bei trockener und hybrider Rückkühlung Standort: Mit- telland ($\Theta_{e,a} = 9.4^{\circ}C$), Bürogebäude, Schaltung 3	31
24	Flussdiagramm zur Abschätzung des Free Cooling Potentials bei Verwendung von trockenen Rückkühlern	37
25	Flussdiagramm zur Abschätzung des Free Cooling Potentials bei Verwendung von hybriden Rückkühlern	38
26	Wahl der Rückkühlart	39
27	Wahl des Standorts	40
28	Wahl der Schaltung	41
29	Wahl der Anwendung	41

Tabellenverzeichnis

1	Verwendete Wetterdaten	9
2	Standorte und deren Randbedingungen	9
3	Untersuchte Standard-Nutzungsbedingung	10
4	Bodentemperaturen an den Standorten nach vereinfachter Abschätzung SIA 384/6 [6]	21
5	Parameter für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Anlagen mit Betrieb von Free Cooling. Die Wirtschaftlichkeit der Kältemaschine wurde mit Hilfe des Kälte-Tools von <i>Energie Schweiz</i> berechnet.	25
6	Wahl der Vorlauftemperatur der Kühlanforderung	40

A Hilfe zur Beurteilung des Free Cooling Potentials in der Schweiz

Die folgenden Abschnitte sollen Unterstützung bei der Evaluation des Free Cooling Potentials bieten. Die Abschnitte A.1, A.2 und A.3 dienen der groben Abschätzung des Potentials unter Berücksichtigung der einzelnen Parameter. Diese dient vor allem dem Verständnis der Einflüsse, welche die einzelnen Parameter auf das Free Cooling Potential haben und der groben Kategorisierung. Eine genauere Aussage zu einem konkreten Fall kann durch die Betrachtung der Ergebnisdiagramme gemacht werden. Dazu bietet der Abschnitt A.4 eine Einführung in das Vorgehen. Abschnitt A.5 beschreibt das Vorgehen bei der Evaluation von Abweichenden Parametern.

A.1 Trockenrückkühlung

Mit Hilfe von Abb. 24 ist es möglich, das Free Cooling Potential mit Trockenrückkühlung sehr schnell abzuschätzen. Das Potential beschreibt den Anteil an Kälte, welcher durch das Free Cooling abgedeckt werden kann. Im Flussdiagramm werden die einflussreichsten Parameter von oben nach unten ausgekoppelt und die zu erreichenden Potentiale ausgewiesen. Bei jedem Schritt nach unten schränkt ein neuer Parameter das Free Cooling weiter ein. Ausgewiesen wird das Potential bezogen auf das gesamte Jahr als Maximum der verbleibenden Parameterkombinationen.

A.2 Hybridrückkühlung

Mit Hilfe von Abb. 25 ist es möglich, das Free Cooling Potential mit Hybridrückkühler sehr schnell abzuschätzen. Wiederum werden die einflussreichsten Parameter von oben nach unten ausgekoppelt. Die zu erreichenden Potentiale bezogen auf das gesamte Jahr, werden als Maximum der verbleibenden Parameterkombinationen ausgewiesen. Dabei ist zu beachten, dass in der Betrachtung der Hybridrückkühlung von einer konstanten Benetzung ausgegangen wird (vgl. Kap. 2.4). Dadurch repräsentieren die ausgewiesenen Werte das maximal mögliche Potential, welches durch die hybride Rückkühlung erreicht werden kann.

Diagramm zur Abschätzung des Free Cooling Potentials in der Schweiz

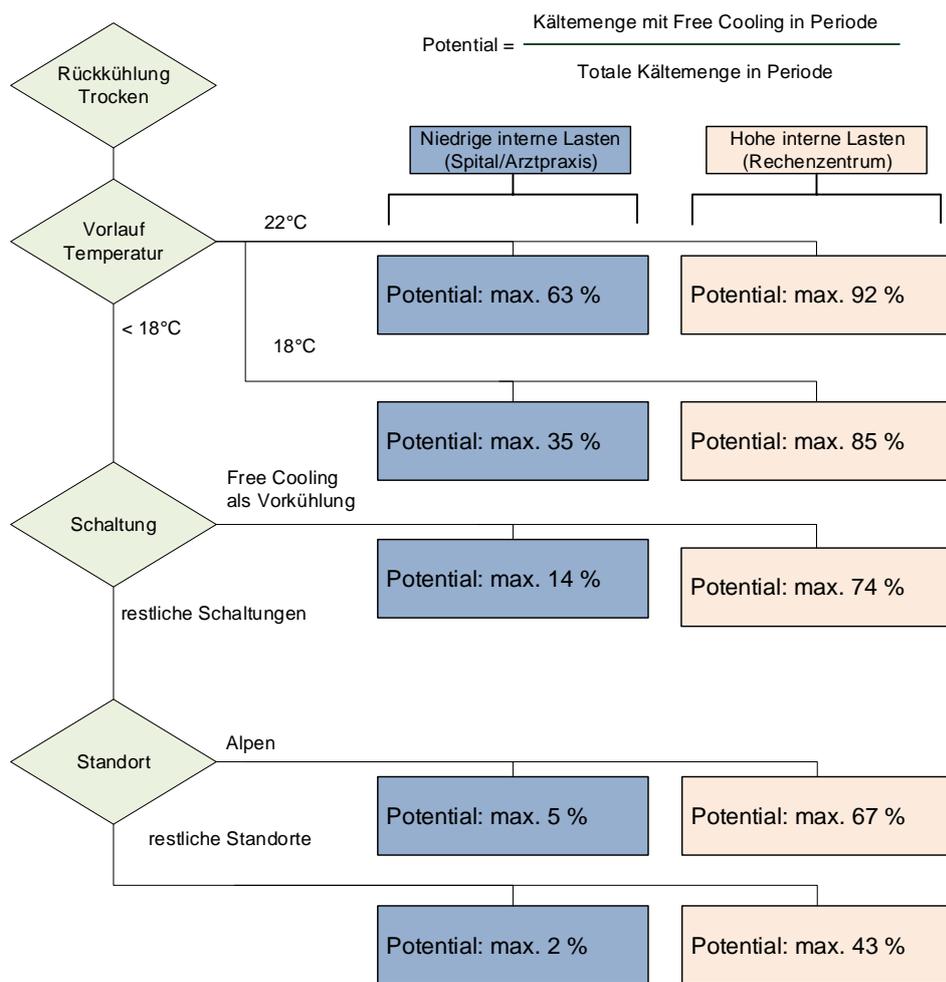


Abbildung 24 – Flussdiagramm zur Abschätzung des Free Cooling Potentials bei Verwendung von trockenen Rückkühlern

Diagramm zur Abschätzung des Free Cooling Potentials in der Schweiz

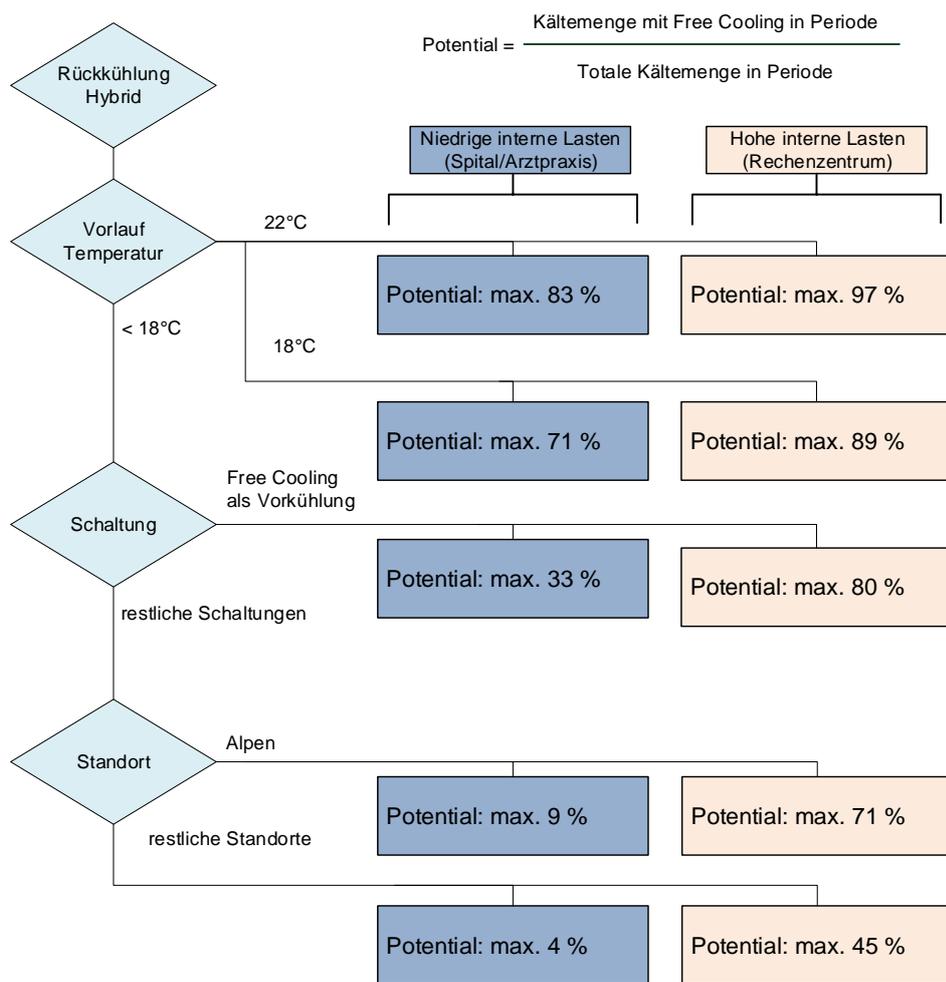


Abbildung 25 – Flussdiagramm zur Abschätzung des Free Cooling Potentials bei Verwendung von hybriden Rückkühlern

A.3 Erdwärmesonde und Grundwasseranbindung

Das Potential der Erdwärmesonde und der Grundwasseranbindung ist nur schwer abzuschätzen, da relevante Temperaturen stark abhängig vom Standort sind. Bereits geringe Standortänderungen können grössere Temperaturschwankungen zur Folge haben. Dadurch wird eine Potentialabschätzung mit individueller Beurteilung benötigt, in der auch die relevanten Temperaturen für den auszuwertenden Standort bestimmt werden. Zudem muss das thermische Verhalten des Untergrundes miteinbezogen werden. Weiter müssen speziell beim Grundwasser (auch zutreffend für anderen Wasseranbindungen wie Seewasser, Flusswasser, etc.) allfällige gesetzliche Limitierungen beachtet werden.

A.4 Auswertung der Diagramme

Eine genauere Bestimmung des Free Cooling Potentials für einen konkreten Fall erfolgt durch die Auswertung und ggf. Interpolation in den Ergebnisdiagrammen (vgl. Anhang B). Der folgende Abschnitt soll eine Einführung in die effiziente Nutzung der Diagramme bieten. Das Vorgehen für die Bestimmung des Potentials eines konkreten Falls wird hier erläutert.

Wahl der Rückkühlart

Zuerst wird die Art der Rückkühlung bestimmt (vgl. Kap. 2.2). Durch die Wahl der Rückkühlart kann der richtige Abschnitt im Anhang mit den zutreffenden Diagrammblätter bestimmt werden. (vgl. Abb. 26)

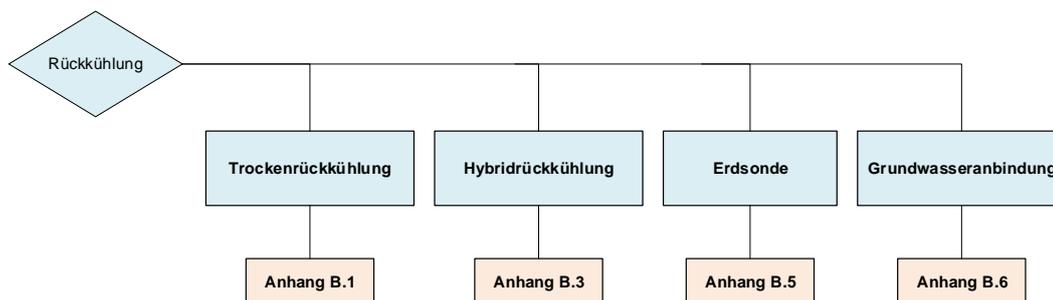


Abbildung 26 – Wahl der Rückkühlart

Festlegen des Standorts

Unter Berücksichtigung der Randbedingungen wird der Standort gewählt (vgl. Kap. 2.2 / Abb. 27). Trifft keiner der ausgewerteten Standorte auf den zu klärenden Fall zu, müssen ggf. zwei Standorte ausgewertet und anschliessend interpoliert werden (vgl. Anhang A.5). Durch die Wahl des Standorts kann das richtige Diagrammblatt im vorher bestimmten Abschnitt im Anhang ausgewählt werden.

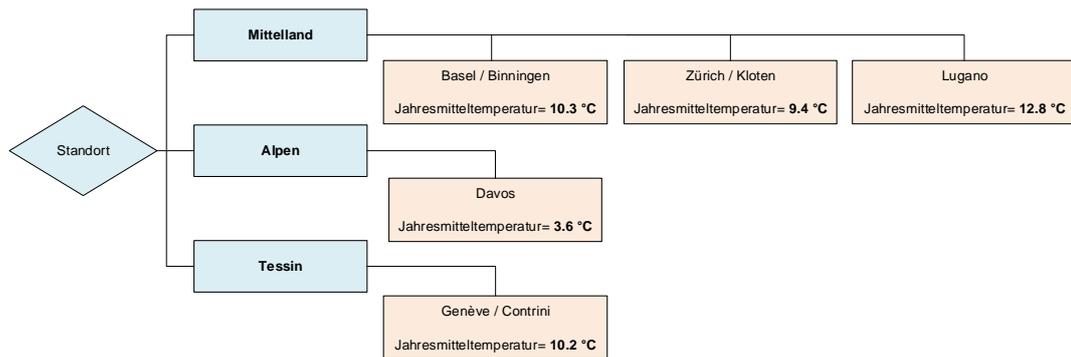


Abbildung 27 – Wahl des Standorts

Bestimmen des Temperaturniveaus der Kühlanforderungen

Unter Berücksichtigung des zu erreichenden Temperaturniveaus wird die Vorlauftemperatur des Kühlmediums $T_{K,VL}$ gewählt (vgl. Kap. 2.2 / Tab. 6). Treffen die ausgewerteten Temperaturen nicht auf den zu klärenden Fall zu, müssen ggf. zwei Temperaturen ausgewertet und anschließend interpoliert werden (vgl. Anhang A.5). Durch die Wahl der Vorlauftemperatur des Kühlmediums kann das richtige Diagramm aus dem vorher bestimmten Diagrammblatt ausgewählt werden.

Vorlauftemperatur	Referenz
6°C	Minimalwert gem.SIA 382/1
10°C	Minimalwert gem.SIA 382/1
14°C	Minimalwert gem.SIA 382/1
18°C	Interpolationswert
22°C	Temperaturniveau IT-Anwendung

Tabelle 6 – Wahl der Vorlauftemperatur der Kühlanforderung

Bestimmen der Art der Kälteerzeugung

Unter Berücksichtigung der Art der Kälteerzeugung wird die zutreffende Schaltung gewählt (vgl. Kap. 2.2 / Abb. 28). Dadurch kann die richtige Säulenreihe aus dem vorher bestimmten Diagramm ausgewählt werden.

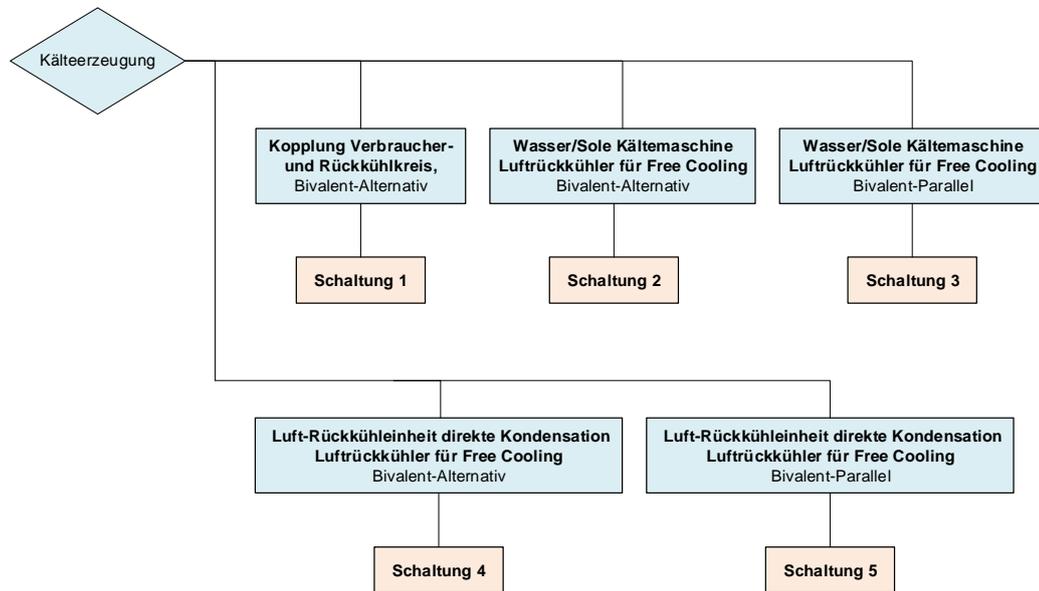


Abbildung 28 – Wahl der Schaltung

Bestimmen der Anwendung

Unter Berücksichtigung des Anteils an interner Last wird die zutreffende Schaltung gewählt (vgl. Kap. 2.2 / Abb. 29). Treffen die ausgewerteten Anwendungen nicht auf den zu klärenden Fall zu, müssen ggf. zwei Anwendungen ausgewertet und anschliessend interpoliert werden (vgl. Anhang A.5). Durch die Wahl der Anwendung kann der richtige Wert aus der vorher bestimmten Säulenreihe ausgewählt werden.

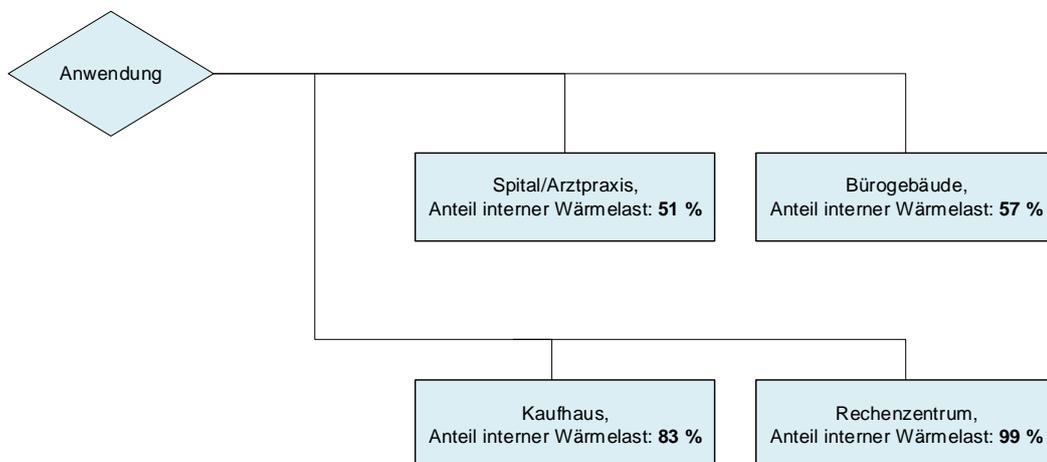


Abbildung 29 – Wahl der Anwendung

A.5 Interpolation für abweichende Parameter

Im Kap. 2.2 sind die Parameter beschrieben welche in den Simulationen berücksichtigt wurden. Sollen Parameter ausgewertet werden, welche in den Simulationen nicht abgebildet wurden, kann das Potential durch Interpolation zwischen vorhandenen Werten abgeschätzt werden. Beispielhaft soll eine Anwendung in Standort La Chaux-de-Fonds ausgewertet werden, deren Jahresmitteltemperatur von den ausgewerteten Standorten abweicht.

Festlegen der auszuwertenden Parameter:

Folgende Anwendung soll ausgewertet werden.

Standort:	La Chaux-de-Fond
Jahresmitteltemperatur:	$\Theta_{e,a} = 6.5^{\circ}C$
Anwendung:	Bürogebäude
Rückkühlung:	Trocken
Kälteerzeugung:	Schaltung 3

Bestimmen der Referenzwerte aus der Simulation:

Zur Interpolation werden zwei Referenzwerte mit ähnlichen Jahresmitteltemperaturen und sonst gleichen Parametern bestimmt. Für das Beispiel können die Standorte Zürich / Kloten und Davos gewählt werden.

Referenz 1:

Standort:	Zürich / Kloten
Jahresmitteltemperatur:	$\Theta_{e,a} = 9.4^{\circ}C$
Potential:	5.2 %

Referenz 2:

Standort:	Davos
Jahresmitteltemperatur:	$\Theta_{e,a} = 3.6^{\circ}C$
Potential:	9.5 %

Interpolation auf den gewünschten Wert:

Zur Bestimmung des gewünschten Werts wird zwischen den Referenzwerten linear interpoliert (vgl. Gl. 9).

$$\text{Potential La Chaux-de-Fond} = \frac{(9.5\% - 5.2\%)}{(9.4^{\circ}C - 3.6^{\circ}C)} \cdot (9.4^{\circ}C - 6.5^{\circ}C) + 5.2\% = 7.5\% \quad (9)$$

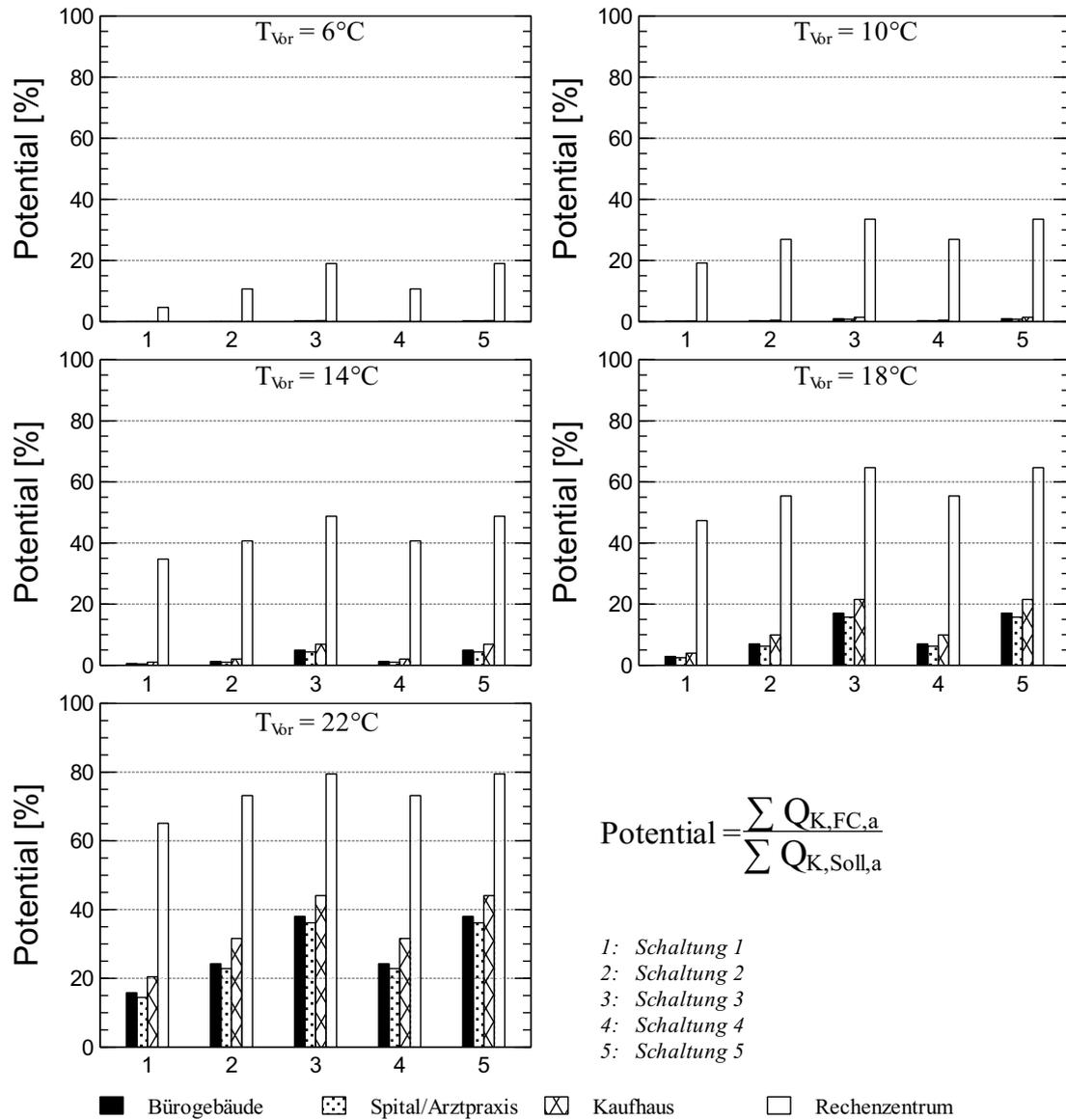
Die Interpolation kann auch angewendet werden für Abweichungen bei der Vorlauftemperatur des Kühlmediums $T_{K,VL}$ oder bei abweichendem Anteil an interner Last der Anwendung.

B Zusätzliche Diagramme

B.1 Potential mit Trockenrückkühlung

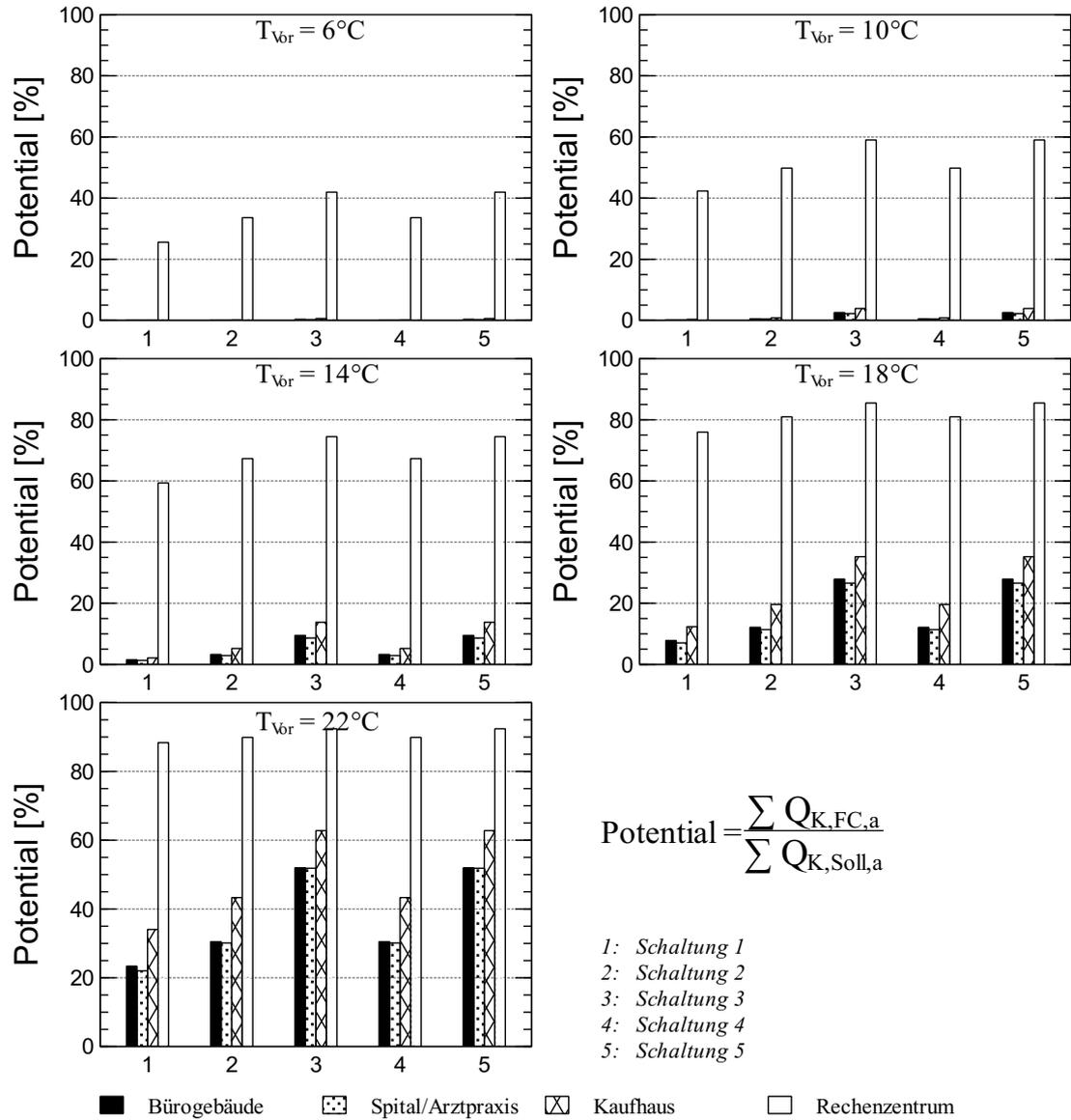
Free Cooling Potential

Standort: Basel Rückkühlung: Trocken



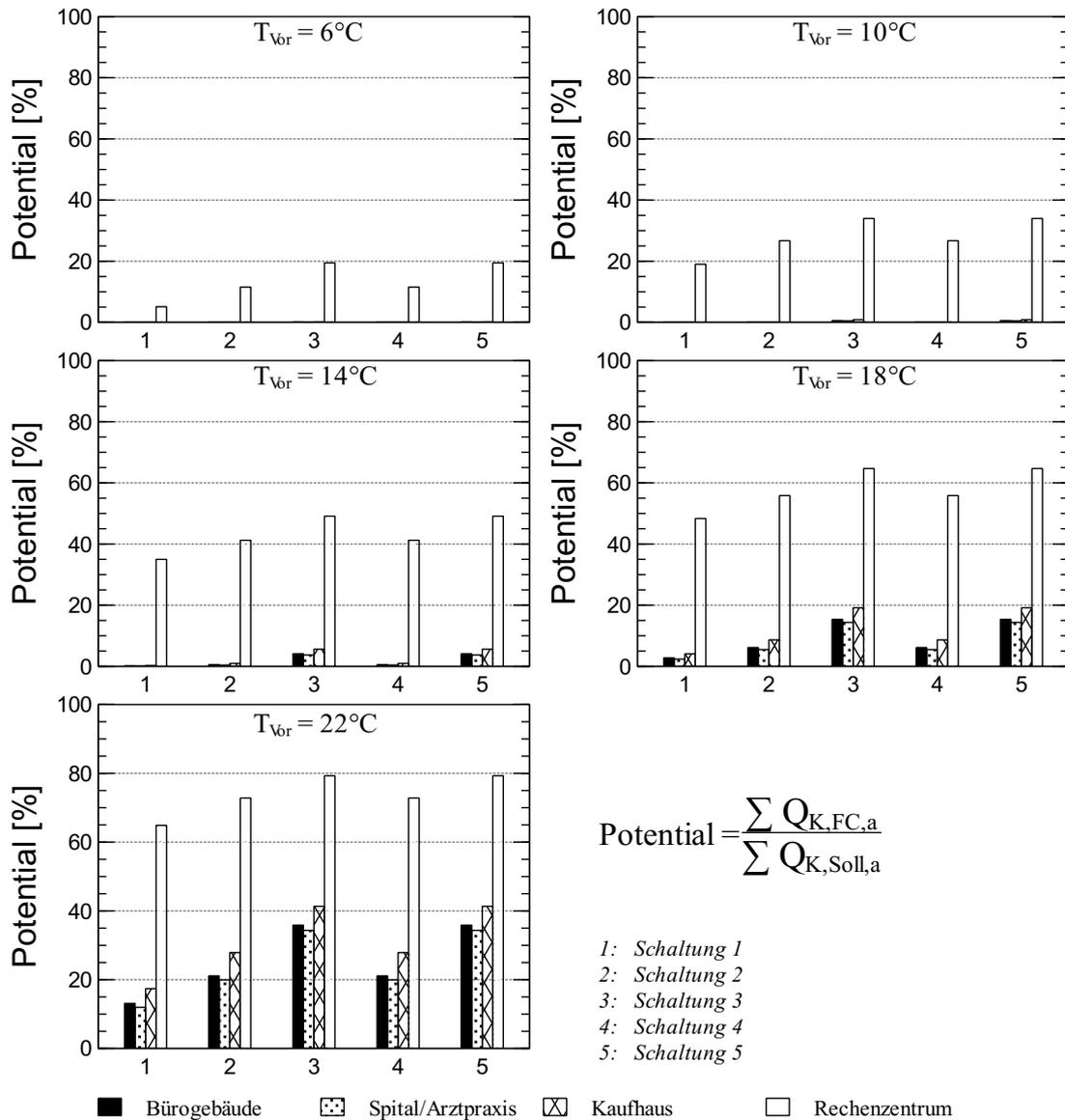
Free Cooling Potential

Standort: Davos Rückkühlung: Trocken



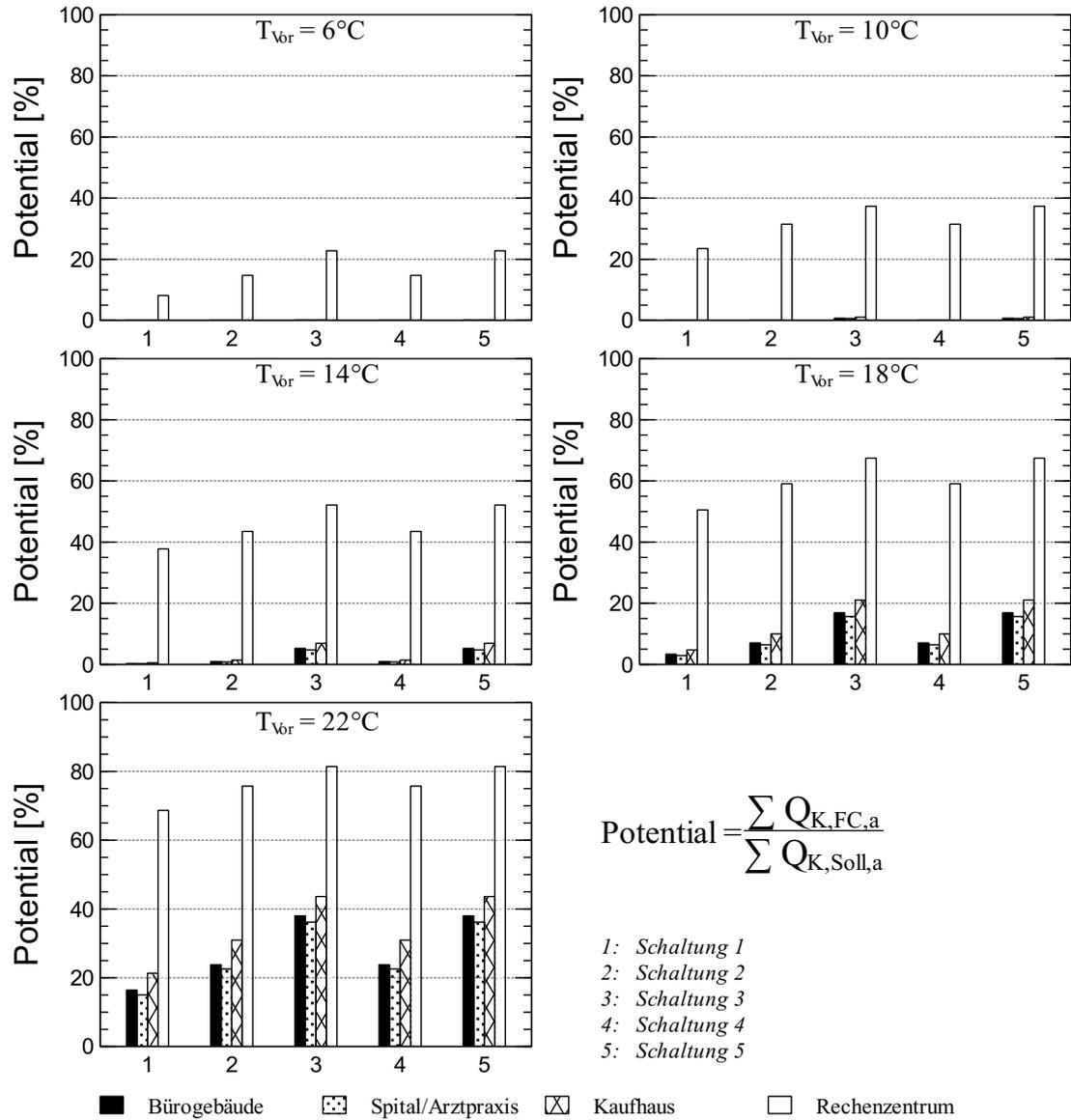
Free Cooling Potential

Standort: Genf Rückkühlung: Trocken



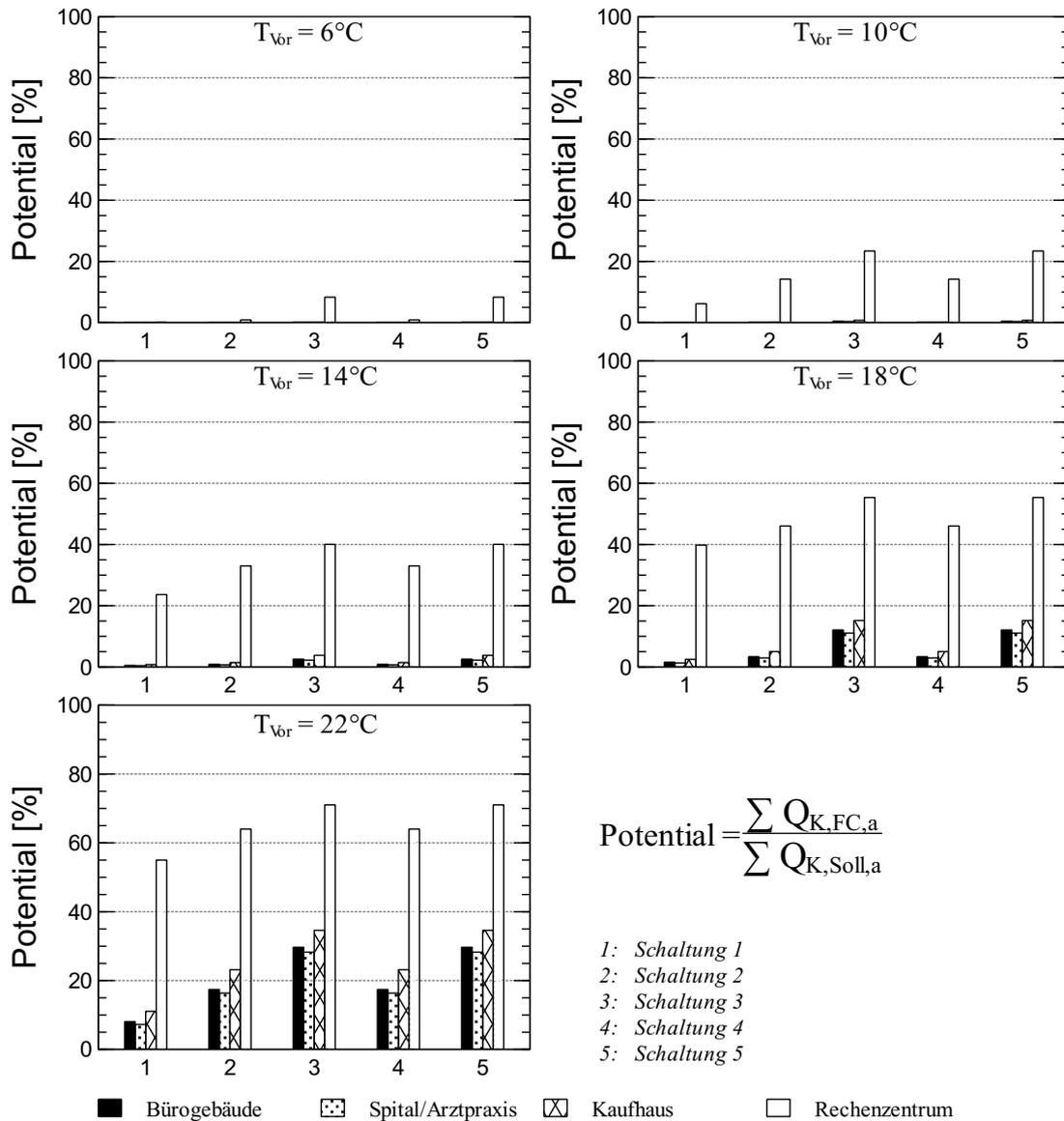
Free Cooling Potential

Standort: Kloten Rückkühlung: Trocken



Free Cooling Potential

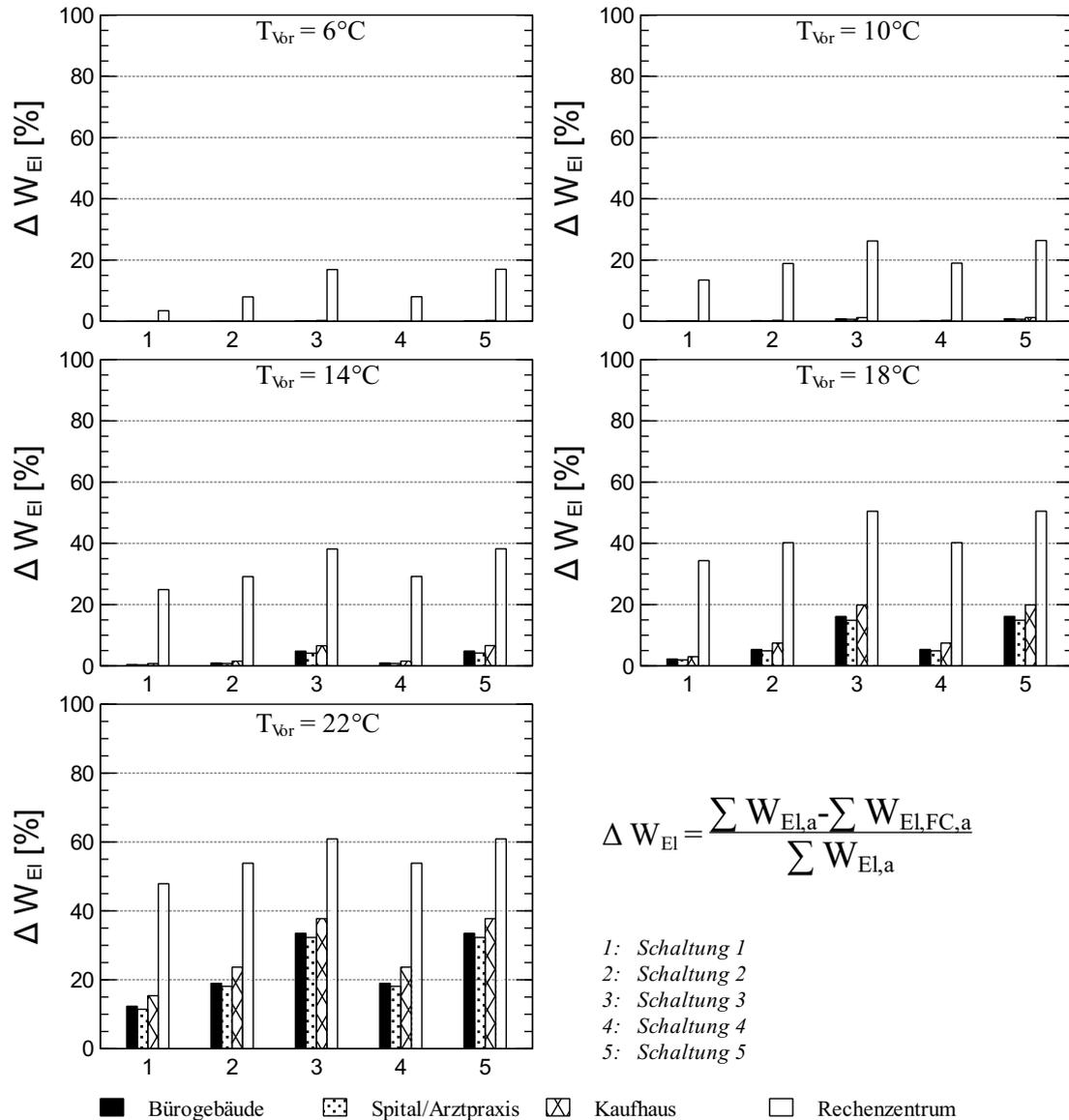
Standort: Lugano Rückkühlung: Trocken



B.2 Änderung elektrische Energie mit Trockenrückkühlung

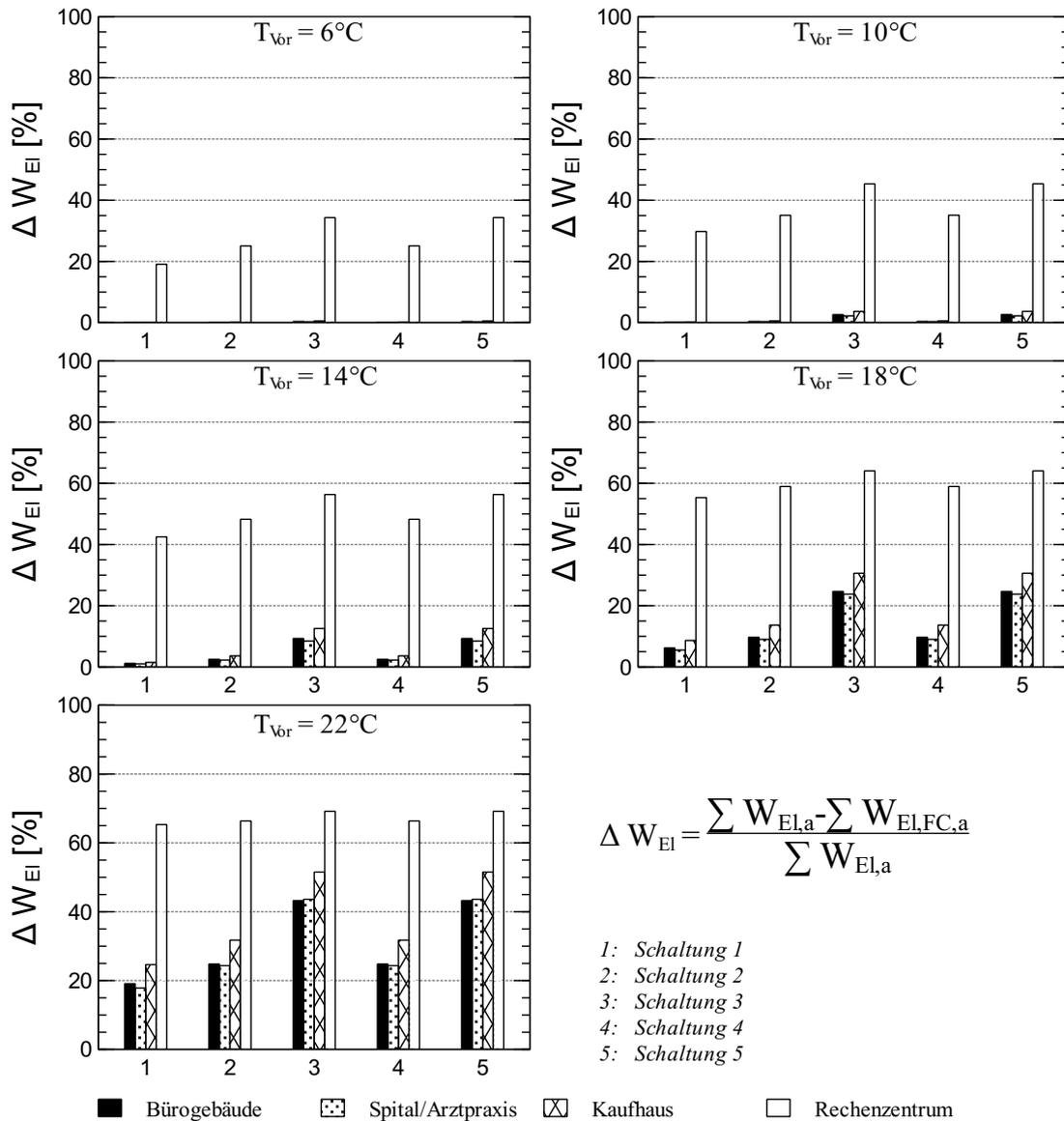
Einsparung elektrische Energie

Standort: Basel Rückkühlung: Trocken



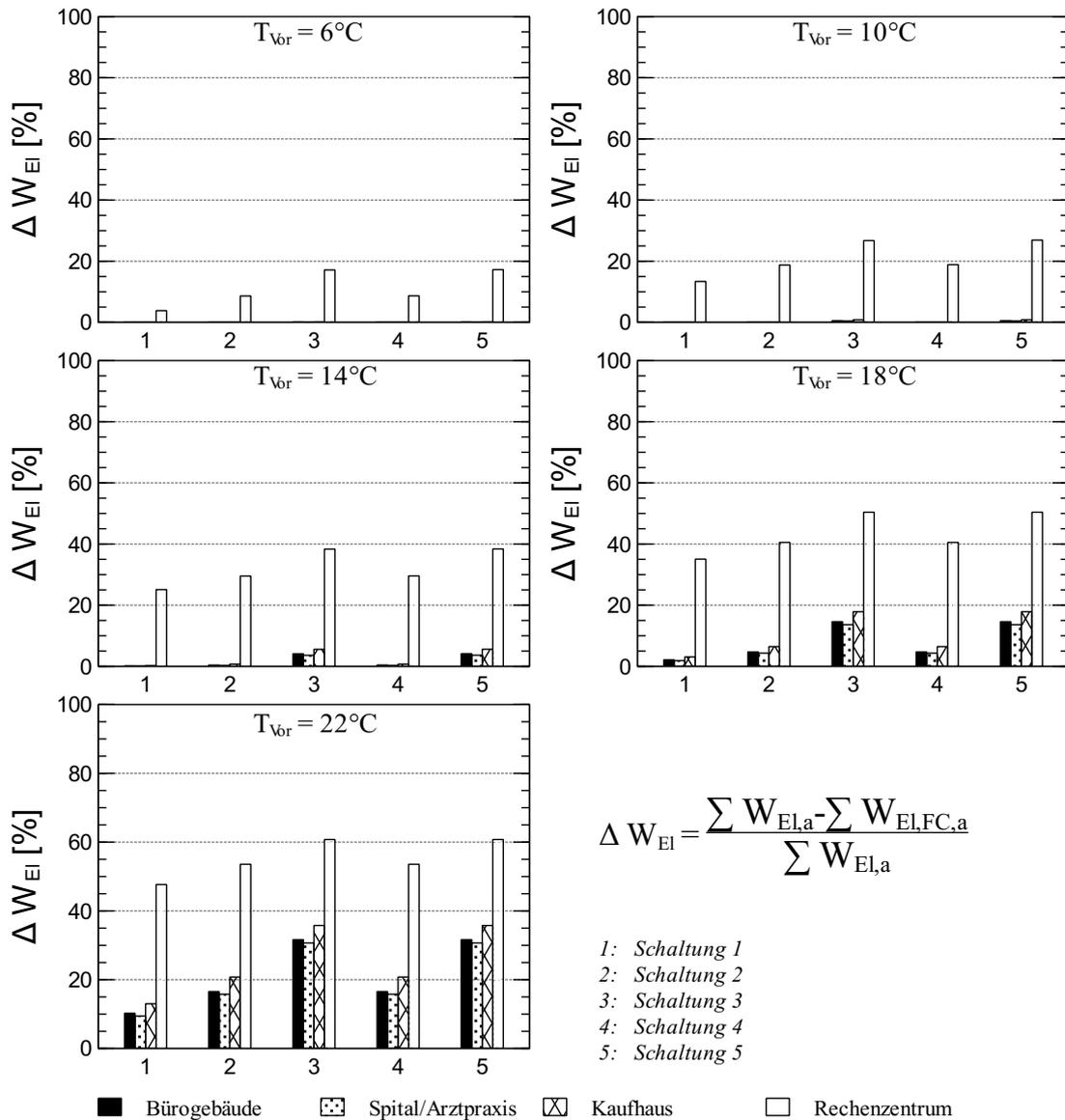
Einsparung elektrische Energie

Standort: Davos Rückkühlung: Trocken



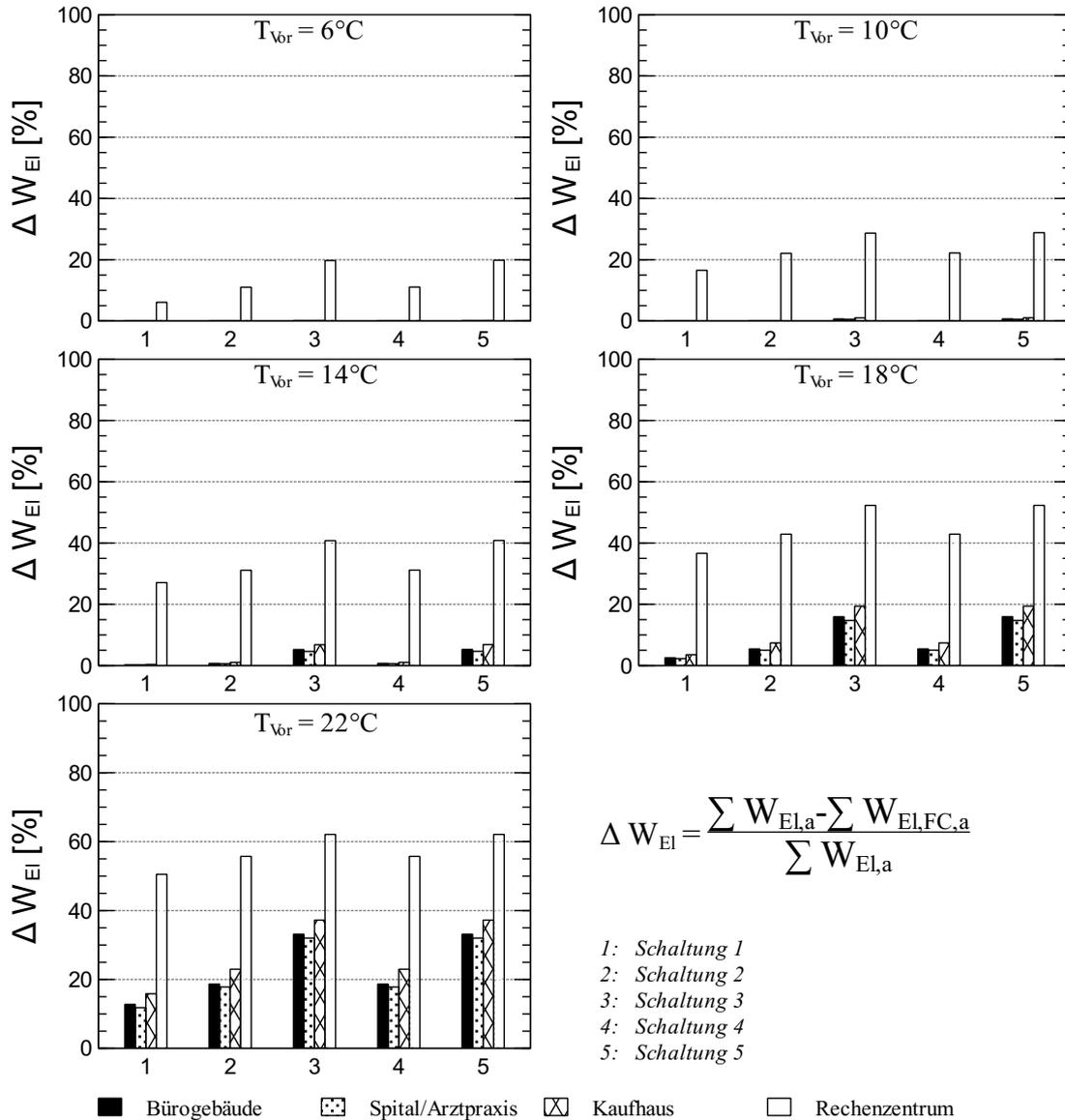
Einsparung elektrische Energie

Standort: Genf Rückkühlung: Trocken



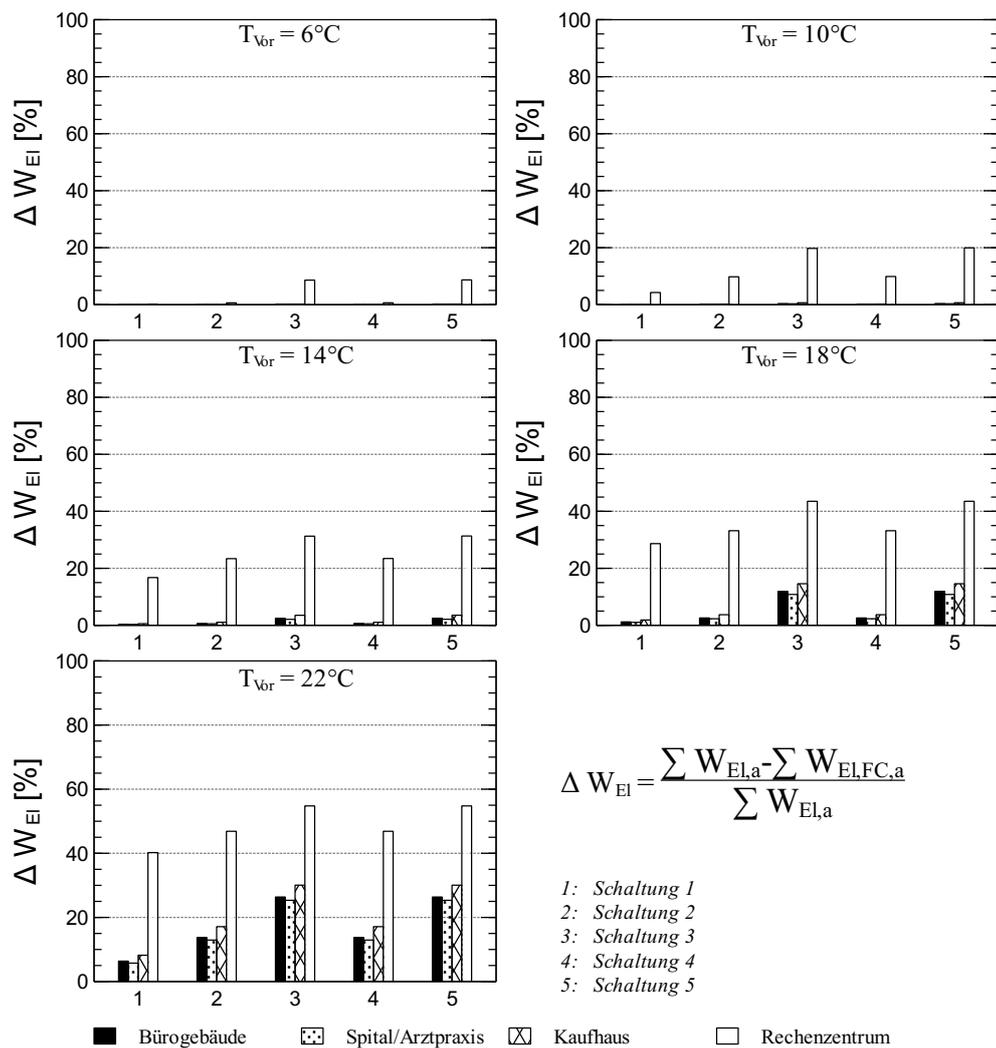
Einsparung elektrische Energie

Standort: Kloten Rückkühlung: Trocken



Einsparung elektrische Energie

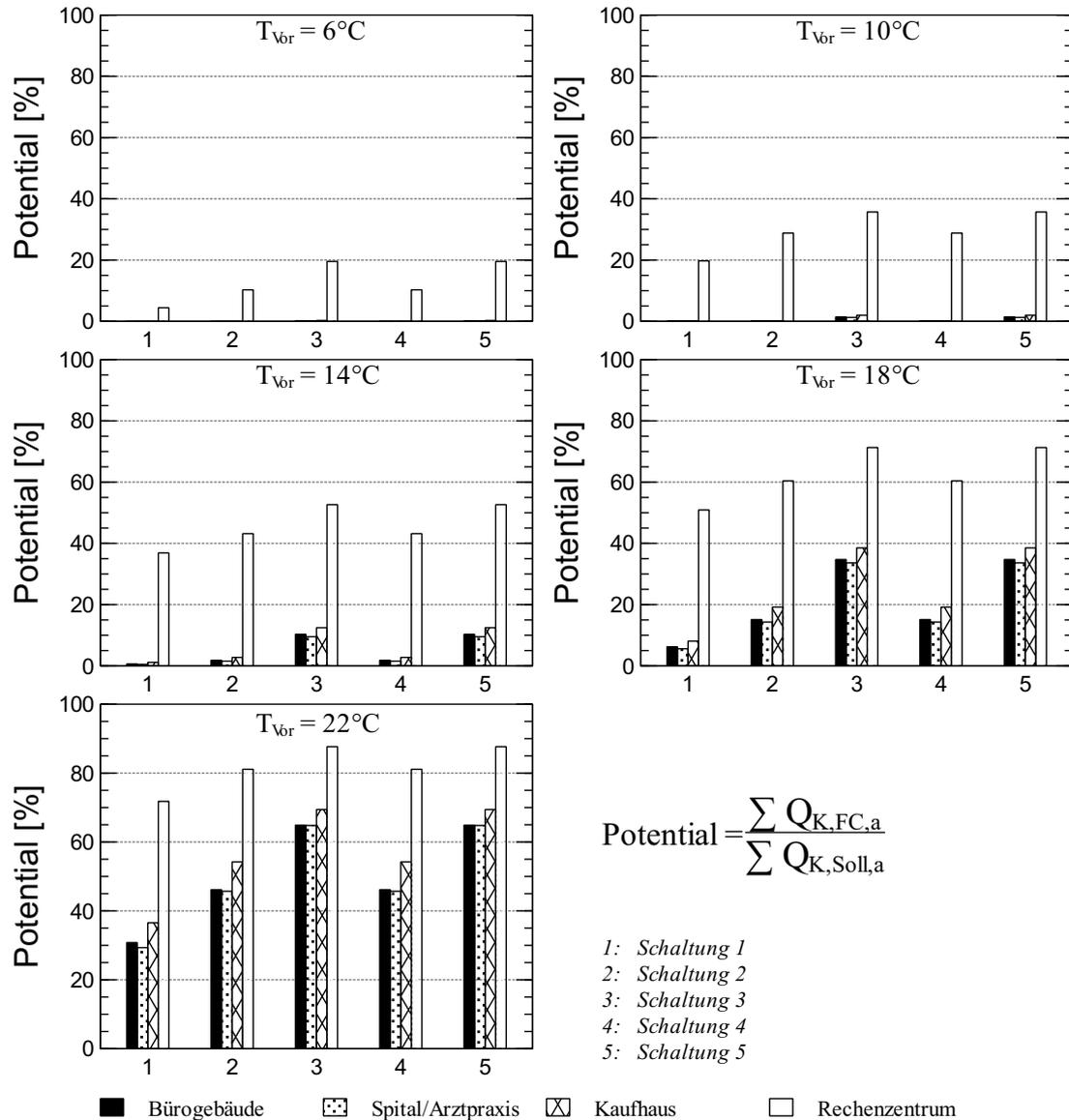
Standort: Lugano Rückkühlung: Trocken



B.3 Potential mit Hybridrückkühlung

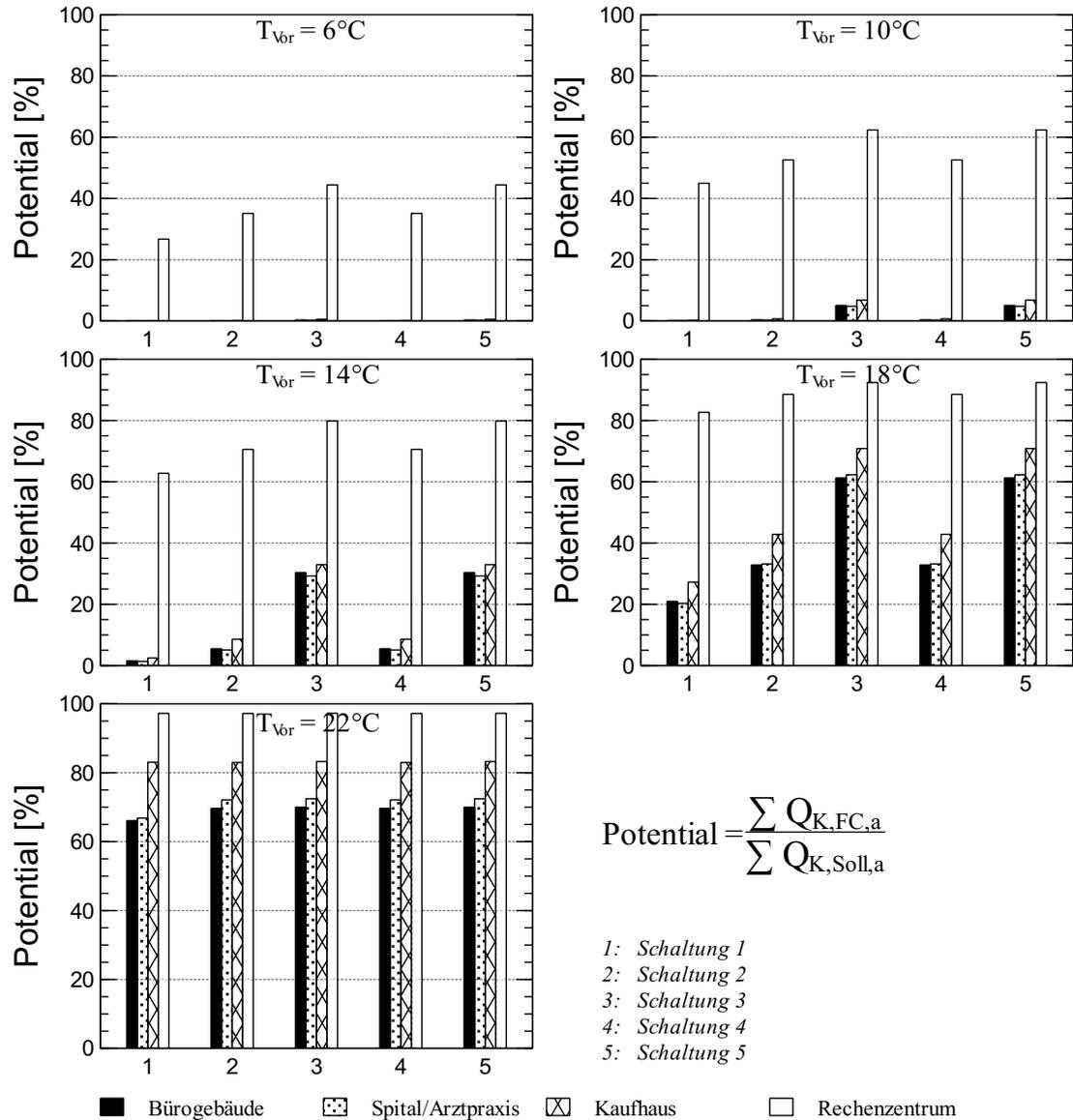
Free Cooling Potential

Standort: Basel Rückkühlung: Hybrid



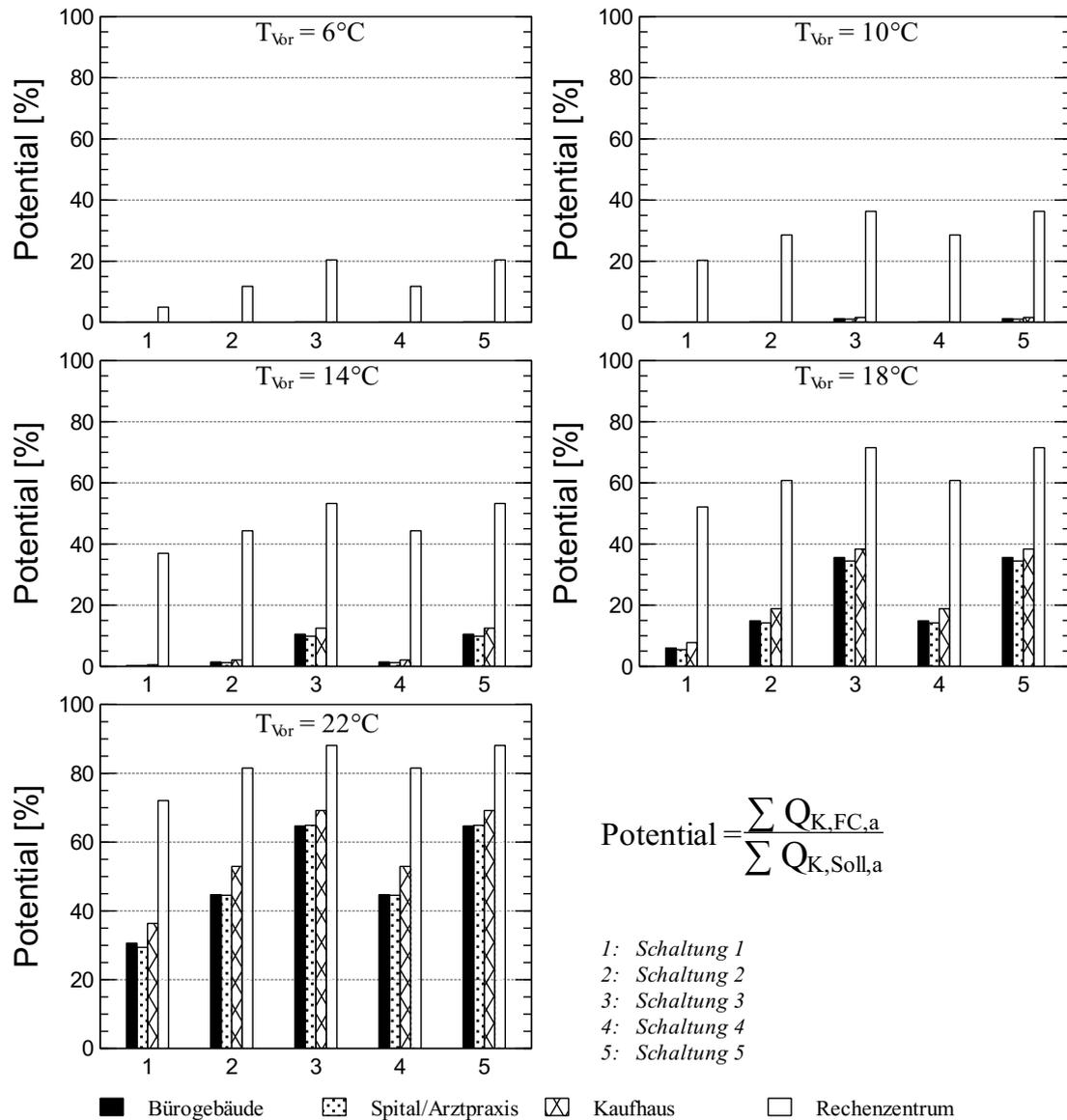
Free Cooling Potential

Standort: Davos Rückkühlung: Hybrid



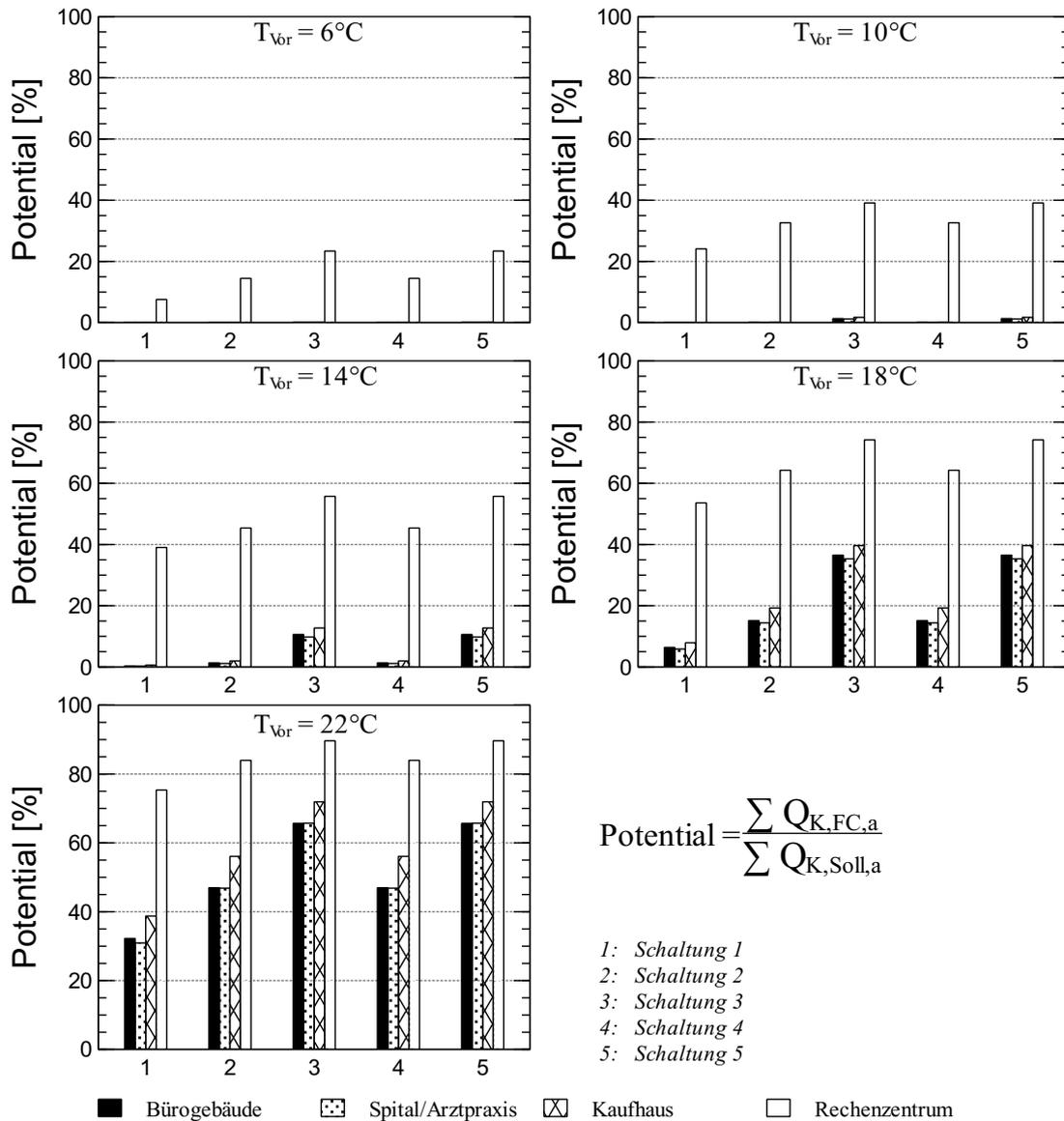
Free Cooling Potential

Standort: Genf Rückkühlung: Hybrid



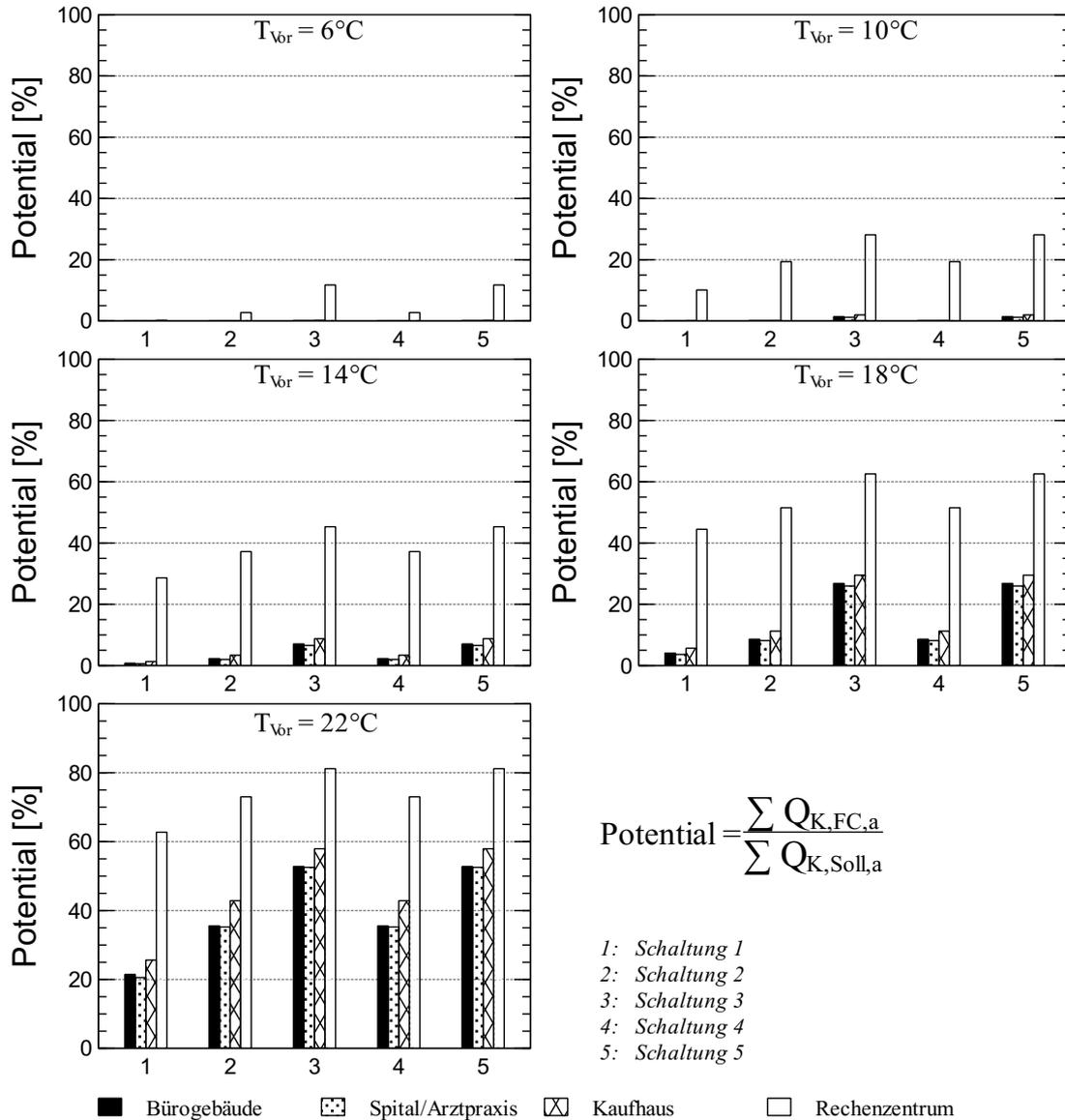
Free Cooling Potential

Standort: Kloten Rückkühlung: Hybrid



Free Cooling Potential

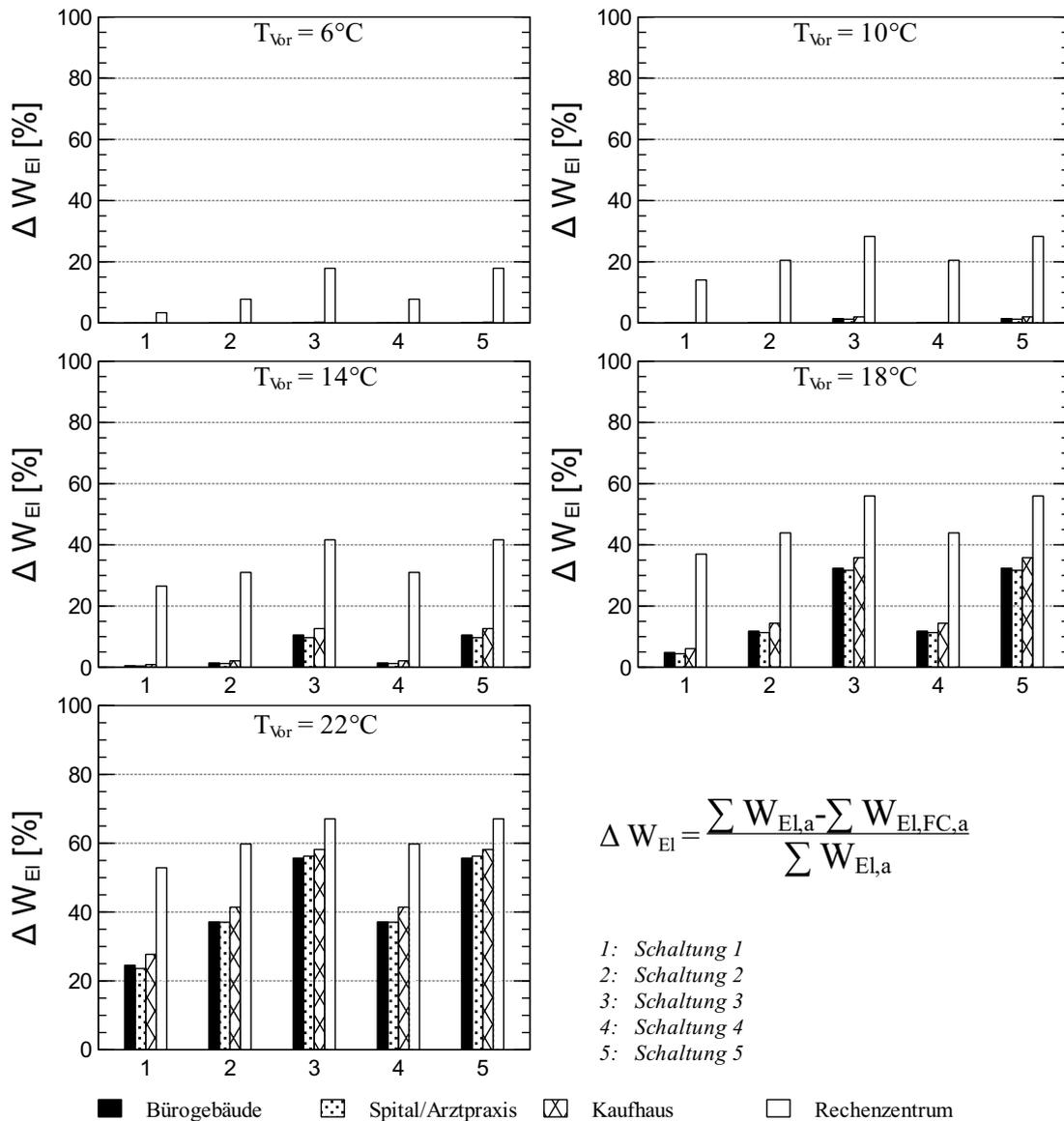
Standort: Lugano Rückkühlung: Hybrid



B.4 Änderung elektrische Energie mit Hybridrückkühlung

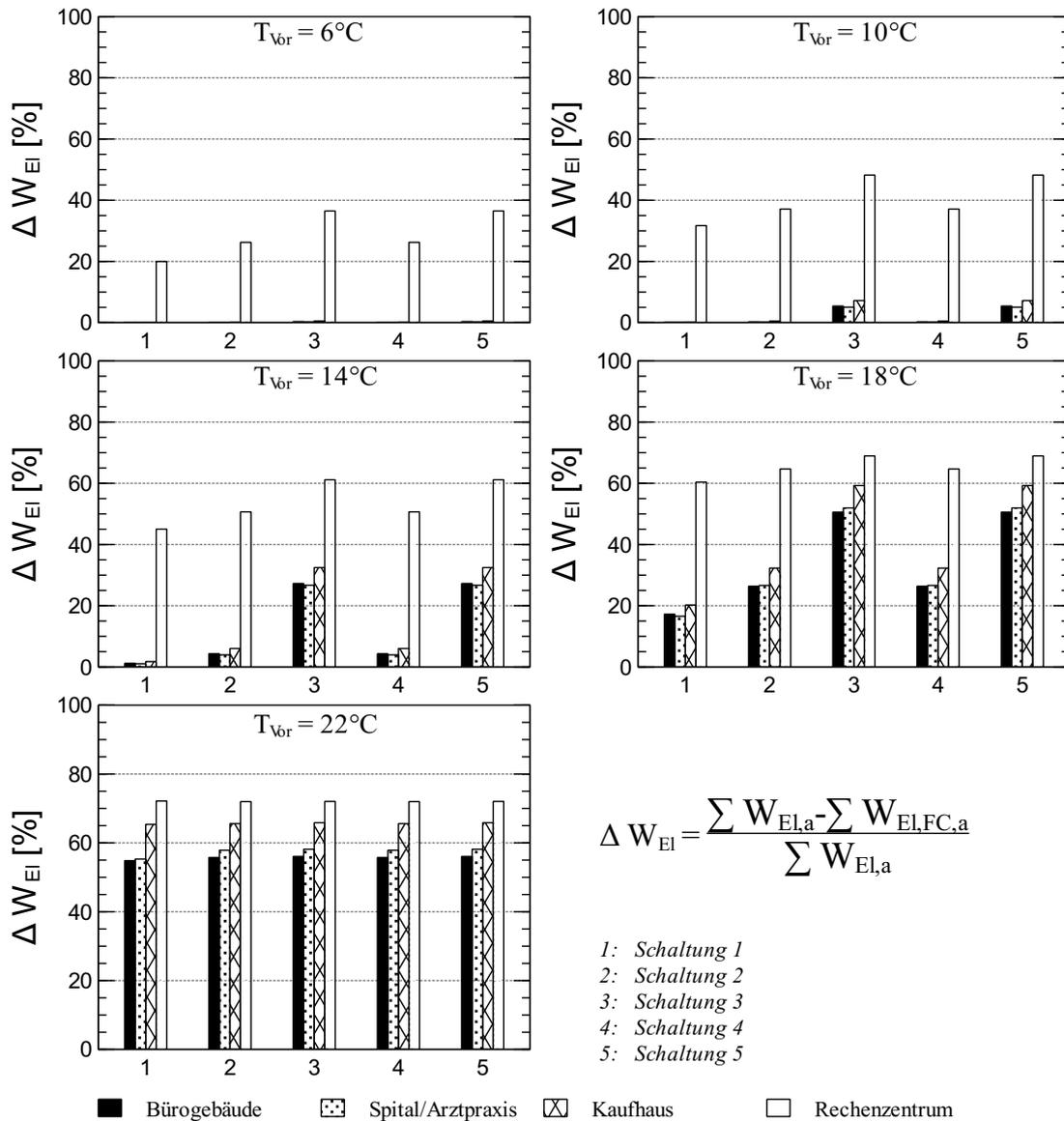
Einsparung elektrische Energie

Standort: Basel Rückkühlung: Hybrid



Einsparung elektrische Energie

Standort: Davos Rückkühlung: Hybrid

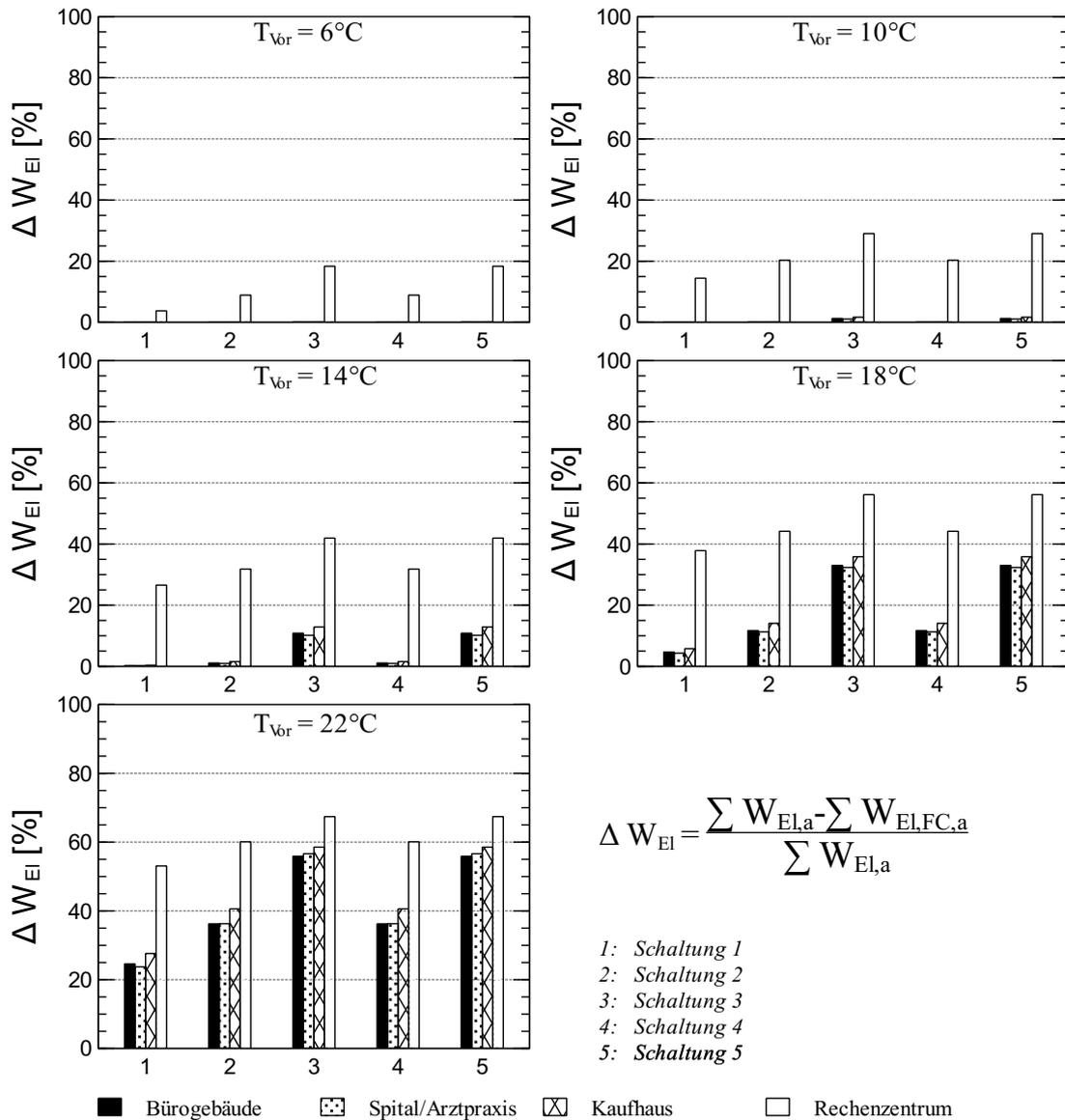


$$\Delta W_{EI} = \frac{\sum W_{El,a} - \sum W_{El,FC,a}}{\sum W_{El,a}}$$

- 1: Schaltung 1
- 2: Schaltung 2
- 3: Schaltung 3
- 4: Schaltung 4
- 5: Schaltung 5

Einsparung elektrische Energie

Standort: Genf Rückkühlung: Hybrid



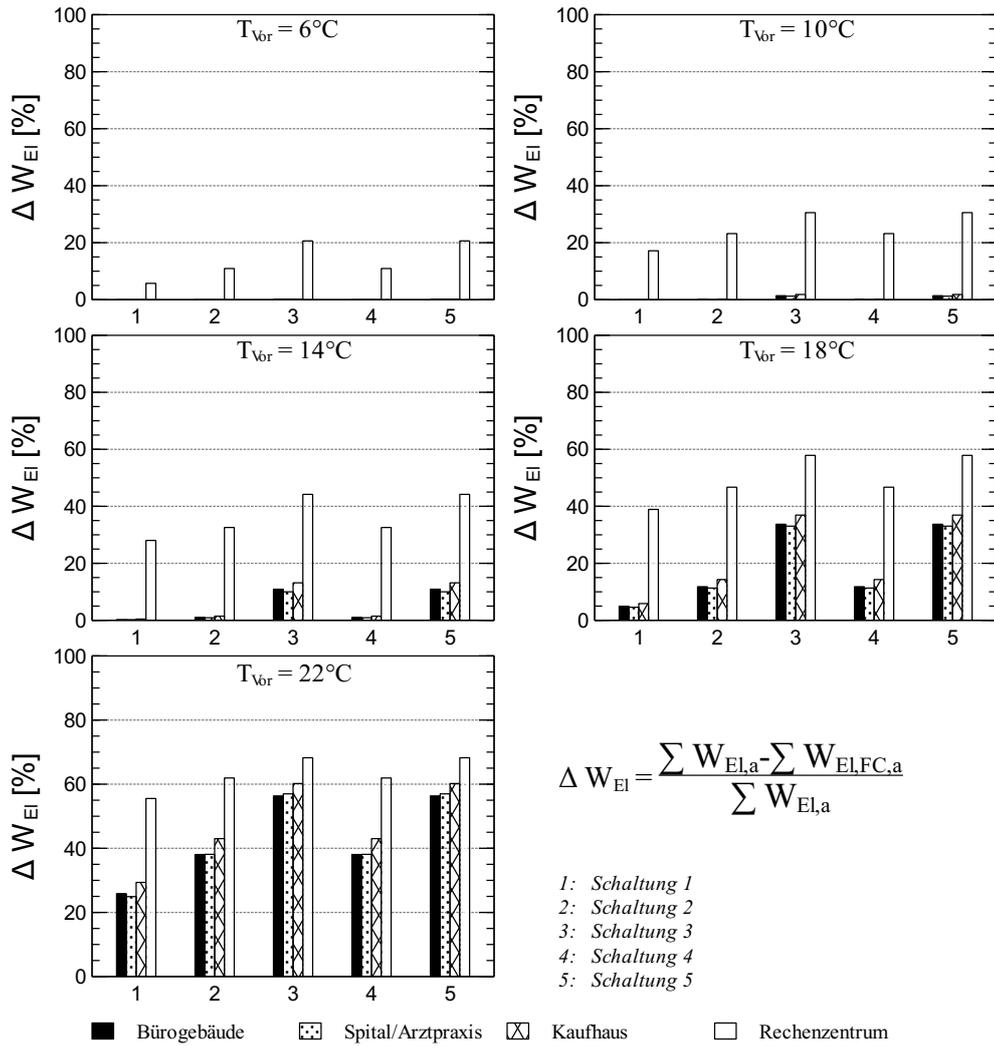
$$\Delta W_{EI} = \frac{\sum W_{El,a} - \sum W_{El,FC,a}}{\sum W_{El,a}}$$

- 1: Schaltung 1
- 2: Schaltung 2
- 3: Schaltung 3
- 4: Schaltung 4
- 5: Schaltung 5

■ Bürogebäude ▨ Spital/Arztpraxis ▩ Kaufhaus □ Rechenzentrum

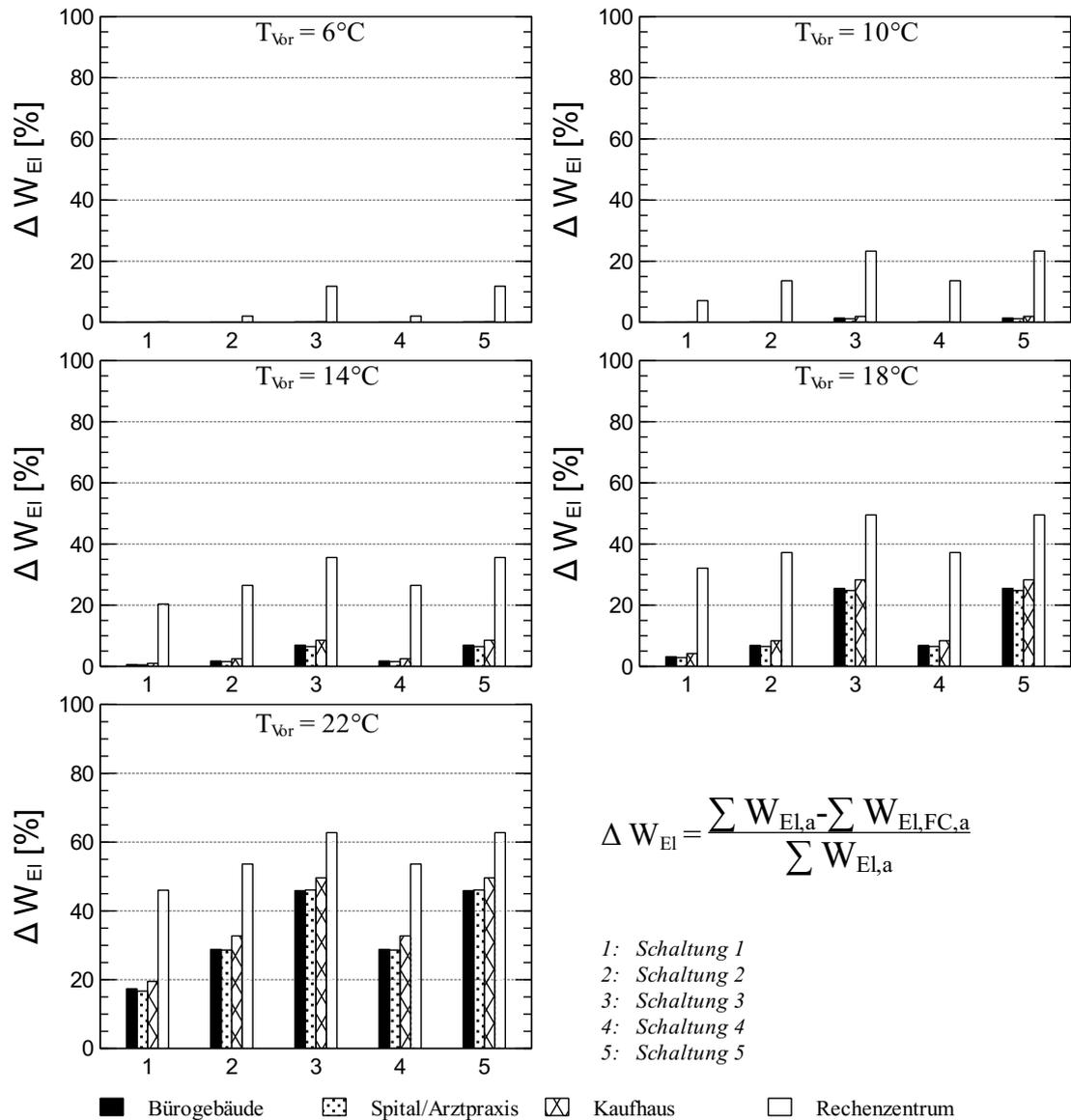
Einsparung elektrische Energie

Standort: Kloten Rückkühlung: Hybrid



Einsparung elektrische Energie

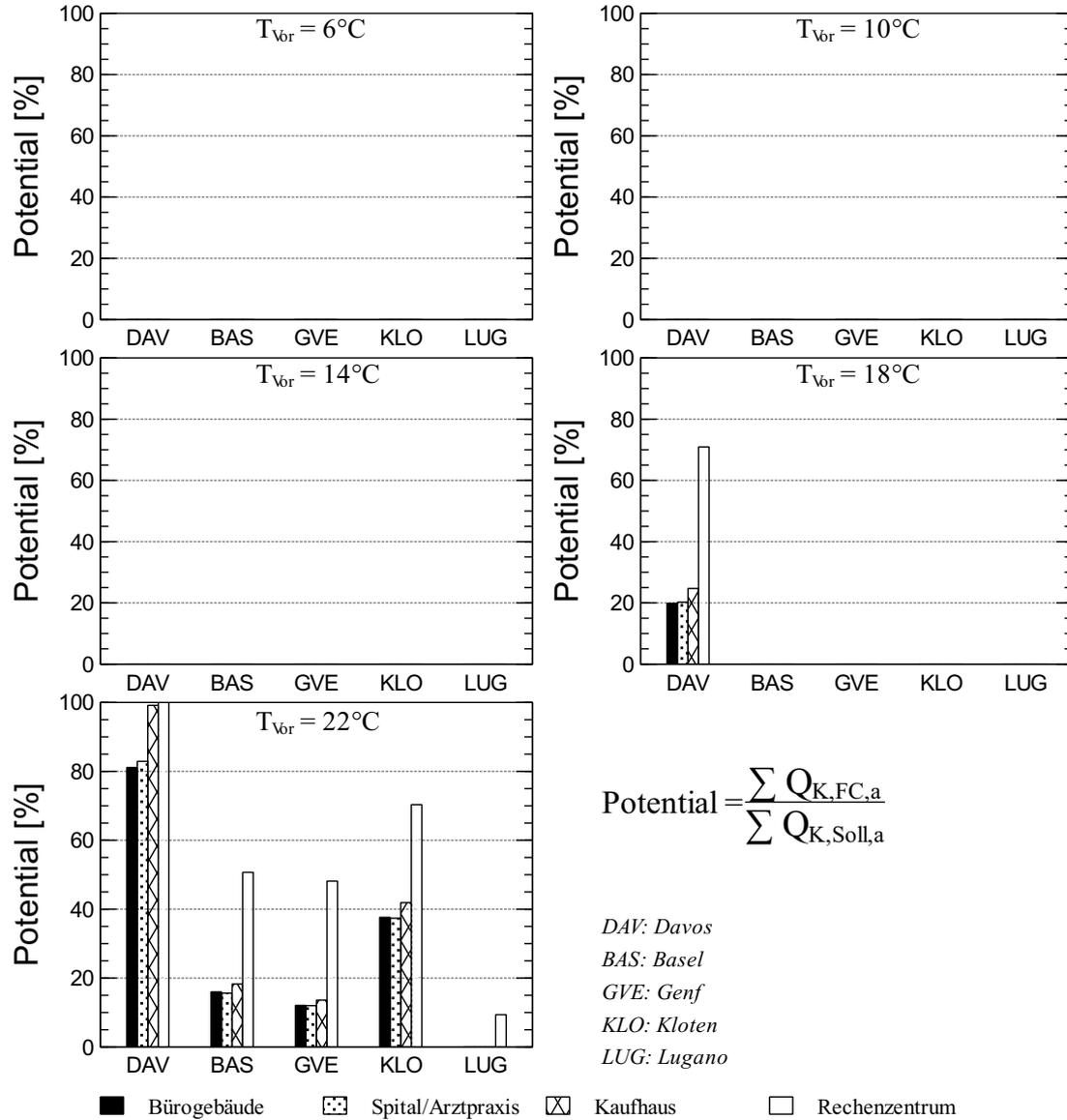
Standort: Lugano Rückkühlung: Hybrid



B.5 Potential Erdwärmesonde

Free Cooling Potential

Rückkühlung: Erdwärmesonde / Schaltung I



B.6 Potential Grundwasseranbindung

Free Cooling Potential

Rückkühlung: Grundwasseranbindung / Schaltung I

