

Urbaner Kältebedarf Österreich 2030/2050

E4.1. Bericht Technologieanalyse und -bewertung

C. Rzhacek, T. Keller, B. Kling, M. Wolf, B. Beigelböck

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:

Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien

Leitung: DI (FH) Volker Schaffler, MA

Auszugsweise Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:

<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

Urbaner Kältebedarf Österreich 2030/2050

E4.1. Bericht Technologieanalyse und -bewertung

Constanze Rzhacek B.Sc., DI Thomas Keller,
DI Bernhard Kling B.Sc., DI Dr. Magdalena Wolf

Institut für Verfahrens- und Energietechnik (IVET)
Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien

DI Barbara Beigelböck

VASKO + Partner Ingenieure

Wien, Mai 2024

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

_Toc164673852

Vorbemerkungen zu den Kennzahlen	7
1 Vermeidung von Wärmeeinträgen in Innenräume	8
1.1 Verschattung	8
1.1.1 Beschreibung	8
1.1.2 Technologiespezifische Eigenschaften	10
1.1.3 Anwendung	11
1.1.4 Literaturhinweise	14
1.2 Kühle Hüllmaterialien.....	16
1.2.1 Beschreibung.....	16
1.2.2 Technologiespezifische Eigenschaften	16
1.2.3 Anwendung	18
1.2.4 Literaturhinweise	21
1.3 Sonnenschutzverglasung.....	22
1.3.1 Beschreibung.....	22
1.3.2 Technologiespezifische Eigenschaften	23
1.3.3 Anwendung	24
1.3.4 Literaturhinweise	26
1.4 Hinterlüftete Fassaden.....	27
1.4.1 Beschreibung.....	27
1.4.2 Technologiespezifische Eigenschaften	28
1.4.3 Anwendung	29
1.4.4 Literaturhinweise	30
1.5 Gebäudebegrünung	32
1.5.1 Beschreibung.....	32
1.5.2 Technologiespezifische Eigenschaften	33
1.5.3 Anwendung	34
1.5.4 Literaturhinweise	36
2 Komfortverbesserungen jenseits von physikalischem Wärmeentzug.....	38
2.1 Komfortlüftung und erhöhte Luftbewegung	38
2.1.1 Beschreibung.....	38
2.1.2 Technologiespezifische Eigenschaften	39
2.1.3 Anwendung	41
2.1.4 Literaturhinweise	44
2.2 Mikro Kühlung und individuelle Komfortregelung.....	45
2.2.1 Beschreibung.....	45
2.2.2 Technologiespezifische Eigenschaften	46
2.2.3 Anwendung	47
2.2.4 Literaturhinweise	48
3 Physikalischer Wärmeentzug aus Innenräumen.....	49

3.1	Lüftungskühlung.....	49
3.1.1	Beschreibung.....	49
3.1.2	Technologiespezifische Eigenschaften	50
3.1.3	Anwendung	51
3.1.4	Literaturhinweise	53
3.2	Verdunstungskühlung	54
3.2.1	Beschreibung.....	54
3.2.2	Technologiespezifische Eigenschaften	56
3.2.3	Anwendung	58
3.2.4	Literaturhinweise	60
3.3	Sky Radiative Cooling	61
3.3.1	Beschreibung.....	61
3.3.2	Technologiespezifische Eigenschaften	61
3.3.3	Anwendung	63
3.3.4	Literaturhinweise	64
3.4	Kompressionskältemaschinen.....	65
3.4.1	Beschreibung.....	65
3.4.2	Technologiespezifische Eigenschaften	67
3.4.3	Anwendung	73
3.4.4	Literaturhinweise	77
3.5	Adsorptionskältemaschinen.....	78
3.5.1	Beschreibung.....	78
3.5.2	Technologiespezifische Eigenschaften	79
3.5.3	Anwendung	80
3.5.4	Literaturhinweise	82
3.6	Absorptionskältemaschinen.....	83
3.6.1	Beschreibung.....	83
3.6.2	Technologiespezifische Eigenschaften	84
3.6.3	Anwendung	85
3.6.4	Literaturhinweise	86
3.7	Natürliche Wärmesenken	87
3.7.1	Beschreibung.....	87
3.7.2	Technologiespezifische Eigenschaften	89
3.7.3	Anwendung	91
3.7.4	Literaturhinweise	92
3.8	Kälteabgabesysteme	94
3.8.1	Lüftung	94
3.8.2	Direktverdampfer (Klimaanlage/VRF-Systeme)	97
3.8.3	Kühlkonvektoren/Induktionsgeräte	98
3.8.4	Gebälsekonvektoren (Fan Coil Units).....	99
3.8.5	Heizkörper	100
3.8.6	Passive Nutzung thermischer Masse.....	103
3.8.7	Strahlungskühlung und Bauteilaktivierung	106
3.9	Fernkälte	111

4 Entfeuchtung.....	112
4.1.1 Beschreibung.....	112
4.1.2 Technologiespezifische Eigenschaften	115
4.1.3 Anwendung	116
4.1.4 Literaturhinweise	117
5 Sicherheitsaspekte und Kältemittel	118
6 Übersichtstabellen zu den Kühltechnologien	120
7 Methoden zur Kennzahlberechnung	131
7.1 Technische Bewertung	131
7.1.1 IPSEpro Simulationen	131
7.1.2 IDA ICE Simulationen.....	138
7.2 Ökonomische Bewertung.....	142
7.2.1 Investitionskosten	142
7.2.2 Wartung und Betrieb.....	142
7.2.3 Stromkosten	142
7.3 Ökologische Bewertung	149
7.3.1 Emissionsfaktoren	149
8 Tabellenverzeichnis	157
9 Abbildungsverzeichnis	158
10 Literaturverzeichnis	161
11 Anhang.....	177
11.1 Datenblätter Kompressionskältemaschinen für IPSEpro-Simulationen	177
11.1.1 Panasonic.....	177
11.1.2 Heliotherm	177
11.1.3 Daikin.....	178
11.2 Kältemaschinenmodell in IPSEpro	178

Vorbemerkungen zu den Kennzahlen

Die im vorliegenden Bericht enthaltenen Technologieprofile umfassen neben einer Beschreibung der Funktionsweise der jeweiligen Kühltechnologie auch quantifizierte Kennzahlen.

- **Leistungsorientierte** Kennzahlen stammen aus der wissenschaftlichen Literatur oder – wo keine geeigneten allgemeingültigen Zahlen verfügbar waren – wo möglich aus eigenen Berechnungen des Projektteams. Grund hierfür sind die Bandbreite an Rahmenbedingungen, wie etwa die klimatischen Bedingungen sowie gebäudegeometrische und gebäudemorphologische Eigenschaften, die den Kältebedarf einerseits und die Leistungsfähigkeit verschiedener Kühlmaßnahmen andererseits bedingen. In diesen Fällen sind Aussagen über die Leistungsfähigkeit der betreffenden Kühlmaßnahme schwer zu machen, da kein Anspruch auf Allgemeingültigkeit gestellt werden kann. Die aus eigenen Berechnungen stammenden Ergebnisse können zumindest als Vergleich verschiedener Kühltechnologien an einem beispielhaften Gebäude mit bestimmten bekannten Eigenschaften dienen. Die Methoden zur technischen Kennzahlberechnung sind in Kapitel 6.1 erklärt.
- Die **kostenbezogenen** Kennzahlen umfassen – wo verfügbar – die Investitionskosten sowie die Wartungs- und Betriebskosten. Die Investitionskosten wurden, wo nicht anders angegeben, projektintern aus Erfahrungswerten (Stand Q1 2024, Großraum Wien) ermittelt. Diese dienen lediglich zur Orientierung und beziehen sich auf Standardfälle ohne schwierige Einbaubedingungen in größeren Projekten (Kostenbasis Gebäude, nicht Einzelwohnung). Die Kennzahlen zu den Wartungs- und Betriebskosten stammen aus einer Literaturrecherche. Stromkosten (sog. Kältegestehungskosten) wurden lediglich für eine beispielhafte Kompressionskälteanlage mit 50 kW Kälteleistung berechnet, wobei die hierfür angenommenen Strompreise aus einer umfassenden Recherche stammen. Die Stromkosten anderer Kühltechnologien wurden aufgrund des zu erwartenden deutlich geringeren Ausmaßes nicht quantifiziert. In Kapitel 6.2 werden die Methoden zur Kostenermittlung vorgestellt.
- Die **ökologischen** Auswirkungen der verschiedenen Kühlmaßnahmen umfassen nur jene, die am Einsatzort entstehen und wurden vorwiegend qualitativ bewertet. Treibhausgasemissionen wurden wieder nur für die beispielhafte Kompressionskälteanlage unter Betrachtung vier verschiedener Kältemittel (R717, R290, R600A, R1234ze(E)) mithilfe des Total Equivalent Warming Impacts (TEWI) berechnet. Dieser umfasst neben dem durch Kältemittelleckagen verursachten Treibhauseneffekt auch jenen durch den Stromkonsum der Anlage im Laufe ihrer Nutzungsdauer. Die Annahme für den Emissionsfaktor für Strom stammt ebenfalls aus einer umfassenden Recherche. Die Berechnung des TEWI kann Kapitel 6.3 entnommen werden.

Die quantifizierten Kennzahlen entsprechen dem aktuellen Stand der Forschung. Sie dienen zur Orientierung und können in der Realität von den angegebenen Werten abweichen.

1 Vermeidung von Wärmeeinträgen in Innenräume

1.1 Verschattung

Die Relevanz dieser Technologie zur Gebäudekühlung wird in Österreich als hoch eingeschätzt.

Dieses Technologieprofil basiert auf dem einschlägigen Profil 2.1 *Solar Shading Technologies* des IEA EBC Annex 80 Resilient Cooling Projekts (1).

1.1.1 Beschreibung

Die Sonneneinstrahlung, die durch durchsichtige und undurchsichtige Oberflächen der Gebäudehülle in die Innenräume eindringt, reduziert zwar im Winter den Heizwärmebedarf, beeinflusst aber in den Sommer- und Übergangsmonaten die Kühllast maßgeblich. Damit trägt die solare Einstrahlung stark zur Überhitzung der Innenräume bei. Sonnenschutzsysteme können die Überhitzung wirksam abmildern, indem sie die Menge der in das Gebäude einfallenden Sonnenstrahlung reduzieren. Beschattungssysteme reduzieren die Spitzen- und Durchschnittslasten und verringern so den Kühlbedarf im Gebäude. Durch die Senkung der Raumluft- und mittleren Strahlungstemperaturen verbessern Beschattungssysteme den thermischen Komfort für die Gebäudenutzer:innen, auch bei nicht aktiv gekühlten Gebäuden. Beschattungssysteme können nach verschiedenen Kriterien eingeteilt werden:

- Position des Beschattungssystems:
 - innenliegender Sonnenschutz
 - bei mehrfach verglasten Elementen zwischen den Glasscheiben
 - außenliegender Sonnenschutz

Die Wirksamkeit des Sonnenschutzes ist bei außenliegenden Beschattungssystemen am größten; innenliegende Jalousien sollten in erster Linie für Tageslicht- und als Blendschutz verwendet werden.

- Aktivierung des Beschattungssystems:
 - fest
 - verstellbar

Feste Beschattungssysteme sind außen angebracht und wirken sich stark auf das Erscheinungsbild des Gebäudes aus. Verstellbare Beschattungssysteme können in eine beliebige Position gebracht werden. Die Positionsänderung kann manuell oder automatisiert erfolgen und – was am wichtigsten ist – bei Bedarf aktiviert werden. Beispiele für feste und verstellbare Sonnenschutzsysteme sind in Abb. 1 dargestellt.

- Material, Struktur und Form des Beschattungssystems:
 - Material
 - Struktur und Form

In Bezug auf den Materialeinsatz für Beschattungssysteme gibt es zahlreiche Möglichkeiten in Abhängigkeit der Ästhetik des Gebäudes und den geplanten Kosten für das Sonnenschutzsystem. Häufig eingesetzte Materialien sind Aluminium, Kunststoffderivate, Naturfasern oder Holz. In Struktur und Form gibt es ebenfalls Unterschiede. So wird zwischen homogenen Systemen wie z.B. Vorhängen oder unterbrochenen Systemen wie z.B. Vorhänge oder Jalousien unterschieden.

Abb. 1: Die Holzlamellen auf der linken Abbildung können gekippt, aber nicht hochgezogen werden. Das Beschattungssystem prägt das Erscheinungsbild der Fassade; auf der rechten Abbildung sind voll bewegliche Beschattungssysteme in der Fensterebene integriert und können von den Nutzer:innen nach Bedarf verstellt werden. (2)



Die jüngsten Entwicklungen im Bereich der Beschattungssysteme verlaufen in zwei Hauptrichtungen. Die Erste ist die Integration von vollautomatischen Lösungen in intelligente Energiemanagementsysteme, um das maximale Potential der Technologien möglichst auszuschöpfen. Ziel ist es, mehrere Funktionen wie Sonnenschutz, Ausleuchtung mit Tageslicht und Sicht nach außen für die Nutzer:innen zu optimieren. Diese Anforderungen können durchaus miteinander in Konflikt stehen. Die zweite Schiene ist die Integration erneuerbarer Energiegewinnungssysteme, wie z.B. Photovoltaikmodule, in die Beschattungselemente.

Bei Auswahl und Betrieb des Sonnenschutzes muss stets ein ausgewogenes Verhältnis zwischen dem Tageslichtzugang für die Nutzer:innen, ihrem Bedürfnis nach visueller Interaktion mit der Außenumgebung und dem Sonnenschutz bestehen. Entscheidend für die richtige Auslegung solcher Systeme sind die klimatischen Bedingungen, der Standort des Gebäudes, die umliegenden Gebäude (Verschattung durch umgebende Objekte), die Ausrichtung der Fassade, die Eigenschaften der zu beschattenden transparenten Systeme und die Gebäudenutzung.

1.1.2 Technologiespezifische Eigenschaften

- **Gesamtenergiedurchlassgrad (auch: Solarfaktor, Solar Heat Gain Coefficient (SHGC), g_{tot}) [-]** (3). Dieser Wert gibt an, wie viel der solaren Energie über die Verglasung und das Beschattungssystem in den dahinterliegenden Raum gelangt. Ein niedriger Solarfaktor reduziert die solaren Gewinne, wodurch die Kühllast und das Überhitzungsrisiko verringert werden. Ein $g_{\text{tot}} < 0,15$ ermöglicht einen hohen thermischen Komfort und ein $g_{\text{tot}} < 0,1$ einen sehr hohen thermischen Komfort.
- **Abminderungsfaktor (F_c) [-]**. Der Abminderungsfaktor gibt an, wieviel Sonnenstrahlung durch den Sonnenschutz in den Innenraum eindringt. Je niedriger er ist, desto höher ist die Sonnenschutzwirkung der Verschattungsvorrichtung. Er wird mit dem g-Wert der Verglasung (s. Kapitel 1.3.2) multipliziert, um den Gesamtenergiedurchlassgrad g_{tot} zu berechnen. Die in den Produktdaten angegebenen F_c -Werte beziehen sich immer auf eine Referenzverglasung, häufig mit einem g-Wert von 0,59 und einem U_{Glas} -Wert von $1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ und gelten daher nur für die Kombination des jeweiligen Produkts mit einer der Referenzverglasung entsprechenden Verglasung. Beispielsweise bedeutet ein F_c -Wert von 0,26 für einen außenliegenden Rollladen, dass nur 26 % der auf die mit der Referenzverglasung bestückten Fensterfläche einfallenden Sonnenstrahlung durch den Rollladen durchgelassen werden. Für Rollläden kann generell ein F_c -Wert zwischen 0,1 und 0,3 angenommen werden. Für einen innenliegenden Sonnenschutz werden F_c -Werte zwischen 0,64 und 0,84 angegeben und für Markisen und Vordächer ein F_c -Wert von etwa 0,5. Aufgrund der beschränkten Aussagekraft des F_c -Werts vor allem für nicht der Referenzverglasung entsprechender Verglasungen setzt sich mittlerweile die Verwendung des g_{tot} immer mehr durch. (4) (5) (6)
- Die **Lichtdurchlässigkeit** bzw. **Tageslichtnutzung [-]** (3) (7) quantifiziert die Menge der sichtbaren Strahlung, die direkt von der Verglasung und dem Beschattungssystem durchgelassen wird. Eine hohe Lichtdurchlässigkeit erhöht die Verfügbarkeit von Tageslicht und verringert damit den Bedarf an künstlicher Beleuchtung und den damit verbundenen internen Wärmegewinnen. Eine Lichtdurchlässigkeit im Bereich von 0,25-0,40 ermöglicht einen hohen visuellen Komfort, über 0,40 einen sehr hohen visuellen Komfort, wobei der optimale Bereich für die Lichtdurchlässigkeit zwischen 0,35 und 0,65 liegt.

Sonnenschutzvorrichtungen werden abhängig von ihren Eigenschaften (g_{tot} , Tageslichtnutzung u.a.) in Leistungsklassen eingeteilt. Spezifikationen hierzu sind in der ÖNORM EN 14501:2021 enthalten. Die oben beispielhaft angegebenen Werte zum g_{tot} sowie zur Lichtdurchlässigkeit entsprechen jeweils den Werten der Leistungsklassen 3 und 4. (3)

Indikatoren für die Systemauslegung

- Window-to-wall ratio (WWR) [%] (8): Verhältnis zwischen der Fensterfläche und der Bruttoaußenwandfläche.
- Window-to-floor ratio (WFR) [%]: Verhältnis der Fensterfläche zur Nettogrundfläche.
- Globalstrahlung [W/m^2 oder $\text{kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$] (9) auf einer horizontalen Ebene und auf den Fassadenebenen während der Kühl-/Überhitzungsperiode. In diesem Zusammenhang ist auch die Albedo von Bedeutung. Die Albedo beschreibt den Anteil der globalen Sonneneinstrahlung, der vom Boden diffus reflektiert wird.
- Umgebung wie Vegetation und benachbarte Gebäude.

Diese Parameter sind von entscheidender Bedeutung, da die Kühllast durch die Größe der transparenten Teile der Gebäudehülle bestimmt wird, welche die Menge der einfallenden Sonnenstrahlung bedingen. Die Gestaltung der Fassade und die Abstimmung der lichtundurchlässigen und transparenten Bauteile hängt von der Gebäudenutzung, den Außenbedingungen und der Ausrichtung der Fassade ab.

1.1.3 Anwendung

Im Folgenden werden die Effekte des Sonnenschutzes mit Hinblick auf den Energiebedarf, die Außenbedingungen und Gebäudeausrichtung zusammengefasst. Die Investitionskosten von außenliegenden Sonnenschutzvorrichtungen belaufen sich auf etwa 660 €/m² und jene von innenliegenden Sonnenschutzsystemen auf etwa 250 €/m².

Wirkung im Gebäude

Feste und verstellbare Beschattungssysteme sorgen für eine erhebliche Verringerung der Kühllasten und des Spitzenbedarfs in gedämmten und ungedämmten Gebäuden. Durch die Reduktion der solaren Gewinne erhöhen sie die Widerstandsfähigkeit von Gebäuden gegenüber den langfristigen Auswirkungen des Klimawandels und verringern so deren Vulnerabilität in Hitzewellen. Verstellbare Beschattungsvorrichtungen sind zu bevorzugen, da sie im Sommer Sonnenschutz gewährleisten, ohne solare Gewinne im Winter zu vermindern.

Beschattungsvorrichtungen sollten so konzipiert sein, dass sie ein Gleichgewicht zwischen Sonnenschutz, natürlicher Beleuchtung und Sicht nach draußen herstellen. Verstellbare Lösungen können bei extremen Ereignissen wie Hitzewellen sehr wirksam sein.

Eine Simulationsstudie aus dem Jahr 2023 hat gezeigt, dass der Kältebedarf für Gebäudekühlung in Österreich im Jahr 2050 am effektivsten durch Verschattungsvorrichtungen – und zwar um etwa 40 – 45 % auf den österreichischen Gebäudebestand gerechnet – verringert werden kann (10).

Simulationsstudie Beispielgebäude

Zur weiteren Veranschaulichung der Wirkung verschiedener – vor allem sogenannter passiver – Kühltechnologien wurden vom Projektteam aufbauend auf den Ergebnissen und Modellen aus der Kältebedarfsberechnung für die Kältebedarfsmatrix Simulationsstudien mithilfe des Gebäudesimulationsprogrammes IDA ICE durchgeführt. Details zur Methodik der Simulationsstudien können dem Methodenteil (Kapitel 6.1.2) entnommen werden. Das verwendete Gebäudemodell enthält eine beispielhafte nach Südosten ausgerichtete Wohnung mit 140 m² Wohnnutzfläche im mittleren Geschoß (dem sog. Regelgeschoß) eines dreistöckigen Gebäudes. Der Fensteranteil an der Fassadenfläche beträgt 17 %, der U-Wert der Wand 1,5 W/(m²·K) und der U-Wert der Fenster 1,2 W/(m²·K). Der F_C-Wert der Verschattung liegt bei 0,26, der g-Wert der Verglasung beträgt 0,59 und der g_{tot} der Fenster folglich 0,15. In dem Gebäude wird außer der Nachtlüftung und der Verschattung keine andere Kühltechnologie angewendet. So konnte der jährliche Kältebedarf in diesem Gebäude gegenüber dem Baselineszenario, in dem lediglich eine Nachtlüftung implementiert ist, um etwa 34 % reduziert werden. Dies entspricht einem vermiedenen Wärmeeintrag von 4,6 kWh pro m² Wohnnutzfläche und Jahr für dieses Beispielgebäude.

Anwendung von Sonnenschutztechnologien bei unterschiedlichen Außenbedingungen

Sonnenschutzvorrichtungen sollten im Sommer und in der Übergangszeit aktiviert werden, um eine Überhitzung der Innenräume und einen hohen Kühlenergieverbrauch zu vermeiden. Verstellbare Systeme sollten bevorzugt werden, da sie bei klarem Himmel (hohe Einstrahlungswerte) zur Verminderung von Wärmeeinträgen und bei bewölktem Himmel (niedrige Einstrahlungswerte) zur Erhöhung der natürlichen Beleuchtung abhängig von den momentan vorherrschenden Wetterbedingungen eingestellt werden können.

Diese Flexibilität ist bei einer festen Beschattung nicht gegeben; zudem ist mit einer Beeinträchtigung der solaren Gewinne während der Heizperiode zu rechnen.

Gebäudeausrichtung

Die Gebäudeausrichtung spielt eine wichtige Rolle für die solaren Gewinne durch die transparenten Elemente der Gebäudehülle. Auf der Nordhalbkugel ist die Sonneneinstrahlung an der Nordfassade sehr gering, eine direkte Sonneneinstrahlung findet im Sommer nur in wenigen Stunden statt, ansonsten erfolgt eine diffuse Einstrahlung. Die Sonneneinstrahlung an Südfassaden ist im Sommer geringer als in den Übergangsmonaten, da die Sonne hoch am Himmelsgewölbe steht. Eine wirksame Gestaltung der Fassade (z.B. mit festen Elementen, Vorsprüngen etc.) kann im Sommer einen angemessenen Sonnenschutz bieten, während im Winter und in der Übergangszeit solare Gewinne genutzt werden. Ost- und Westfassaden sind der Sonneneinstrahlung im Sommer mit einer hohen Sonneneinstrahlungsrates über die Jahreszeit und den Tag hinweg am stärksten ausgesetzt. Hier sind verstellbare Beschattungsvorrichtungen sehr zu empfehlen, um den Energiebedarf und das Überhitzungsrisiko zu minimieren.

Kompatibilität und Inkompatibilität mit anderen Technologien

Beschattungsvorrichtungen sollten immer in Abstimmung mit den Eigenschaften des eingebauten Verglasungssystems entworfen und betrieben werden, wobei die Anforderungen an den

Sonnenschutz und die Verfügbarkeit von Tageslicht für die Nutzer:innen des Gebäudes einzuhalten sind (vgl. Arbeitsstättenverordnung). Die gleiche Überlegung gilt für die Anwendung von Beschattungsvorrichtungen in hinterlüfteten und Doppelfassaden.

Bei einfacher Fensterlüftung können sich innen- und außenliegende Verschattungsvorrichtungen negativ auf die Lüftungskühlung auswirken, da diese ein Hindernis für die natürliche Luftzirkulation darstellen.

Die Verwendung von kühlen Farben ist eine neue Entwicklung bei Vorhängen, die eine offensichtliche Synergie mit der Verwendung von kühlen Hüllmaterialien darstellt. Im Vergleich zu anderen Kühltechnologien und -strategien wie z.B. Kältemaschinen werden keine weiteren relevanten Inkompatibilitäten festgestellt.

Verfügbarkeit und zu erwartende Entwicklungen

Wie aus den nachstehenden Abbildungen hervorgeht, sind Sonnenschutzvorrichtungen weltweit in einem extrem breiten Kosten- und Leistungsspektrum erhältlich, wobei die Marktsegmente von internationalen Konzernen bis zu einzelnen Handwerkern reichen.

Abb. 2: Einzelne kostengünstige Außenjalousien in einem Gebäude des sozialen Wohnbaus in Rom, Italien (links) und die vollautomatische Beschattungsfassade am Hauptsitz einer Zeitung in Mailand, Italien (rechts). (2)



Bei den für Beschattungssysteme verwendeten Materialien liegt der derzeitige Fokus auf der Robustheit und der zu erwartende Lebensdauer, der Integration von Solarenergiesystemen (z. B. in Lamellen und Jalousien integrierte PV-Anlagen), sowie speziellen Oberflächenbehandlungen zur Verbesserung des Sonnenschutzes (Verwendung von kühlen, farbigen Materialien, retroreflektierenden Folien, selektiven Beschichtungen usw.). Außerdem werden innovative Lösungen für die optimale Einstellung des Winkels gesucht, um die Bedürfnisse nach Sonnenschutz und natürlichem Licht auszugleichen.

Von großem Interesse ist auch die Steuerung verstellbarer Beschattungssysteme, wobei die Steuerungsstrategien zur Optimierung der Energieeffizienz von Gebäuden aus einer ganzheitlichen Perspektive bzw. die Integration automatischer Vorrichtungen in Building Energy Management Systems (BEMS) im Vordergrund stehen, um die Komponenten der Gebäudehülle in Abstimmung mit dem Energiesystem und den überwachten Innen- und Außenbedingungen zu betreiben.

Vor- und Nachteile

- + passives System (auch ohne Antriebsenergie ausführbar)
- + gute Regelbarkeit bei verstellbaren Verschattungen
- + deutliche Reduktion der Kühllast in den Sommermonaten bei fachgerechter Nutzung
- + kein Zugluftrisiko
- + keine Lärmemissionen im Innen- oder Außenraum
- + keine Hitzeemissionen im Außenraum
- + keine Verwendung ökologisch bedenklicher Substanzen oder Materialien am Einsatzort
- + keine ökologisch nachteiligen Wirkungen am Einsatzort
- Nachrüstung mit teils hohen Kosten verbunden
- Nachrüstung muss von dem/der Gebäudeeigentümer:in genehmigt werden
- nicht überall anwendbar (vgl. DC-Tower)

1.1.4 Literaturhinweise

- Infobroschüre mit Hinweisen zur Berechnung des g_{tot} -Werts: Bundesverband Sonnenschutztechnik. Den Sonnenschutz richtig planen. Eine Information der Sonnenschutzindustrie zum Gesamtenergieeintrag von Fenstern in Kombination mit aussen- oder innenliegendem Sonnenschutz. 2020. http://bvst.at/images/pdfs/BVST_gtot_Broschuere_2020_web_2.pdf [23 Jänner 2024, 13:30h]
- Informationsmaterial zu den Wirkungen von Sonnenschutzvorrichtungen: Bundesverband Sonnenschutztechnik. Das kann Sonnenschutz. https://bvst.at/images/pdfs/BVST_Infobroschuere_web.pdf [26 Februar 2024, 8:45h]
- Technologieleitfaden für Sonnenschutzsysteme: Varga M. Technologieleitfaden Sonnenschutzsysteme. Wien: MA 27; 2010. https://bvst.at/itr-file/_1_/6f31f3dfa69ee04edfd9cdb420bbbc73/MA27_leitfaden_sonnenschutz_web.pdf [23 Jänner 2024, 10:30h]
- Demnächst veröffentlichter Ratgeber des BMK zu Kühlmaßnahmen mit Hinweisen zu Sonnenschutz: Holzer P, Wimmer F, Hackl LM, Peer T und Czarnecki P [unveröffentlicht]. Ratgeber klimaaktiv Kühlen. Empfehlungen für Wohnungen und Immobilien aller Art. Wien: BMK.
- Webseite und Informationsmaterial der European Solar Shading Organisation ES-SO unter <https://es-so.com/>
- Kapitel 2.1: “Advanced window/glazing and shading technologies” im Annex 80 State of the Art Review: Holzer P, Stern P, Akander J, Ai Z, Arens E, Arghand T, Attia S, Bogatu D-I, Breesch H, Cehlin M, Chiesa G, Chtioui F, Elnagar E, Hayati A, Heiselberg P, Javed S, Kazanci O, Kolokotroni M, Lemort V, Levinson R, Zinzi M. International Energy Agency EBC Annex 80 - Resilient Cooling of Buildings - State of the Art Review. 2022.
- Kapitel 4.1.1: “Advanced solar shading/advanced glazing technologies” im Reviewartikel über resiliente Kühlstrategien des Annex 80: Zhang C, Kazanci OB, Levinson R, Heiselberg P, Olesen BW, Chiesa G, Sodagar B, Ai Z, Selkowitz S, Zinzi M, Mahdavi A, Teufl H, Kolokotroni M, Salvati A, Bozonnet E, Chtioui F, Salagnac P, Rahif R, Attia S, Lemort V, Elnagar E, Breesch H, Sengupta A, Wang LL, Qi D, Stern P, Yoon N, Bogatu D-I, Rupp RF, Arghand T, Javed S, Akander J, Hayati A, Cehlin M, Sayadi S, Forghani S, Zhang H, Arens E, Zhang G. Resilient

cooling strategies – A critical review and qualitative assessment. Energy and Buildings. 2021; 251: 111312. doi:10.1016/j.enbuild.2021.111312

1.2 Kühle Hüllmaterialien

Die Relevanz dieser Technologie zur Gebäudekühlung wird in Österreich als niedrig eingeschätzt.

Dieses Technologieprofil basiert auf dem einschlägigen Profil 2.2 *Cool Envelope Materials* des IEA EBC Annex 80 Resilient Cooling Projekts (1).

1.2.1 Beschreibung

Kühle Hüllmaterialien (Cool Envelope Materials, CEM) sind Dach- oder Außenwandmaterialien, die aufgrund ihres hohen Sonnenreflexionsgrades und hohen Wärmeabstrahlung kühler sind als herkömmliche Dächer oder Wände.¹ Gängige Beispiele sind weiße Dachbahnen, Dachziegel oder Außenwandfarben mit hohem Reflexionspotential durch Verwendung von speziellen Farben („cool colored“).

Kühle Dächer und Wände reduzieren den Strahlungswärmegewinn durch undurchsichtige Gebäudeteile, was in einem klimatisierten Raum Energie spart oder die Temperatur in einem nicht klimatisierten Gebäude senkt. Bei kaltem Wetter kann das auch zu einer Erhöhung des Heizenergiebedarf führen; bei heißen Sommern übersteigen die jährlichen Einsparungen an Kühlenergie in der Regel den jährlichen Mehrbedarf an Heizenergie. Die jährlichen Energieeinsparungen für Heizung, Lüftung und Klimaanlage (HLK) sind bei älteren Gebäuden in Klimazonen mit heißen Sommern und milden oder warmen Wintern am größten. Als passive Kühlungsstrategie erhöhen kühle Hüllmaterialien die Widerstandsfähigkeit gegenüber extremen Hitzeperioden in allen Klimazonen, insbesondere wenn Hitzewellen mit Stromausfällen zusammenfallen.

Kühle Dächer und Wände vermindern auch den städtischen Wärmeinseleffekt, verlangsamen temperaturbedingte Smogbildung und sorgen für eine globale Abkühlung ("negativer Strahlungsantrieb"), indem sie das Sonnenlicht aus dem Erdsystem durch Reflexion abstrahlen.

1.2.2 Technologiespezifische Eigenschaften

Die wichtigsten technischen Eigenschaften eines CEM sind der anfängliche und der fortbestehende Wert der Sonnenreflexion, der Wärmeabstrahlung und – für Dächer – des Sonnenreflexionsindex sowie die Farbveränderung. Andere technische Eigenschaften, die für spezielle CEMs mit eingeschränkter kommerzieller Verfügbarkeit relevant sind, umfassen das Abstrahlvermögen durch Fluoreszenz, die richtungsabhängige Sonnenreflexion und die selektive Wärmeabstrahlung; Erörterungen dazu siehe Abschnitt 2.2 in (11). Im Vergleich zu Sky Radiative Cooling (Kapitel 2.3) beruht das Funktionsprinzip von kühlen Hüllmaterialien auch auf dem hohen Reflexionsgrad kurzwelliger Strahlung (Albedo, s. u.) und nicht nur dem hohen thermischen Emissionsvermögen langwelliger Strahlung des Materials.

¹ Genauer gesagt ist ein kühles Hüllmaterial eine sonnenundurchlässige Oberfläche, deren Nettowärmegewinn, gleich [absorbierte Sonnenstrahlung minus emittierte kurzwellige Strahlung (Fluoreszenz)] plus [absorbierte thermische Infrarotstrahlung minus emittierte thermische Infrarotstrahlung], geringer ist als bei einem herkömmlichen Hüllmaterial. Andere Strategien zur Verringerung des Wärmegewinns an oder durch die Gebäudehülle, wie z. B. Sonnenschutzverglasung, Verdunstungskühlung, Belüftung oder Isolierung, fallen nicht in den Bereich der kühlen Hüllmaterialien.

- Der **solare Reflexionsgrad** (α) [-] ist das "solare Reflexionsvermögen" oder auch "Albedo", wird auf einer Skala von 0 - 1 (oder 0 - 100 %) ausgedrückt und ist der Anteil des einfallenden Sonnenlichts (Sonnenstrahlung), der reflektiert wird. Ein höherer Reflexionsgrad verringert den solaren Wärmegewinn. Die meisten herkömmlichen dunklen Oberflächen haben einen niedrigen (etwa 0,05 - 0,30) und die meisten hellen Oberflächen einen hohen Sonnenreflexionsgrad (etwa 0,60 - 0,95). Ein hoher Sonnenreflexionsgrad ist das entscheidende Merkmal eines kühlen Hüllmaterials.
- Der **Emissionsgrad** (ϵ) [-] oder das "thermische Emissionsvermögen" ist der Anteil der thermischen Infrarotstrahlung, die eine Oberfläche mit einer Temperatur von etwa 300 K (27 °C) gegenüber einem schwarzen Körper (perfekter Absorber und Strahler) mit derselben Temperatur abgibt und wird auf einer Skala von 0 - 1 (oder 0 - 100 %) ausgedrückt. Ein hoher Emissionsgrad hat einen Kühleffekt, da mehr Strahlung an eine kühlere Umgebung (wie etwa der Himmel) abgegeben wird. Dach- oder Wandmaterialien mit blanker, glänzender Metalloberfläche haben einen niedrigen Emissionsgrad (ca. 0,05 - 0,10), während andere gängige Materialien² einen hohen Emissionsgrad haben (ca. 0,80 - 0,95).

Natürliche Verschmutzungs- und Verwitterungsprozesse wie die Ablagerung von Ruß, mikrobiologisches Wachstum und Regenfälle können die Sonnenreflexion und die Wärmeabstrahlung im Laufe der Zeit verändern. Langfristig stellt sich ein Gleichgewicht ein zwischen verschmutzenden Vorgängen, wie z. B. Ablagerungen, und reinigenden Vorgängen, wie z. B. Regen. Da die Sonnenreflexion und die Wärmeabstrahlung einer Außenfläche in der Regel innerhalb von ein bis drei Jahren konstante Werte erreichen, werden die Sonnenreflexion und die Wärmeabstrahlung von Dach- und Wandmaterialien vor und nach drei Jahren natürlicher Exposition gemessen. Ein ursprünglich strahlend weißes Dach, das im sauberen Zustand 80 % des Sonnenlichts reflektiert, reflektiert nach mehreren Jahren der Verschmutzung und Verwitterung im Freien möglicherweise nur noch 60 % des Sonnenlichts. Die Produktbewertungen von Bedeckungen und Anstrichen für Dächer und Wände, die vom "Cool Roof Rating Council" (12) zur Verfügung gestellt werden, geben die Werte für Sonnenreflexion und Wärmeabstrahlung sowohl für den anfänglichen Zustand als auch für jenen nach drei Jahren an.³

Die Reflexion des sichtbaren Lichts bestimmt die Farbe. Die Farbe allein wird nicht zur Vorhersage der Leistung eines kühlen Hüllmaterials herangezogen, aber sie ist ein wichtiger Gesichtspunkt für die Verbraucher und damit für die Hersteller. Etwas weniger als die Hälfte des Sonnenlichts ist für das menschliche Auge sichtbar. Die meisten hellen Materialien reflektieren sowohl das sichtbare Licht (Spektrum 0,4 - 0,7 μm , ca. 45 % der einfallenden Sonnenenergie) als auch das Licht im nahen Infrarotbereich (Spektrum 0,7 - 2,5 μm , ca. 50 % der einfallenden Sonnenenergie) stark; nur wenige Oberflächen außer blanken, glänzenden Metallen und seltenen "ultraweißen" Materialien reflektieren die ultraviolette Komponente des Sonnenlichts (Spektrum 0,3 - 0,4 μm , ca. 5 % der einfallenden Sonnenenergie). Dunklere, "kühl gefärbte" Oberflächen, die in jeder Farbe erhältlich sind, können jedoch einen mittleren Sonnenreflexionsgrad (etwa 0,30 - 0,60) aufweisen, indem sie selektiv Nahinfrarotlicht reflektieren. So reflektieren z. B. kühl gefärbte Dachziegel aus natürlichem rotem Ton etwa 20 % des

² Eine Polymer- oder Bitumen- Beschichtung mit Metallplättchen kann einen mittleren Emissionsgrad von etwa 0,50 aufweisen.

³ Alle 3-Jahres-Werte im CRRC-Wandprodukteverzeichnis sind im Jahr 2023 noch ausständig, da der Start des CRRC-Wandbewertungsprogramms weniger als 3 Jahre zurückliegt.

sichtbaren Sonnenlichts und 60 % des Sonnenlichts im nahen Infrarot, was einen Reflexionsgrad von etwa 0,40 ergibt.

Am Dach können kühle Hüllmaterialien Kühlleistungen zwischen 40 und 100 W/m² erreichen (13).

1.2.3 Anwendung

Die Investitionskosten von Fassadenanstrichen inkl. Gerüst belaufen sich auf etwa 35-50 €/m².

Wirkung im Gebäude

Kühle Dächer und Wände reduzieren den Strahlungswärmegewinn an der undurchsichtigen Gebäudehülle, um den Wärmefluss in den klimatisierten Raum zu verringern und so Energie in einem klimatisierten Raum zu sparen oder die Temperatur in einem ungekühlten Gebäude zu senken. Sie mindern auch den städtischen Wärmeinseleffekt, verlangsamen die temperaturbedingte Smogbildung und sorgen für eine globale Abkühlung (negativer Strahlungsantrieb), indem sie das Sonnenlicht aus dem Erdsystem reflektieren.

Ein höherer solarer Reflexionsgrad verringert die benötigte Kühlenergie, erhöht hingegen jedoch auch die benötigte Heizenergie. Je stärker dabei grundsätzlich die Sonneneinstrahlung, desto größer ist dieser Effekt. Wärmedämmung hingegen verringert die Effektivität von kühlen Hüllmaterialien, da die Dämmschicht tagsüber bereits einen Teil der durch solare Einstrahlung eindringenden Wärme abfängt und andererseits einen eventuellen Wärmestrom von innen nach außen (z. B. in der Nacht, wenn die Außentemperatur niedriger ist) abschwächt und somit die Abstrahlung reduziert.

Simulationsstudie Beispielgebäude

Zur weiteren Veranschaulichung der Wirkung verschiedener – vor allem sogenannter passiver – Kühltechnologien wurden vom Projektteam aufbauend auf den Ergebnissen und Modellen aus der Kältebedarfsberechnung für die Kältebedarfsmatrix Simulationsstudien mithilfe des Gebäudesimulationsprogrammes IDA ICE durchgeführt. Details zur Methodik der Simulationsstudien können Methodenteil (Kapitel 6.1.2) entnommen werden. Das verwendete Gebäudemodell enthält eine beispielhafte nach Südosten ausgerichtete Wohnung mit 140 m² Wohnnutzfläche im mittleren Geschoß (dem sog. Regelgeschoß) eines dreistöckigen Gebäudes. Der Fensteranteil an der Fassadenfläche beträgt 17 %, der U-Wert der Wand 1,5 W/(m²·K) und der U-Wert der Fenster 1,2 W/(m²·K). Der g-Wert der Verglasung beträgt 0,59 und der g_{tot} der Fenster ohne Verschattung (F_c = 1) folglich auch 0,59. Der Emissionsgrad der Außenwand beträgt 0,9. In dem Gebäude wird außer Nachtlüftung und einem kühlenden Fassadenanstrich keine andere Kühltechnologie angewendet. Gegenüber dem Baselineszenario, in dem lediglich die Nachtlüftung implementiert ist und in dem die Albedo der Außenwand 0,5 beträgt, konnte der jährliche Kältebedarf in diesem Gebäude bei einem Anstrich mit einer Albedo von 0,6 um etwa 11 % und bei einem Anstrich mit einer Albedo von 0,7 um 21 % reduziert werden. Dies entspricht einem vermiedenen Wärmeeintrag von etwa 1,5 bzw. 3 kWh pro m² Wohnnutzfläche und Jahr für dieses Beispielgebäude. Zwei wesentliche Einflussfaktoren auf die Wirksamkeit von kühlen Fassadenanstrichen sind der U-Wert der Außenwand sowie der Fensteranteil an der Fassadenfläche. Sinkt der U-Wert der Außenwand oder steigt der Fensteranteil, verringert sich die Wirkung des kühlenden Fassadenanstrichs. Bei einem U-Wert der Außenwand von 0,2 W/(m²·K) bringt ein Fassadenanstrich mit einer Albedo von 0,7 eine Reduktion des jährlichen Kältebedarfs von 4 % und bei einem Fensteranteil an der Fassadenfläche von 50 % eine Reduktion von etwa 8 %. Dies entspricht einem vermiedenen Wärmeeintrag von etwa 0,5 bzw. 2,6 kWh pro m² Wohnnutzfläche und Jahr für dieses Beispielgebäude.

Varianten

Kühle Optionen sind für praktisch alle weit verbreiteten Arten von Dach- und Wandmaterialien im Handel erhältlich, einschließlich, aber nicht beschränkt auf Glasfaser-Asphaltdachschindeln, Ton- und Betondachziegel, Schieferdachziegel, Metaldächer, elastomere Dachbeschichtungen, Holzdachschindeln und einlagige Dachbahnen (Abb. 3) sowie gestrichene Wände, verputzte Wände, PVC-Verkleidungen und Metallverkleidungen (Abb. 4).

Abb. 3: Beispiele für gängige Dacheindeckungsmaterialien (obere Reihe, von links nach rechts: Glasfaser-Bitumenschindel (14), Tonziegel (15), Schiefer (16), Stehfalzmetall (1), untere Reihe, von links nach rechts: vor Ort aufgetragene Beschichtung (17), Holzschindeln (1), einlagige Membran (18), Bitumenbahn (19)).



Abb. 4: Beispiele für gängige Außenwandmaterialien (von links nach rechts: gestrichene Wand (20), verputzte Wand (21), PVC-Verkleidung (22), Metallverkleidung (1)).



Die Größte Wirkung zeigen kühle Dächer und Wände in schlecht isolierten Gebäuden. Dabei handelt es sich in der Regel um ältere Gebäude, die häufig (aber nicht ausschließlich) in Gemeinden mit niedrigem bis mittlerem Einkommen zu finden sind.

Auf kühle Wände trifft etwa halb so viel Sonnenlicht pro Flächeneinheit wie auf kühle Dächer; da aber Wände in der Regel nur etwa halb so gut isoliert sind wie Dächer, ist die Wirkung von kühlen Wänden mit jenen von kühlen Dächern vergleichbar.

Dächer werden in der Regel nach etwa 20 Jahren neu gedeckt, und Außenwände werden in der Regel etwa alle 10 Jahren neu gestrichen. Da Dach- oder Wandmaterialien mit verbesserter Sonnenreflexion meistens nicht teurer sind, ist der wirtschaftlichste Zeitpunkt für die Umsetzung eines kühlen Daches oder einer kühlen Wand beim Bau des Gebäudes oder im Zuge von Sanierungsmaßnahmen der Gebäudehülle.

Vor- und Nachteile

- + passives System
- + kein zusätzlicher Platzbedarf
- + kostengünstige Maßnahme auch für Bestandsgebäude

- + kann Wärmeinseln vorbeugen
- + bei Renovierungen leicht anwendbar
- + kein Zugluftrisiko
- + keine Lärmemissionen im Innen- oder Außenraum
- + keine Hitzeemissionen im Außenraum
- + keine Verwendung ökologisch bedenklicher Substanzen oder Materialien am Einsatzort
- + keine ökologisch nachteiligen Wirkungen am Einsatzort
- Verschmutzung und Umwelteinflüsse können Effektivität reduzieren

1.2.4 Literaturhinweise

- Demnächst veröffentlichter Ratgeber des BMK zu Kühlmaßnahmen mit Hinweisen zu kühlen Oberflächen: Holzer P, Wimmer F, Hackl LM, Peer T und Czarnecki P [unveröffentlicht]. Ratgeber klimaaktiv Kühlen. Empfehlungen für Wohnungen und Immobilien aller Art. Wien: BMK.
- Kapitel 2.2: „Cool Envelope Materials“ im Annex 80 State of the Art Review: Holzer P, Stern P, Akander J, Ai Z, Arens E, Arghand T, Attia S, Bogatu D-I, Breesch H, Cehlin M, Chiesa G, Chtioui F, Elnagar E, Hayati A, Heiselberg P, Javed S, Kazanci O, Kolokotroni M, Lemort V, Levinson R, Zinzi M. International Energy Agency EBC Annex 80 - Resilient Cooling of Buildings - State of the Art Review. 2022.
- Kapitel 4.1.2: „Cool Envelope Materials“ im Reviewartikel über resiliente Kühlstrategien des Annex 80: Zhang C, Kazanci OB, Levinson R, Heiselberg P, Olesen BW, Chiesa G, Sodagar B, Ai Z, Selkowitz S, Zinzi M, Mahdavi A, Teufl H, Kolokotroni M, Salvati A, Bozonnet E, Chtioui F, Salagnac P, Rahif R, Attia S, Lemort V, Elnagar E, Breesch H, Sengupta A, Wang LL, Qi D, Stern P, Yoon N, Bogatu D-I, Rupp RF, Arghand T, Javed S, Akander J, Hayati A, Cehlin M, Sayadi S, Forghani S, Zhang H, Arens E, Zhang G. Resilient cooling strategies – A critical review and qualitative assessment. Energy and Buildings. 2021; 251: 111312. doi:10.1016/j.enbuild.2021.111312
- Ratgeber zu kühlen Hüllmaterialien: Global Cool Cities Alliance. A Practical Guide to Cool Roofs and Cool Pavements. 2012. https://www.coolrooftoolkit.org/wp-content/pdfs/Cool-RoofToolkit_Full.pdf [20 September 2023]
- Informationsmaterial und Produktbewertungen des Cool Roof Rating Council unter <http://coolroofs.org/>

1.3 Sonnenschutzverglasung

Die Relevanz dieser Technologie zur Gebäudekühlung wird in Österreich als mittel eingeschätzt.

Dieses Technologieprofil basiert auf dem einschlägigen Profil 2.3 *Glazing Technologies* des IEA EBC Annex 80 Resilient Cooling Projekts (1).

1.3.1 Beschreibung

Verglasungen sind wichtige Gebäudekomponenten, die den Blick nach außen ermöglichen und gleichzeitig den Eintritt von Licht, Wärme und Luft steuern. Obwohl Verglasungen in der Regel nur einen kleinen Teil der gesamten Gebäudehülle ausmachen, kann ihr Einfluss auf den Kühlenergieverbrauch, die Spitzenkühllasten und den Komfort der Nutzer:innen erheblich sein. Moderne Sonnenschutzverglasungen sind so konzipiert, dass sie die Wärmeübertragung in Innenräume begrenzen und gleichzeitig den Zugang zu natürlichem Tageslicht optimieren, indem die verwendeten Materialien die Sonnenstrahlung absorbieren, durchlassen oder reflektieren.

Sonnenschutzverglasungen werden als statisch oder dynamisch klassifiziert. Statische Verglasungen mit ihren vorgegebenen optischen und thermischen Eigenschaften können sich nicht an veränderte Umweltbedingungen anpassen, während dynamische Verglasungstechnologien wie optisch schaltbare (oder intelligente) Fenster ihre Eigenschaften verändern können, vgl. Abb. 5. Diese Veränderung kann auf unterschiedliche Weise erfolgen, z. B. durch veränderte Umweltbedingungen oder durch aktive Steuerung (23). Bestimmte dynamische Technologien ermöglichen eine unabhängige Anpassung der Lichtdurchlässigkeit im sichtbaren und nahen Infrarotbereich (24).

Der Einsatz moderner Verglasungstechnologien kann entscheidend dazu beitragen, den Kühlenergiebedarf eines Gebäudes zu senken und den Komfort in den Innenräumen zu erhöhen. Das Ausmaß dieser Beiträge hängt von den Eigenschaften der Technologie, dem Außenklima, Gebäudetyp und der Ausrichtung, den Beschattungsvorrichtungen, internen Wärmegewinnen und dem Nutzer:innenverhalten ab. Statische Verglasungen, die aus Kostengründen viel häufiger zum Einsatz kommen, haben den Nachteil, dass sie im Winter solare Wärmegewinne reduzieren und auch die optischen Eigenschaften (bläuliche Färbung des Glases) als unangenehm empfunden werden können.

Abb. 5: Die Glaskuppel am österreichischen Parlament ist aus witterungsabhängig abdunkelndem Sonnenschutzglas gefertigt. (25)



1.3.2 Technologiespezifische Eigenschaften

- **Gesamtenergiedurchlassgrad (Solarfaktor, g-Wert) [-]** der Verglasung. Der gesamte durchgelassene Anteil der einfallenden Sonnenstrahlung besteht aus der direkt durchgelassenen Sonnenstrahlung und dem Teil der absorbierten Sonnenstrahlung, der durch Konvektion und Wärmestrahlung an die innere Umgebung abgegeben wird (7). Er ist trotz der ähnlichen Bezeichnungsmöglichkeiten nicht mit dem g_{tot} von Verschattungs- und Verglasungskombinationen zu verwechseln (s. Kapitel 1.1.2).
Ein niedriger g-Wert verringert die solaren Gewinne und damit die Kühllast sowie die Überhitzungszeit. Sonnenschutzverglasungen haben einen g-Wert von weniger als 0,5 (26), wobei viele Produkte mittlerweile Werte von weniger als 0,35 haben.
- Die **Lichtdurchlässigkeit [-]** (7) quantifiziert die Menge der sichtbaren Strahlung, die direkt von der Verglasung und dem Beschattungssystem durchgelassen wird. Eine hohe Lichtdurchlässigkeit erhöht die Verfügbarkeit von Tageslicht und verringert so den Einsatz von künstlicher Beleuchtung und damit verbundene interne Lasten. Es ist zu bedenken, dass Sonnenschutzgläser mit einer niedrigeren Lichtdurchlässigkeit je nach Modell optisch bläulicher sein können, was zu Beeinträchtigungen des Komfortempfindens im Innenraum führen kann. Der optimale Bereich für die Lichtdurchlässigkeit liegt zwischen 0,35 und 0,65.
- **Wärmedurchgangskoeffizient (U_{Glas} oder U_{Fenster}) [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$] (27)**. Die Wärmestromdichte pro Kelvin Temperaturdifferenz zwischen den Umgebungstemperaturen auf beiden Seiten, die den Wärmedurchgang durch den zentralen Teil der Verglasung, d. h. ohne Randeffekte, charakterisiert (U_{Glas}). Bei Einbeziehung der thermischen Eigenschaften des Fensterrahmens ergibt sich der U_{Fenster} .
Ein niedriger Wärmedurchgangskoeffizient verringert den Wärmedurchgang durch die Verglasung und senkt damit den Energiebedarf für Heizung und Kühlung.

Indikatoren für die Systemauslegung

- Window-to-wall ratio (WWR) [-] (8): Verhältnis zwischen der Fensterfläche und der Bruttoaußenwandfläche.
- Window-to-floor ratio (WFR) [-]: Verhältnis der Fensterfläche zur Nettogrundfläche.
- Globalstrahlung [W/m^2 oder $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$] (9) auf einer horizontalen Ebene und auf den Fassadenebenen während der Kühl-/Überhitzungsperiode. In diesem Zusammenhang ist auch die Albedo von Bedeutung. Die Albedo beschreibt den Anteil der globalen Sonneneinstrahlung, der vom Boden diffus reflektiert wird.
- Umgebung wie Vegetation und benachbarte Gebäude.

Diese Parameter sind von entscheidender Bedeutung, da die Kühllast durch die Größe der transparenten Teile der Gebäudehülle bestimmt wird, welche die Menge der einfallenden Sonnenstrahlung bedingen. Die Gestaltung der Fassade und die Abstimmung der lichtundurchlässigen und transparenten Bauteile hängt von der Gebäudenutzung, den Außenbedingungen und der Ausrichtung der Fassade ab.

1.3.3 Anwendung

Die Investitionskosten von Sonnenschutzverglasungen inklusive Demontage vorhandener Verglasung und Montage neuer Verglasung belaufen sich auf etwa 750 €/m².

Wirkung im Gebäude

Statische und dynamische Sonnenschutzverglasungen ermöglichen insbesondere bei ungedämmten Gebäuden eine Verringerung der Kühllast. Als passives System vermindern sie so das Überhitzungsrisiko. Allerdings ist darauf zu achten, dass statische Sonnenschutzgläser auch im Winter solare Erträge reduzieren, wodurch die Heizlast steigt.

Dynamische Sonnenschutzverglasungen können passiv durch Temperaturänderungen (thermochrom) oder Sonneneinstrahlung (photochrom), oder aber aktiv durch das Anlegen einer elektrischen Spannung (elektrochrom) aktiviert werden. Diese können sich bis zu einem Sonnenschutzfaktor von 0,15 oder niedriger abdunkeln und bieten so eine Lösung für die Beherrschung des Überhitzungsrisikos, insbesondere während Hitzewellen. Die 2020 fertiggestellte Glaskuppel am Dach des österreichischen Parlaments beispielsweise besteht aus elektrochrom gesteuertem Sonnenschutzglas, dessen g-Wert zwischen 0,08 und 0,32 variiert (28).

Sonnenschutzverglasungen können unabhängig von der Art des Gebäudes eingesetzt werden.

Simulationsstudie Beispielgebäude

Zur weiteren Veranschaulichung der Wirkung verschiedener – vor allem sogenannter passiver – Kühltechnologien wurden vom Projektteam aufbauend auf den Ergebnissen und Modellen aus der Kältebedarfsberechnung für die Kältebedarfsmatrix Simulationsstudien mithilfe des Gebäudesimulationsprogrammes IDA ICE durchgeführt. Details zur Methodik der Simulationsstudien können dem Methodenteil (Kapitel 6.1.2) entnommen werden. Das verwendete Gebäudemodell enthält eine beispielhafte nach Südosten ausgerichtete Wohnung mit 140 m² Wohnnutzfläche im mittleren Geschoß (dem sog. Regelgeschoß) eines dreistöckigen Gebäudes. Der Fensteranteil an der Fassadenfläche beträgt 17 % und der U-Wert der Wand 1,5 W/(m²·K). In dem Gebäude wird außer Nachtlüftung und der Sonnenschutzverglasung keine andere Kühltechnologie angewendet. So konnte der jährliche Kältebedarf in diesem Gebäude gegenüber dem Baselineszenario, in dem lediglich die Nachtlüftung implementiert ist und in dem der g-Wert der Verglasung 0,59 und der U-Wert des Fensters 1,2 W/(m²·K) beträgt, bei Einsetzen einer Verglasung mit einem g-Wert von 0,42 (U-Wert Fenster = 1,3 W/(m²·K)) um etwa 20 % reduziert werden. Wird ein Sonnenschutzglas mit einem g-Wert von 0,33 (U-Wert Fenster = 1 W/(m²·K)) gewählt, reduziert sich der jährliche Kältebedarf um 28 %. Dies entspricht einem vermiedenen Wärmeeintrag von 2,7 bzw. 3,8 kWh pro m² Wohnnutzfläche und Jahr für dieses Beispielgebäude.

Anwendung und klimatische Bedingungen

In gemäßigten Klimazonen wie Österreich ist für dynamische Sonnenschutzverglasungen ein niedriger Gesamtenergiedurchlassgrad in Erwägung zu ziehen, um den solaren Wärmegewinn zu minimieren und das Risiko einer Überhitzung zu vermeiden. Die allerdings viel häufiger zum Einsatz kommenden kostengünstigeren statischen Sonnenschutzverglasungen haben den Nachteil, dass sie auch im

Winter solare Wärmegewinne vermindern. Es sollte daher zuerst ein verstellbarer Sonnenschutz in Erwägung gezogen werden, da dieser bei Bedarf geschlossen werden kann. Sonnenschutzverglasungen können insbesondere etwa in Gebäuden mit denkmalgeschützten Fassaden sinnvoll eingesetzt werden.

Unabhängig vom Klima ist es wichtig, dass die Verglasung eine erhöhte Lichtdurchlässigkeit im sichtbaren Spektrum aufweist und gleichzeitig die Sonnendurchlässigkeit im Infrarotbereich reduziert.

Gebäudeausrichtung

Das Profil der Sonneneinstrahlung im Sommer und im Winter ist je nach Breitengrad und Außenklima unterschiedlich. Für kalte Klimazonen werden Gebäudeausrichtungen empfohlen, die die verglasten Flächen einer höheren Sonneneinstrahlung aussetzen. In gemäßigten und heißen Klimazonen hingegen sollte diese Exposition entweder durch einen niedrigeren Gesamtenergiedurchlassgrad oder durch die Verwendung von Sonnenschutzvorrichtungen minimiert werden.

Kompatibilität und Inkompatibilität mit anderen Technologien

Die Untersuchung der Kombination von modernen Verglasungen mit verschiedenen Kühlsystemen ist von entscheidender Bedeutung. Sonnenschutzvorrichtungen, insbesondere wenn sie verstellbar oder automatisiert steuerbar sind, können den solaren Wärmegewinn stark minimieren und die Abhängigkeit der Verglasung von der Ausrichtung verringern. Darüber hinaus muss die Kombination von Kühlmethoden in Betracht gezogen werden, die überschüssige Wärme effizient reduzieren können, wie z. B. Lüftungskühlung oder Verdunstungskühlung. So kann beispielsweise laut einer Simulationsstudie für ein Niedrigstenergiehaus die Verwendung von thermochromen Verglasungen in Verbindung mit indirekter Verdunstungskühlung die Innentemperatur um bis zu 15 °C unter der Außentemperatur halten (29).

Verfügbarkeit und zu erwartende Entwicklungen

Spektralselektive statische Verglasungen und hochisolierende Verglasungen sind weit verbreitet. Ihre Kosten reichen von niedrig bis moderat. Aktive und passive dynamische Verglasungen sind weltweit nur von einigen wenigen Unternehmen erhältlich, und die Kosten sind höher. Auf den derzeitigen Märkten und in der Forschung und Entwicklung sind in drei wesentlichen Bereichen bedeutende Durchbrüche zu verzeichnen: die Entwicklung neuer Materialien und Beschichtungen, die zu geringeren Kosten hergestellt werden können, schnellere Schaltmöglichkeiten und die Verbesserung der Haltbarkeit der Produkte. Obwohl auch passive intelligente (reaktionsfähige) Beschichtungen weiterentwickelt werden, konzentrieren sich die meisten laufenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten aufgrund des höheren erwarteten Nutzens auf aktive Verglasungssysteme. Die Integration von Steuerungssystemen aktiver dynamischer Verglasungen in Gebäudesteuerungssysteme ist von entscheidender Bedeutung für die Förderung von Komfort und Energieeffizienz und gleichzeitig für eine höhere Marktakzeptanz.

Vor- und Nachteile

- + passives System
- + kein zusätzlicher Platzbedarf
- + kein Zugluftrisiko
- + keine Lärmemissionen im Innen- oder Außenraum
- + keine Hitzeemissionen im Außenraum
- + keine Verwendung ökologisch bedenklicher Substanzen oder Materialien am Einsatzort
- + keine ökologisch nachteiligen Wirkungen am Einsatzort

- schlechtere Nutzung solarer Gewinne bei Sonnenschutzverglasungen ohne witterungsabhängige Anpassung des g-Wert im Winter
- geringe bis gar keine Regelbarkeit zwischen Verringerung der sommerlichen Kühllast und Erhöhung der winterlichen Heizlast
- Möglichkeit der Beeinträchtigung des Komforts durch stärkere Glasfärbung bzw. veränderte Farbwiedergabe bei starken Sonnenschutzgläsern

1.3.4 Literaturhinweise

- Technologieleitfaden für Sonnenschutzsysteme mit Informationen zu Sonnenschutzgläsern: Varga M. Technologieleitfaden Sonnenschutzsysteme. Wien: MA 27; 2010.
https://bvst.at/itrfile/_1_/6f31f3dfa69ee04edfd9cdb420bbbc73/MA27_leitfaden_sonnenschutz_web.pdf [23 Jänner 2024, 10:30h]
- Demnächst veröffentlichter Ratgeber des BMK zu Kühlmaßnahmen mit Hinweisen zur Reduktion solarer Wärmeeinträge durch Fenster u. a. mithilfe der Glasqualität: Holzer P, Wimmer F, Hackl LM, Peer T und Czarnecki P [unveröffentlicht]. Ratgeber klimaaktiv Kühlen. Empfehlungen für Wohnungen und Immobilien aller Art. Wien: BMK.
- Kapitel 2.1: “Advanced window/glazing and shading technologies” im Annex 80 State of the Art Review: Holzer P, Stern P, Akander J, Ai Z, Arens E, Arghand T, Attia S, Bogatu D-I, Breesch H, Cehlin M, Chiesa G, Chtioui F, Elnagar E, Hayati A, Heiselberg P, Javed S, Kazanci O, Kolokotroni M, Lemort V, Levinson R, Zinzi M. International Energy Agency EBC Annex 80 - Resilient Cooling of Buildings - State of the Art Review. 2022.
- Kapitel 4.1.1: “Advanced solar shading/advanced glazing technologies” im Reviewartikel über resiliente Kühlstrategien des Annex 80: Zhang C, Kazanci OB, Levinson R, Heiselberg P, Olesen BW, Chiesa G, Sodagar B, Ai Z, Selkowitz S, Zinzi M, Mahdavi A, Teufl H, Kolokotroni M, Salvati A, Bozonnet E, Chtioui F, Salagnac P, Rahif R, Attia S, Lemort V, Elnagar E, Breesch H, Sengupta A, Wang LL, Qi D, Stern P, Yoon N, Bogatu D-I, Rupp RF, Arghand T, Javed S, Akander J, Hayati A, Cehlin M, Sayadi S, Forghani S, Zhang H, Arens E, Zhang G. Resilient cooling strategies – A critical review and qualitative assessment. Energy and Buildings. 2021; 251: 111312. doi:10.1016/j.enbuild.2021.111312
- Liu X, Wu Y. A review of advanced architectural glazing technologies for solar energy conversion and intelligent daylighting control. Architectural Intelligence. 2022; 1 (1): 10.
<https://doi.org/10.1007/s44223-022-00009-6>
- Favoino F, Fiorito F, Cannavale A, Ranzi G, Overend M. Optimal control and performance of photovoltachromic switchable glazing for building integration in temperate climates. Applied energy. 2016; 178: 943-961. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.107>
- Araújo GR, Teixeira H, Gomes MG, Rodrigues AM. Multi-objective optimization of thermochromic glazing properties to enhance building energy performance. Solar Energy. 2023; 249: 446-456. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.11.043>
- Kyrou E, Goia F, Reith A. Current performance and future development paths of transparent PV glazing in a multi-domain perspective. Energy and Buildings. 2023; 292: 113140.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113140>

1.4 Hinterlüftete Fassaden

Die Relevanz dieser Technologie zur Gebäudekühlung wird in Österreich als niedrig bis mittel eingeschätzt.

Dieses Technologieprofil basiert auf dem einschlägigen Profil *2.4 Ventilated Façades* des IEA EBC Annex 80 Resilient Cooling Projekts (1).

1.4.1 Beschreibung

Herkömmliche Fassaden tragen erheblich zum Wärmegewinn durch die Gebäudehülle bei, insbesondere transparente Fassaden.

Das Konzept der hinterlüfteten Fassade wird vom AIVC (30) definiert als "[...] eine herkömmliche einfache Fassade, die innen oder außen mit einer zweiten, im Wesentlichen verglasten Fassade bestückt ist. Jede dieser beiden Fassaden wird gemeinhin als Haut bezeichnet. Zwischen diesen beiden Häuten befindet sich ein belüfteter Hohlraum, dessen Breite von einigen Zentimetern bei den schmalsten bis zu mehreren Metern bei den breitesten zugänglichen Hohlräumen reichen kann" [Anm. wörtlich übersetzt aus dem Englischen]. Im deutschen Sprachgebrauch werden die beiden oben als Häute bezeichneten Elemente häufiger als Schichten oder Ebenen bezeichnet. Im Folgenden wird das vorgestellte System als „hinterlüftete Doppelfassade“ bezeichnet, ohne auf ähnliche Systeme wie Trombe-Wände oder Parieto-dynamische Fenster einzugehen (Trombe-Wände bezeichnen eine massive Außenwand, die ebenfalls zwischen einer davorliegenden Verglasung einen Luftspalt aufweist und dazu dienen, die Sonnenstrahlung zu absorbieren, um die so gespeicherte Wärme langsam an den Innenraum abzugeben; Parieto-dynamische Fenster sind mehrfach verglaste Fenster, die einen Luftstrom von außen seriell zwischen den Verglasungsebenen durchleiten und ihn so mithilfe des von innen nach außen gerichteten Wärmestromes aufwärmen; beide Systeme wurden zur Optimierung der Nutzung solarer Gewinne bzw. Verminderung von Heizwärmeverlusten über außenliegende Bauteile im Heizfall entwickelt).

Hinterlüftete Doppelfassaden können den Wärmegewinn durch undurchsichtige oder transparente Bauteile verhindern und so als passive Kühlung dienen. Sie werden aufgrund ihrer thermischen und architektonischen Vorteile zunehmend in Geschäfts- und Bürogebäuden eingesetzt. Während sie häufig aufgrund ihrer akustischen Vorteile vor allem in vollverglasten Gebäuden installiert werden, ist das Kühlpotential durch Lüftung bei diesen Gebäuden ohne eine integrierte Beschattungsvorrichtung begrenzt.

Das Funktionsprinzip von hinterlüfteten Doppelfassaden liegt darin, externe Wärmegewinne zu minimieren, die hauptsächlich aus der konvektiven Wärmeübertragung mit der Außenluft, der langwelligeren Strahlung zwischen der Gebäudehülle und der äußeren Umgebung (Gebäude, Straße und Himmel) sowie dem solaren Wärmegewinn am Tag resultieren. Im Sommer wirkt der konvektive Luftstrom innerhalb des belüfteten Hohlraums der Doppelfassade als passives Kühlsystem, das solare Gewinne abmindert und so die Temperatur der Innenhaut absenkt. Dadurch wird der Kühlenergiebedarf reduziert und der thermische Komfort in nicht klimatisierten Gebäuden aufrechterhalten. Die Durchströmung des Hohlraums mit Luft kühlt sowohl die Innen- als auch die Außenwände, wobei die Wärme über die zirkulierende Luft im Hohlraum nach außen geleitet wird. Die beiden Hauptantriebskräfte für die Luftbewegung innerhalb des Hohlraums sind Wind (erzwungene Konvektion) und thermischer Auftrieb (natürliche Konvektion).

Die Wirkung von hinterlüfteten Doppelfassaden kann abhängig von der Jahreszeit angepasst werden, z. B. durch manuelle oder automatische Steuerung von Luftein- und -auslässen. Auf diese Weise kann für jede Jahreszeit die geeignete Lüftungsstrategie gewählt werden (die Strategien für den Winter werden hier nicht behandelt). Diese passiven Kühlstrategien können in zwei Kategorien unterteilt werden: die Abluftfassade und die vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF).

- Die **Abluftfassade** ist mit dem Lüftungssystem des Gebäudes gekoppelt. Hierbei strömt Abluft aus dem Inneren des Gebäudes nach außen, und zwar durch den Doppelfassadenhohlraum von unten nach oben. Die Doppelfassaden-Wärmegewinne verstärken den Sog nach oben dank des natürlichen Kamineffekts, der durch den erhöhten Temperaturunterschied zwischen der erwärmten Luft im Hohlraum und der Außenluft entsteht.
- Die **vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF)** ist nur mit der Außenluft gekoppelt. Der Doppelfassadenhohlraum wird durch einen Einlass an der Unterseite und einen Auslass an der Oberseite der Außenhaut natürlich belüftet. Der Kamineffekt verstärkt die Lüftungsrate und das Kühlpotential, wobei dieser natürliche Lüftungseffekt durch die Höhe des Hohlraums noch verstärkt wird.
- In ähnlicher Weise werden **perforierte hinterlüftete Fassaden** durch eine perforierte Außenhaut belüftet.

Zusätzlich zu den Belüftungsmechanismen enthalten transparente hinterlüftete Doppelfassaden manchmal eine Beschattung – z. B. Jalousien – in ihrem Hohlraum, um die Sonneneinstrahlung in den angrenzenden Raum zu reduzieren. Eine weitere Verbesserung der Kühlung kann durch zusätzliche kühlende Einrichtungen und latenten Wärmetransfer erreicht werden, der die Überhitzung der Innenräume verzögert, indem er fühlbare Wärme durch Phasenwechsel absorbiert – ähnlich wie die kühlende Wirkung von Wasserdampf. Begrünung, Wasservernebelung oder Phase Change Materials (Latentwärmespeicher) sind typische zusätzliche Einrichtungen, die in einigen Doppelfassadenhöhlen verwendet werden und unter sommerlichen Bedingungen Hitzespitzen ausgleichen können.

1.4.2 Technologiespezifische Eigenschaften

Die Kühlwirkung von hinterlüfteten Doppelfassaden hängt hauptsächlich von der Lüftungsrate im Hohlraum ab. Die Außenluft ist hierbei die Hauptwärmesenke. Die Kühlleistungsgrenze hängt von der Lüftungsrate und dem Temperaturunterschied zwischen Innen- und Außenluft ab. Der Kühleffekt ist bei moderaten Außenlufttemperaturen am höchsten und reduziert die durch Strahlungsgewinne verursachte Überhitzung innerhalb der Doppelfassade (gilt für undurchsichtige Doppelfassaden oder Doppelfassaden mit integrierten Jalousien). Bei lichtundurchlässigen thermisch trägen Doppelfassaden wird die von den Wänden absorbierte Wärme durch nächtliche Lüftung innerhalb des Hohlraums abgeführt und die tagsüber auftretenden Temperaturspitzen der opaken Innenwand abgemildert.

- Die **Lüftungsrate** des Doppelfassadenhohlraums hängt von geometrischen Parametern ab, die das Strömungsverhalten der Luft beeinflussen (Turbulenzen, Kamineffekt, ...), wie z. B. Größe und Form des Lufteinlasses, Höhe des Hohlraums und Dicke der Luftschicht.
- Eine Vergrößerung der **Höhe des Lufthohlraums** (vom Einlass bis zum Auslass) verbessert die thermische Leistung von hinterlüfteten Fassaden, indem der Kamineffekt verstärkt wird, welcher sowohl die Luftströmung als auch die konvektive Wärmeübertragung zwischen Luft im Hohlraum und Wänden erhöht.

- **Windexposition** – die Lüftungsrate ist bei Winden, die senkrecht zum Gebäude wehen (windzugewandte oder windabgewandte Fassaden), höher als bei parallelen Winden.
- Der **Lochanteil** ist ein wichtiger Parameter für perforierte hinterlüftete Doppelfassaden. Eine Studie in Japan hat zum Beispiel gezeigt, dass ein Anteil von 50 % optimal für die natürliche Belüftung der doppelschaligen Fassade ist (31).
- Die natürliche Belüftung kann zur Erhöhung des Kühlpotentials durch ein **mechanisches Belüftungssystem** ersetzt werden, was jedoch den **Stromverbrauch** steigert. Dies ist folglich eine aktive Kühltechnik mit niedrigem Energiebedarf. Allerdings muss es sich nicht unbedingt um einen zusätzlichen Stromverbrauch handeln, wenn die Belüftung mit der Lüftungsanlage des Gebäudes gekoppelt ist, wie dies bei Abluftfassaden der Fall ist.

Andere Eigenschaften

Transparente Doppelfassaden mit Jalousien werden mit bestimmten Lamellenwinkeln, Luftschichtdicken und Fassadenhöhen ausgeführt. Der Neigungswinkel der Lamellen ist für eine maximale Beschattung im Sommer zu optimieren, wobei die Auswirkungen auf die Lüftungsrate aufgrund des Luftwiderstands zu berücksichtigen sind.

Die thermophysikalischen Eigenschaften der Fassadenmaterialien sind ebenfalls entscheidende Planungsparameter (z. B. thermische Masse, Dämmschichten, Albedo und Wärmeabstrahlung). Hinterlüftete Fassaden mit reflektierender Außenverkleidung können solare Gewinne stark reduzieren.

1.4.3 Anwendung

Die Investitionskosten von vorgehängten hinterlüfteten Fassaden belaufen sich auf etwa 300-400 €/m².

Wirkung im Gebäude

Hinterlüftete Doppelfassaden können zu allen Jahreszeiten als Wärmepuffer dienen, wobei die Lüftungsstrategie und integrierte Verschattungsvorrichtungen so angepasst werden können, dass Wärmeverluste entweder minimiert oder maximiert werden. Im Winter muss die Lüftungsstrategie dahingehend angepasst werden, um solare Gewinne der Fassade zu erhöhen und gleichzeitig Wärmeverluste durch konvektive Wärmeübertragung zu verhindern. Weitere Informationen über den Winterbetrieb von hinterlüfteten Doppelfassaden kann der Literatur in Abschnitt 1.4.4 entnommen werden.

Darüber hinaus reduzieren hinterlüftete Doppelfassaden die Schallübertragung über die Gebäudehülle dank der zusätzlichen Außenhaut, die Schall reflektiert und des Luftraums im Hohlraum der Doppelfassade, der als akustischer Puffer wirkt und Außengeräusche absorbiert.

Grenzen

Die Einschränkung der Anwendbarkeit von hinterlüfteten Doppelfassaden ist das zusätzliche Gewicht, das auf der bestehenden Fassade lastet, wenn eine zweite Außenhaut an die Gebäudehülle angebracht wird, was vor allem bei dickeren Verkleidungen ein Problem ist. Bei der Renovierung von Gebäuden ist daher zu prüfen, ob die bestehenden Fassaden dem zusätzlichen Gewicht standhalten, andernfalls muss die neue Außenhaut an einer eigenen Aufständering montiert werden. Hinterlüftete Fassaden sind daher im Neubau leichter realisierbar als die Nachrüstung im Bestand.

Anwendung und klimatische Bedingungen

In den letzten Jahren haben hinterlüftete Doppelfassaden aus mehreren Gründen an Popularität gewonnen: positive Effekte auf die Energieeffizienz, Gestaltungsvielfalt und architektonische Bedeutung, ihre Fähigkeit, für natürliches Licht zu sorgen und gleichzeitig die Sonneneinstrahlung zu reduzieren (bei verglasten Gebäuden reduziert die verglaste Außenhaut die Sonneneinstrahlung und die Doppelfassade ermöglicht die Integration geschützter Beschattungsvorrichtungen) sowie gute Schalldämmung.

Hinterlüftete Doppelfassaden wurden insbesondere für Geschäftsgebäude in kalten Klimazonen entwickelt. Seit den 1980er Jahren wurde diese Technik dann sowohl für den Sommer- als auch für den Winterbetrieb verbessert und hat sich in Europa, Nordamerika und Japan durchgesetzt. Für die nördliche Hemisphäre empfehlen Barbosa und Ip (32) eine Südausrichtung für natürlich belüftete Doppelfassaden.

Verfügbarkeit

Hinterlüftete Doppelfassaden sind schon seit mehreren Jahrzehnten in ihrer Entwicklung weit fortgeschritten, es werden jedoch immer wieder neue Systemvarianten erprobt. Zurzeit wird insbesondere an hinterlüfteten Doppelfassaden mit gesteuerten Jalousien, integrierten Phase Change Materials (Latentwärmespeichern) oder Verdunstungsvorrichtungen und perforierten Verkleidungen für hinterlüftete Doppelfassaden geforscht, wovon es teils bereits am Markt verfügbare Angebote gibt.

Vor- und Nachteile

- + passives System
- + Feuchteabfuhr
- + schalldämmend
- + Integration von Verschattungsvorrichtungen möglich
- + kein Zugluftisiko
- + keine Lärmemissionen im Innen- oder Außenraum
- + keine Hitzeemissionen im Außenraum
- + keine Verwendung ökologisch bedenklicher Substanzen oder Materialien am Einsatzort
- + keine ökologisch nachteiligen Wirkungen am Einsatzort
- im Bestandsbau ist die Realisierbarkeit abhängig von der Tragfähigkeit der Bestandsfassade
- bei Nachrüstung zusätzlicher Platzbedarf nach außen hin

1.4.4 Literaturhinweise

- Webseite und Informationsmaterial des Österreichischen Fachverbandes für hinterlüftete Fassaden (ÖFHF) unter <https://www.oefhf.at/>
- Kapitel 2.4: “Ventilated Envelope Surfaces” im Annex 80 State of the Art Review: Holzer P, Stern P, Akander J, Ai Z, Arens E, Arghand T, Attia S, Bogatu D-I, Breesch H, Cehlin M, Chiesa G, Chtioui F, Elnagar E, Hayati A, Heiselberg P, Javed S, Kazanci O, Kolokotroni M, Lemort V, Levinson R, Zinzi M. International Energy Agency EBC Annex 80 - Resilient Cooling of Buildings - State of the Art Review. 2022.
- Kapitel 4.1.4: “Ventilated roofs and ventilated facades (ventilated envelope surfaces)” im Reviewartikel über resiliente Kühlstrategien des Annex 80: Zhang C, Kazanci OB, Levinson R,

- Heiselberg P, Olesen BW, Chiesa G, Sodagar B, Ai Z, Selkowitz S, Zinzi M, Mahdavi A, Teufl H, Kolokotroni M, Salvati A, Bozonnet E, Chtioui F, Salagnac P, Rahif R, Attia S, Lemort V, Elnagar E, Breesch H, Sengupta A, Wang LL, Qi D, Stern P, Yoon N, Bogatu D-I, Rupp RF, Arghand T, Javed S, Akander J, Hayati A, Cehlin M, Sayadi S, Forghani S, Zhang H, Arens E, Zhang G. Resilient cooling strategies – A critical review and qualitative assessment. *Energy and Buildings*. 2021; 251: 111312. doi:10.1016/j.enbuild.2021.111312
- Agathokleous RA, Kalogirou SA. Double skin facades (DSF) and building integrated photovoltaics (BIPV): A review of configurations and heat transfer characteristics. *Renewable Energy*. 2016; 89: 743–756. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.043>
 - Balocco C. A simple model to study ventilated facades energy performance. *Energy and Buildings*. 2002; 34 (5): 469–475. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00130-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00130-X)
 - Barbosa S, Ip K. Perspectives of double skin façades for naturally ventilated buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014; 40: 1019–1029. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.192>
 - Bikas D, Tsikaloudaki K, Kontoleon KJ, Giarma C, Tsoka S, Tsirigoti D. Ventilated Facades: Requirements and Specifications Across Europe. *Procedia Environmental Sciences*. 2017; 38: 148–154. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.096>
 - Ciampi M, Leccese F, Tuoni G. Ventilated facades energy performance in summer cooling of buildings. *Solar Energy*. 2003; 75 (6): 491–502. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.09.010>
 - Heimrath R, Hengsberger H, Mach T, Streicher W, Waldner R, Flamant G, Loncour X, Guaracino G, Erhorn H, Erhorn-Kluttig H, Santamouris M, Farou I, Duarte R, Blomsterberg Å, Sjöberg L, Blomquist C. Best Practice for Double Skin Façades—In BESTFAÇADE project (EIE/04/135/S07.38652; p. 153). University of Lund. 2007. <http://www.bestfaçade.com/pdf/downloads/WP5%20Best%20practice%20guidelines%20report%20v17final.pdf>
 - Liu L, Yu Z, Zhang H. Simulation study of an innovative ventilated facade utilizing indoor exhaust air. *Energy Procedia*. 2017; 121: 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.009>
 - Srisamranrungruang T, Hiyama K. Balancing of natural ventilation, daylight, thermal effect for a building with double-skin perforated facade (DSPF). *Energy and Buildings*. 2020; 210: 109765. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109765>

1.5 Gebäudebegrünung

Die Relevanz dieser Technologie zur Gebäudekühlung wird in Österreich als niedrig eingeschätzt, zur Verbesserung des Mikroklimas als hoch.

Dieses Technologieprofil basiert auf dem einschlägigen Profil *2.5 Green Roofs and Green Façades* des IEA EBC Annex 80 Resilient Cooling Projekts (1).

1.5.1 Beschreibung

Begrünte Dächer und Fassaden sind passive Kühlungslösungen, deren Funktion hauptsächlich auf der Evapotranspiration (Transpiration und Evaporation, respektive Verdunstung) von Pflanzen und Substrat basiert. Dieses Kühlpotential hängt von der Wasserrückhaltekapazität, der Wasserversorgung, der Pflanzenart und der Art der Gebäudebegrünung ab. Darüber hinaus sorgen die Pflanzen für Sonnenschutz, während das Substrat der Gebäudehülle zusätzliche Wärmedämmung und thermische Masse verleiht. Begrünte Dächer oder begrünte Fassaden mit einer vertikalen Substratschicht benötigen in der Regel eine Luftschicht zwischen Substrat und Gebäudehülle, die als zusätzliche thermische Barriere wirkt.

Der Verdunstungskühleffekt auf der Außenseite des Gebäudes verhindert Wärmegewinne durch die Gebäudehülle. Hierbei absorbiert der Verdunstungsprozess die sensible Wärme, die sich aus der Sonneneinstrahlung (Wärmestrahlung), der Wärmeleitung und dem konvektiven Wärmestrom aus der Außenluft ergeben. Der Kühleffekt an der Außenseite ist also auf den latenten Wärmestrom aus Verdunstung von Wasser an Pflanzensubstrat und Laub sowie in geringerem Maße auf langwellige Wärmestrahlung zum Himmel zurückzuführen. Der Verdunstungsprozess wird durch direkte solare Gewinne verstärkt. Dieser Kühleffekt wirkt sich in einem gewissen Maße auf die Senkung der Oberflächentemperatur im Inneren aus.

Was die Art der Gebäudebegrünung betrifft, so gibt es sowohl für Dächer als auch für Fassaden eine breite Palette von Ausführungsmöglichkeiten. Hinsichtlich des Kühlpotentials können diese in den folgenden vier Kategorien zusammengefasst werden: **extensive** oder **intensive Dachbegrünung** und **fassadengebundene** oder **bodengebundene Begrünung** (33) (34):

- **Extensiv begrünte Dächer** haben eine Substratdicke von bis zu 10 – 15 cm, ein geringes Wasserrückhaltevermögen, eine niedrige Vegetation wie Kräuter oder Sukkulenten und robuste Pflanzen wie die der seicht wurzelnden Gattung Sedum, sowie eine niedrige Evapotranspirationsrate.
- **Intensiv begrünte Dächer** haben eine Substratdicke von mehr als 15 – 20 cm, ein besseres Wasserrückhaltevermögen, eine höhere Vegetation wie Sträucher und Bäume und höhere Verdunstungsraten.
- **Fassadengebundene Begrünung** umfasst begrünte Fassaden mit Substraten, die sich ähnlich wie Gründächer verhalten, aber wegen des Durchsickerns des Wassers regelmäßig bewässert und gedüngt werden müssen.
- **Bodengebundene Fassadenbegrünungen** werden mit Kletterpflanzen gestaltet, die ein geringes Verdunstungspotential aufweisen, aber Schatten spenden und gleichzeitig natürliches Licht durchlassen.

Die kühlende Wirkung von begrünten Dächern und Fassaden hängt von der **Wasserverfügbarkeit und der Retention des Niederschlagswassers** ab. Der Hauptunterschied zwischen begrünten Fassaden und begrünten Dächern liegt im Wasserabfluss, der die durch die Verdunstung verursachten Effekte in der Wärmebilanz von begrünten Fassaden verstärkt. Weiters sind begrünte Dächer robust gegenüber Dürreperioden und wirken regulierend bei Starkregenereignissen.

1.5.2 Technologiespezifische Eigenschaften

Bei Gebäudebegrünung mit Wasserretention hängt die Kühlleistung hauptsächlich von den thermischen Eigenschaften der Wand oder des Daches (z. B. Wärmekapazität, -widerstand und Albedo) und der gespeicherten Wassermenge ab.

Es gibt viele verschiedene Arten von Gründächern und begrünten Fassaden, die hier nicht vollständig beschrieben werden können. Alle diese Varianten verfügen jedoch über Pflanzen und Substrat – das Wachstumsmedium für die Pflanzen – mit spezifischen, für das Kühlpotential wichtigen Eigenschaften, die im Folgenden aufgeführt sind (einige davon sind spezifisch für bestimmte Kategorien):

- Die **thermische Speicherkapazität [J/K]**, die zu jener der Gebäudehülle durch das begrünte Dach oder das begrünte Fassadensubstrat hinzukommt. Im Vergleich zu einem nicht begrünten Dach kann ein begrüntes Dach den Spitzenbedarf an Kühlung selbst mit trockenem Nährboden abmildern und den jährlichen Kühlenergieverbrauch reduzieren. Die Speicherkapazität hängt hauptsächlich von der Dicke der Substratschicht, seiner trockenen Wärmekapazität, seiner Dichte und seinem zeitlich variablen Wassergehalt ab.
- Die stark vom Wassergehalt abhängige **Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]** des Substrats. Der Wassergehalt kann bei begrünten Dächern im Laufe der Zeit stark schwanken, was auch für die Wärmeleitfähigkeit und die meisten anderen wichtigen technologiespezifischen Eigenschaften gilt.
- Das **Wasserrückhaltevermögen [%]** (typische Werte von 35 % bis 65 % (35) für begrünte Dachsubstrate) und damit der Verdunstungskühleffekt. Bei Gründächern wird diese Wasserspeicherkapazität hauptsächlich von der Bodendicke [m] bestimmt.
- Die **Abflussverhalten und Niederschlagsbewältigungskapazität**, die durch den Abflussbeiwert [0 – 100 %] quantifiziert werden kann. Diese Kennzahl gibt das Verhältnis zwischen dem abfließenden Wasser und der Wasserzufuhr bzw. der Niederschlagsmenge an. Begrünte Dächer mit einer höheren Wasserrückhaltekapazität (im Allgemeinen bedingt durch das Substrat) haben also einen niedrigeren Abflussbeiwert. Begrünte Dächer verringern das Risiko von Überschwemmungen und werden eingesetzt, um sich auf die potentiellen Auswirkungen sich ändernder Niederschlagsmuster vorzubereiten, die die Kapazität der bestehenden Entwässerungssysteme überfordern könnten. Intensiv begrünte Dächer haben den Vorteil, dass sie anfallendes Regenwasser besser zurückhalten können.
- Die Pflanzeigenschaften, die sich auf ihr thermisches Verhalten auswirken, wie **Pflanzenphysiologie, -art und -morphologie**. Ein Vergleich verschiedener Kräuter ergab, dass die niedrigsten Dachtemperaturen mit den am höchsten wachsenden Kräutern erreicht werden. Die komplexen Kombinationen von Pflanzenmerkmalen werden in thermischen Modellen durch die Bestimmung des Leaf Area Index (LAI oder Blattflächenindex) und des stomatären Widerstands vereinfacht:

- Der **Leaf Area Index (LAI) [0-1]** ergibt sich aus der Verteilung des Blätterdaches und dessen Überdeckung des darunterliegenden Substrats. Dies ist eine Schlüsseleigenschaft für den Beschattungseffekt, aber auch ganz allgemein für die Gesamtbilanz der lang- und kurzwelliger Strahlung sowie für die konvektive Wärmeübertragung.
- Der **stomatäre Widerstand** der Pflanzen [**s/m**]. Dieser Wert charakterisiert die Fähigkeit der Pflanzen, die Evapotranspiration zu begrenzen. Pflanzen mit einem niedrigem stomatärem Widerstand haben daher eine höhere Kühlwirkung.
- Die **Albedo [0-1]** sowie der **Emissionsgrad [0-1]** des Substrats und der Pflanzen wirken sich auf die kurzwellige und langwellige Strahlungsbilanz aus.

1.5.3 Anwendung

Die Investitionskosten von extensiver Dachbegrünung liegen bei etwa 30-50 €/m² und jene von intensiver Dachbegrünung bei etwa 150-200 €/m².

Die Investitionskosten von bodengebundenen Fassadenbegrünungen mit Selbstklimmern belaufen sich auf zwischen 15 und 35 €/m², bei Systemen mit Gerüstkletterpflanzen auf zwischen 80 und 250 €/m² und bei wandgebundenen Fassadenbegrünungen auf zwischen 300 und 2.000 €/m². Die Kosten für die Pflege liegen zwischen 10 und 40 €/m²·a). (36) (34)

Wirkung im Gebäude

Die konkrete Wirkung von Gebäudebegrünung auf den Innenraum hängt hauptsächlich von den thermischen Eigenschaften des jeweiligen Gebäudes ab. Für den Kühlbedarf ausschlaggebend dürfte die Dicke der Substratschicht sein, die eine zusätzliche dämmende Wirkung hat, welche sich aus dem zusätzlichen Wärmeleitwiderstand des Substrats sowie der Verdunstung von Wasser aus dem Substrat und somit auch niedrigeren Oberflächentemperaturen ergibt. Darüber hinaus haben die Evapotranspiration und Verschattung der Begrünung eine – wenn auch geringe – Wirkung. (37) (38)

So zeigt sich etwa laut einer Studie für ein saniertes Gebäude mit Fassadenbegrünung nur eine geringe Absenkung der Innenraumtemperatur von 0,1 Kelvin während einer Hitzeperiode. (39)

Die Verringerung von Wärmegewinnen mildert Temperaturspitzen auf der Dachoberfläche an heißen Tagen ab, was sich direkt auf Wärmelasten und Haltbarkeit der Dachabdichtungen auswirkt. Begrünte Dächer und Fassaden tragen weiters zu einem verbesserten Mikroklima sowie zur Abschwächung des Urban Heat Island Effect (urbaner Wärmeinseleffekt) bei und können schließlich lokale Kühlinseln schaffen, die eine indirekte Kühlwirkung auf Gebäude in dicht bebauten städtischen Gebieten haben.

Weiters haben verschiedene Gebäudebegrünungssysteme eine gewisse Wasserretentions- und Luftfilterwirkung (Schadstoffe, Staub) sowie auch schalldämmende Eigenschaften.

Grenzen

Gebäudebegrünungen verbrauchen Wasser, das in trockenen Gebieten während der heißen Jahreszeiten begrenzt sein kann. Die Verwendung von Abwasser stellt eine Alternative dar, die die Auswahl geeigneter Pflanzen und die besondere Berücksichtigung von Gesundheitsrisiken erfordert. Hierbei sind auch mögliche Veränderungen der Bodeneigenschaften zu beachten. Die Nutzung von Abwasser könnte auch eine Lösung für die Grauwasseraufbereitung durch Drainage oder Versickerung in fassadengebundenen Begrünungen und Dachbegrünungen darstellen.

Das zusätzliche Gewicht von intensiv begrünten Dächern kann 180 bis 500 kg/m² übersteigen und daher zusätzliche bauliche Maßnahmen zur Erhöhung der Belastbarkeit erforderlich machen.

Bei Gebäudebegrünung sind die Anforderungen an den Brandschutz zu beachten, sowie für Dachbegrünungen eine wasser- und wurzeldichte Ausführung zu gewährleisten. Gebäudebegrünungen müssen absturz- sowie abrutschsicher sein und benötigen Be- und Entwässerungssysteme. Eine regelmäßige Pflege (Bepflanzung, Schnitt etc.) der Begrünung ist ebenfalls vorzusehen.

Da Gebäudebegrünungen freie Flächen an der Fassade oder am Dach benötigen, stehen sie u. U. in Konkurrenz zu PV- bzw. PV/T-Systemen. Für Dachbegrünungen gibt es allerdings hybride Lösungen, die PV oder PV/T mit einer Begrünung kombinieren. In diesen Fällen ist eine adäquate Pflege der Begrünung vorzusehen, um Leistungseinbußen durch Verschattung zu vermeiden.

Anwendung und klimatische Bedingungen

In heißen und trockenen Gebieten ist der Evapotranspirationseffekt höher und trägt somit zu einer Erhöhung des Kühleffekts von Gebäudebegrünung sowohl für den Innen- als auch für den Außenbereich bei. Während diese passive Kühltechnik den Kühlenergiebedarf senkt, kann die Verfügbarkeit von Wasser in heißen und trockenen Jahreszeiten eine Einschränkung für die Anwendung und die Leistung dieser Technologie darstellen.

Bei begrünten Fassaden im städtischen Raum sind die Wechselwirkungen komplexer. Im Sommer sind begrünte Fassaden der Sonneneinstrahlung weniger direkt ausgesetzt. Weiters ist die kühlende Wirkung von Fassadenbegrünungen sowie von der Ausrichtung von Häuserschluchten in heißen und trockenen Gebieten von größerer Bedeutung.

Verfügbarkeit

Begrünte Dächer und begrünte Fassaden sind inzwischen kommerziell verfügbar; zu den Optionen gehören intensive oder extensive Dachbegrünungen und begrünte Fassaden (klettern oder mit einem vertikalen Substrat). Diese Lösungen können auch soziale Vorteile haben, z. B. städtische Lebensmittelproduktion, soziale Vernetzung und Zugang zur Natur am Arbeitsplatz. Allerdings sind diese Lösungen immer noch teuer und erfordern Pflege und Düngung. Die experimentelle Erprobung von Gebäudebegrünungen sowie die Entwicklung einschlägiger Berechnungsmodelle ist weiterhin ein stark beforschter Bereich.

Vor- und Nachteile

- + kann bei Starkregenereignissen ausgleichend wirken
- + kommerziell verfügbar
- + verbessertes Mikroklima
- + gewisse luftfilternde und schalldämmende Wirkung
- + kein Zugluftrisiko
- + keine Lärmemissionen im Innen- oder Außenraum
- + keine Hitzeemissionen im Außenraum
- + keine Verwendung ökologisch bedenklicher Substanzen oder Materialien am Einsatzort
- + keine ökologisch nachteiligen Wirkungen am Einsatzort
- gute Planung zur Gewährleistung des Brand-, Abrutsch- und Absturzschutzes sowie zur Entwässerung und zum Wurzelschutz notwendig
- zusätzliches Gewicht und Anforderungen an Dach und Gebäudehülle
- zusätzlicher Platzbedarf
- Pflegeaufwand

- Wasserverbrauch
- können in Konkurrenz zu anderer Dachnutzung wie etwa PV oder Solarthermie stehen

1.5.4 Literaturhinweise

- Webseite und Informationsmaterial von GRÜNSTATTGRAU unter <https://gruenstattgrau.at/>
- Leitfaden Fassadenbegrünung der Stadt Wien unter <https://www.wien.gv.at/umwelt-schutz/raum/fassadenbegruenung.html>
- Demnächst veröffentlichter Ratgeber des BMK zu Kühlmaßnahmen mit Hinweisen zu Gebäudebegrünung: Holzer P, Wimmer F, Hackl LM, Peer T und Czarnecki P [unveröffentlicht]. Ratgeber klimaaktiv Kühlen. Empfehlungen für Wohnungen und Immobilien aller Art. Wien: BMK.
- ÖNORM L1131 – Gartengestaltung und Landschaftsbau - Begrünung von Dächern und Decken auf Bauwerken - Anforderungen an Planung, Ausführung und Erhaltung
- Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen -Dachbegrünungsrichtlinie [Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL)]
- SIA 312:2013 – Begrünung von Dächern
- ÖNORM L1136 – Vertikalbegrünung im Außenraum - Anforderungen an Planung, Ausführung, Pflege und Kontrolle
- Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Fassadenbegrünungen - Fassadenbegrünungsrichtlinie [Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL)]
- Kapitel 2.3: “Evaporative Envelope Surfaces” im Annex 80 State of the Art Review: Holzer P, Stern P, Akander J, Ai Z, Arens E, Arghand T, Attia S, Bogatu D-I, Breesch H, Cehlin M, Chiesa G, Chtioui F, Elnagar E, Hayati A, Heiselberg P, Javed S, Kazanci O, Kolokotroni M, Lemort V, Levinson R, Zinzi M. International Energy Agency EBC Annex 80 - Resilient Cooling of Buildings - State of the Art Review. 2022.
- Kapitel 4.1.3: “Green roofs, roof pond, green facades (evaporative envelope surfaces)” im Reviewartikel über resiliente Kühlstrategien des Annex 80: Zhang C, Kazanci OB, Levinson R, Heiselberg P, Olesen BW, Chiesa G, Sodagar B, Ai Z, Selkowitz S, Zinzi M, Mahdavi A, Teufl H, Kolokotroni M, Salvati A, Bozonnet E, Chtioui F, Salagnac P, Rahif R, Attia S, Lemort V, Elnagar E, Breesch H, Sengupta A, Wang LL, Qi D, Stern P, Yoon N, Bogatu D-I, Rupp RF, Arghand T, Javed S, Akander J, Hayati A, Cehlin M, Sayadi S, Forghani S, Zhang H, Arens E, Zhang G. Resilient cooling strategies – A critical review and qualitative assessment. Energy and Buildings. 2021; 251: 111312. doi:10.1016/j.enbuild.2021.111312
- Alexandri E, Jones P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. Building and Environment. 2008; 43 (4): 480–493. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.055>
- Barrios G, Huelsz G, Rojas J, Ochoa JM, Marincic I. Envelope wall/roof thermal performance parameters for non air-conditioned buildings. Energy and Buildings. 2012; 50: 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.030>

- Djedjig R, Bozonnet E, Belarbi R. Modeling green wall interactions with street canyons for building energy simulation in urban context. *Urban Climate*. 2016; 16: 75–85.
<https://doi.org/10/gcv7kq>
- Yannas S, Erell E, Molina JL. *Roof Cooling Techniques: A Design Handbook*. London: Earthscan; 2006.

1 Komfortverbesserungen jenseits von physikalischem Wärmeentzug

Komfortlüftung und erhöhte Luftbewegung

Die Relevanz dieser Technologie zur Komfortverbesserung wird in Österreich als mittel eingeschätzt.

Dieses Technologieprofil basiert auf dem einschlägigen Profil *4.1 Comfort Ventilation and Elevated Air Movement* des IEA EBC Annex 80 Resilient Cooling Projekts (1).

1.6.1 Beschreibung

Komfortlüftung oder Lüftung mit erhöhter Luftbewegung bezieht sich auf die gezielte Steuerung und Zirkulation von Innen- oder Außenluft in Innenräumen zur Erhöhung des thermischen Komforts und ggf. gleichzeitigen Verbesserung der Luftqualität für die Nutzer:innen. Dieses technologische Konzept wird in zwei Hauptkategorien unterteilt:

- einerseits die passive (freie) Lüftung (etwa über Fenster) mit der damit einhergehenden natürlichen Luftbewegung und Frischluftzufuhr, und andererseits
- aktive Lüftungskonzepte mithilfe von Ventilatoren, die entweder Frischluft zuführen (etwa über Raumluftechnische Anlagen wie z. B. Komfortlüftungsgeräte) oder Innenraumluft umwälzen (etwa über Deckenventilatoren).

Das vorliegende Technologieprofil erläutert insbesondere Technologien mit der Funktion der erhöhten Luftbewegung. Da im deutschen Sprachgebrauch jedoch unter Komfortlüftungsanlagen im engeren Sinne eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung zur effizienten Nutzung der Wärme/Kälte in der Abluft zur Zuluftvorwärmung/-vorkühlung verstanden wird, fällt diese Technologie eher in den Bereich der Lüftungsanlagen, bei denen Zuglufterscheinungen im Innenraum und Druckverluste durch zu hohe Luftgeschwindigkeiten in den Leitungen zu vermeiden sind. Ein Kühleffekt durch erhöhte Luftbewegung ist bei diesen Systemen zwar technisch möglich, allerdings zu Lasten der Effizienz. Die in diesem Kapitel verwendete Definition der Komfortlüftung ist gegenüber der eben genannten weiter gefasst und umfasst alle Maßnahmen zur Luftzirkulation in Innenräumen inklusive eventueller Frischluftzufuhr zur Verbesserung der Raumlufqualität. Weiterführende Informationen zum Thema Lüftung sind im Abschnitt 2.8.1 zu finden. Im Allgemeinen ist ein konstanter Luftstrom anzustreben.

Der menschliche Körper gibt ständig Wärme an die Umgebung ab, um sein thermisches Gleichgewicht aufrechtzuerhalten. Wärmesensoren in der menschlichen Haut reagieren auf der gesamten Körperoberfläche unterschiedlich empfindlich auf Wärme und Kälte. Durch die Verdunstung von Feuchtigkeit an der Hautoberfläche hat die Luft, die über die Epidermis strömt, eine physiologisch kühlende Wirkung (konvektive Wärmeübertragung). In warmen und neutralen Umgebungen wird die Kühlung des Kopfes und des Oberkörpers als sehr angenehm empfunden.

Unterschiede bei Geschlecht, Alter, Körpergewicht, Bekleidungsgehnheiten, Stoffwechselrate und thermischer Anpassung wirken sich auf die Komfortanforderungen aus. Die hier vorgestellte Technologie vergrößert den üblicherweise als angenehm empfundenen Temperaturbereich und senkt so den Kühlenergieverbrauch. Je niedriger die Temperatur der einströmenden Luft ist, desto effektiver ist die Komfortlüftung (siehe hierzu auch Kapitel 2.1 zur Lüftungskühlung). Darüber hinaus zielen Systeme mit erhöhter Luftbewegung darauf ab, eine sanfte und unaufdringliche Brise zu erzeugen, die den natürlichen Luftstrom im Freien nachahmt. Daneben trägt erhöhte Luftbewegung auch dazu bei, der thermischen Schichtung der Luft in einem Raum entgegenzuwirken (Durchmischung).

Da die ortstypischen Windgeschwindigkeiten in den meisten Regionen selten ausreichen, um die erforderlichen Luftgeschwindigkeiten für Innenräume zu erzeugen, ist eine vollständige passive Komfortlüftung meistens nicht möglich. In den meisten Fällen werden daher Wand-, Decken- oder Fensterventilatoren benötigt, um die Strömungsgeschwindigkeit der Luft auf das erwünschte Niveau zu bringen. Ventilatoren dienen drei sehr unterschiedlichen Zwecken. Der erste besteht darin, heiße, feuchte und verschmutzte Luft abzuführen. Der zweite Zweck ist die Zufuhr von Außenluft zur Belüftung oder zur Abkühlung eines Gebäudes in der Nacht. Wenn die Innenluft kühler ist als die Außenluft, besteht der dritte Zweck darin, die Luft im Raum zu bewegen. Wenn die Innenluft kühler und/oder weniger feucht ist als die Außenluft, sollten Decken- oder Tischventilatoren eingesetzt und die Fenster geschlossen werden. Die Deckenventilatoren können im Winter in umgekehrter Richtung eingeschaltet werden, um die warme Luft nach unten zu transportieren (gegen thermische Stratifikation).

1.6.2 Technologiespezifische Eigenschaften

Die wichtigsten technischen Eigenschaften für die Auslegung oder den Kauf der beschriebenen Systeme sind:

- **Kühleffekt der bewegten Luft [°C].** Vorbeiströmende Luft hat eine physiologische Kühlwirkung (konvektive Wärmeübertragung), indem sie Feuchtigkeit an der Hautoberfläche verdunstet. Unter sommerlichen Bedingungen mit operativen Innentemperaturen über 25 °C kann eine künstlich erhöhte Luftgeschwindigkeit dazu dienen, die Innentemperaturen gemäß Tab. 1 auszugleichen. Luftbewegungen mit geringer Geschwindigkeit, typischerweise weniger als 0,3 m/s, garantieren die Vermeidung von Zugluft und Unbehagen (Luftgeschwindigkeiten über 0,8 m/s bewegen Papier von einem Schreibtisch). ISO und ASHRAE geben ebenfalls Referenzzahlen an, die den hier vorgestellten sehr ähnlich sind. Tab. 2 zeigt, um wie viel Grad die operative Raumtemperatur sinken müsste, um den gleichen Kühleffekt zu erzielen wie die gegebene Luftgeschwindigkeit.

Tab. 1: Korrektur der operativen Innentemperatur ($\Delta\theta_o$) durch den Einsatz von Ventilatoren zur persönlichen Kontrolle der Luftgeschwindigkeit durch die Nutzer:innen. (40)

Durchschnittliche Luftgeschwindigkeit (V_a)	0,6 m/s	0,9 m/s	1,2 m/s
Korrektur operative Raumtemperatur	1,2 °C	1,8 °C	2,2 °C

Tab. 2: Luftgeschwindigkeit und thermischer Komfort. (41)

Luftgeschwindigkeit (m/s)	Äquivalente Temperaturreduktion (°C)	Wirkung auf Komfort
0,05	0,0	Stehende Luft, leicht unangenehm
0,20	1,1	Kaum spürbar, aber angenehm
0,25	1,3	Auslegungsgeschwindigkeit, für Luftauslässe in der Nähe von Personen
0,40	1,9	Spürbar und angenehm
0,80	2,8	Sehr spürbar, aber akzeptabel bei hoher körperlicher Aktivität, wenn die Luft warm ist
1,00	3,3	Obergrenze für klimatisierte Räume. Gute Luftgeschwindigkeit für die natürliche Belüftung in heißen und trockenen Klimazonen
2,00	3,9	Gute Luftgeschwindigkeit für die natürliche Belüftung in heißen und feuchten Klimazonen
4,00	5,0	Wird als leichte Brise empfunden, wenn sie im Freien zu spüren ist

- **Corrective Power [°C oder K]**. Dies ist die in Kelvin oder Grad Celsius ausgedrückte Fähigkeit eines Systems, die thermischen Bedingungen in Richtung der Komfortzone zu "korrigieren", gemessen als Differenz zwischen zwei Temperaturen, bei denen ein gleiches thermisches Empfinden erreicht wird – eine Temperatur in der Komfortzone ohne erhöhter Luftgeschwindigkeit und eine mit erhöhter Luftgeschwindigkeit, wobei alle anderen

Umgebungsfaktoren konstant gehalten werden. Sie ist dem Kühleffekt der bewegten Luft ähnlich und bezieht sich aber auf Werte, die in der Praxis bei Versuchen mit unterschiedlichen Umgebungsbedingungen erreicht werden.

- **Physikalische Kühlleistung der Lüftung.** Wenn die Außenluft kälter ist als die Raumluft (vor allem nachts; siehe 2.1), können mit hohen Luftvolumenströmen beträchtliche Wärmemengen aus den Räumen abgeführt werden.
- **Anhebung der Zieltemperatur der Klimaanlage oder Potential zur Vermeidung von aktiver Raumkühlung [°C].** Energieverschwendung fällt umso höher aus, je enger Temperatursollwerte beieinanderliegen. Effiziente Ventilatoren werden eingesetzt, um die Zieltemperatur der Klimaanlage in Gebäuden erhöhen zu können. Die Anhebung der Zieltemperatur für den Sommerbetrieb von typischerweise 23 °C auf 26 °C spart etwa 30 % des Kühlenergiebedarfs, ohne den Komfort zu stark zu reduzieren. Der Stromverbrauch von Ventilatoren ist im Vergleich zum Energieverbrauch von HLK-Anlagen vernachlässigbar. Ein zusätzlicher Vorteil ist die Verringerung des Energieverbrauchs während der Spitzenlastzeiten. Weiters besteht die Möglichkeit, das Kühlsystem kleiner zu dimensionieren oder einen netzdienlichen bzw. an den Lastgang der Versorgungsquellen angepassten Betrieb zu fahren. Unter bestimmten Umständen kann auf ein Kühlsystem verzichtet werden, was zu einer erheblichen Senkung der Kosten (Installation und Wartung) führt.
- **Energieeffizienz der Corrective Power [-].** Dies ist das Verhältnis zwischen der Corrective Power und dem Stromverbrauch des Ventilators.
- **Anteil der offenbaren Nettofläche für natürliche Lüftung bezogen auf die Boden- oder Wandfläche [%].** Für Komfortlüftung muss die offenbare Fensterfläche mindestens 20 % der Bodenfläche betragen, wobei sich die Öffnungen etwa gleich auf die leeseitigen und luvseitigen Wände verteilen sollten (Querlüftung). Ideal sind Fenster, die sich für alle Personen im Raum auf Augenhöhe befinden. Dadurch befindet sich das Fensterbrett für sitzende oder liegende Personen 30 bis 60 cm über den Boden. Eine Konstruktion, die die Luft über die Köpfe der Personen hinweg leitet, ist ungeeignet.

Ergänzende technische Eigenschaften werden in Kapitel 1.7 (Mikrokühlung und individuelle Komfortregelung) vorgestellt.

Ventilatoren mit aerodynamisch profilierten Flügeln können mehr Luft effizienter umwälzen und verbrauchen dabei weniger Strom, während Deckenventilatoren mit flachen Flügeln ineffizient sind (typische Leistungsaufnahme ca. 6 – 30 W (bei 1,5 m Rotordurchmesser)). Große, langsam rotierende Deckenventilatoren sind weitaus effektiver als kleine, schnell rotierende.

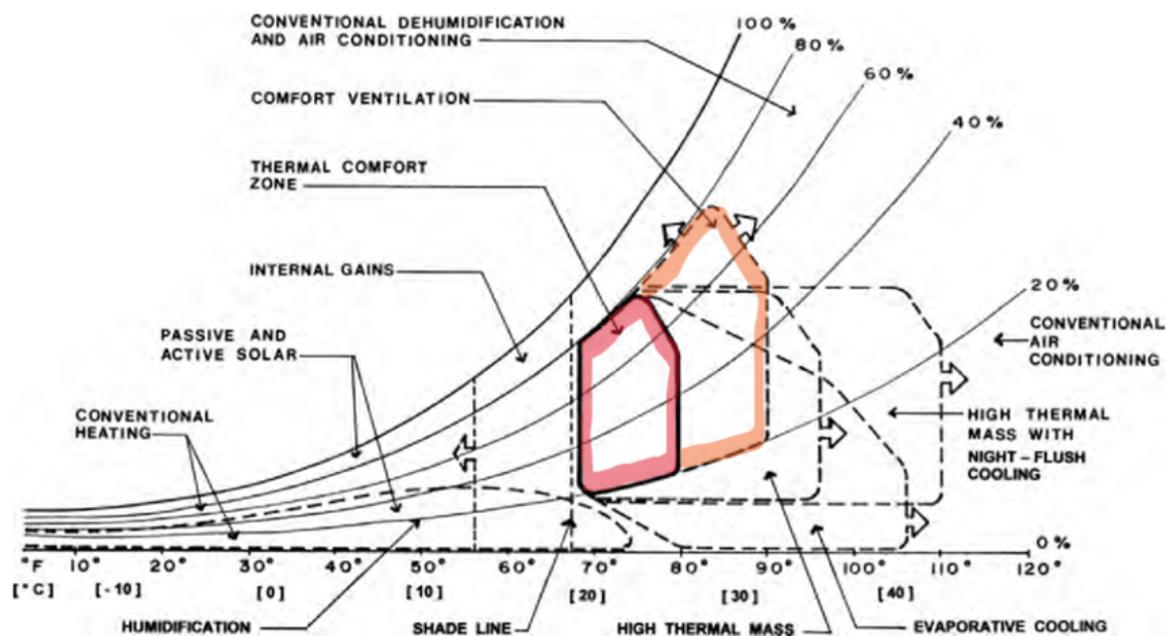
1.6.3 Anwendung

Die Investitionskosten von Komfortlüftungsgeräten belaufen sich auf etwa 3.000 €/Stück.

Wirkung im Gebäude

Die beschriebene Technologie ist eine vielseitig anwendbare Lösung, die die Luftzirkulation und den Innenraumkomfort verbessern kann. Ihre Anwendbarkeit ist bei unterschiedlichen Umweltbedingungen, einschließlich Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen gegeben (Abb. 6).

Abb. 6: Komfortlüftungsstrategie in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen (42) (modifiziert). Die rot markierte Zone beschreibt die Umgebungsbedingungen, bei denen sich der Mensch wohl fühlt und keine Maßnahmen zur Konditionierung notwendig sind. Der orange markierte Bereich beschreibt jene Umgebungsbedingungen, bei denen eine Komfortlüftung gut einsetzbar ist. Die anderen Bereiche beziehen sich auf weitere Konditionierungsmaßnahmen.



Im Sommer verbessern die Ventilatoren die Luftzirkulation, sorgen für eine erfrischende Brise und verringern die Abhängigkeit von Klimaanlage. Im Winter, wenn Heizungsanlagen in Betrieb sind, können Ventilatoren umgekehrt werden, um warme Luft sanft von der Decke nach unten zu fächeln und die Wärme gleichmäßiger im Raum zu verteilen. Diese Umverteilung der warmen Luft verbessert nicht nur den thermischen Komfort, sondern führt auch zu Energieeinsparungen, da weniger geheizt werden muss.

Grenzen

Die genaue Vorhersage der erforderlichen Kühllast bei Komfortlüftung sowie die Integration des Kühlpotentials in Gesamtenergieeffizienzberechnungen stellen oft eine Herausforderung dar, was eine zielgerichtete Planung und Auslegung von Komfortlüftung erschwert. Darüber hinaus hängt die Wirksamkeit der Fensterlüftung vom Verhalten der Nutzer:innen ab. Folglich erweist sich die genaue Vorhersage des Ausmaßes, in dem die natürliche Belüftung in der Praxis erfolgreich umgesetzt werden kann, als eine schwierige Aufgabe.

Das Vorhandensein eines hohen Außenlärmpegels in städtischen Gebieten stellt ein erhebliches Hindernis für die Umsetzung von natürlicher Wohnraumlüftung dar. Geeignete Bewertungsmethoden für typische Lärmkulissen im Außenbereich sind von entscheidender Bedeutung, um das Potential für den wirksamen Einsatz von Belüftungsstrategien einzuschätzen und das Risiko zu minimieren, dass die Nutzer:innen die Fenster trotz guter thermischer Außenbedingungen wegen Lärmbelästigung schließen.

Luftschadstoffe wie Stickstoffdioxid (NO₂), Schwefeldioxid (SO₂), Kohlendioxid (CO₂), Ozon (O₃) sowie Schwebstoffe (PM) werden in größeren urbanen Gebieten in der Regel kontinuierlich gemessen.

Diese Schadstoffe stellen ebenfalls erhebliche Hindernisse für die Umsetzung von Belüftung dar. Die Bestimmung des Verhältnisses zwischen Innen- und Außenluftschadstoffen ist entscheidend für die Bewertung der Durchführbarkeit einer natürlichen Belüftung im städtischen Umfeld.

Weiters wird die Praxis des manuellen oder automatisierten Öffnens von Fenstern in Erdgeschoßwohnungen aufgrund von Sicherheitsbedenken teilweise als unerwünscht angesehen. Hier ist die Klärung des Einbruchs- und Verletzungsrisikos sowie des Witterungsschutzes im Einzelfall notwendig.

Anwendung und Verfügbarkeit

Die Technologie wird bei allen Gebäudetypen (neu oder renoviert) und -größen angewandt und bezieht sich hauptsächlich auf den Leichtbau. Ein moderates Maß an Isolierung ist nach wie vor erforderlich. Es ist wichtig zu beachten, dass die Wirksamkeit von Ventilatoren und Komfortlüftung in verschiedenen Regionen von Faktoren wie Gebäudeplanung, Raumaufteilung, Grundriss, Größe, Innenhöhe und Öffnungseigenschaften abhängt. Die richtige Platzierung und Auswahl von Öffnungen und Ventilatoren sind entscheidend für die Optimierung der Leistung und die Gewährleistung einer effizienten Luftzirkulation. Mehrere Studien haben gezeigt, dass die Erhöhung der Raumluftzieltemperatur etwa 10 % der jährlichen Gesamtenergie pro °C für die Kühlung von HLK-Anlagen einsparen kann, wobei sich der HLK-Energieverbrauch in Industrieländern einem Anteil von 20 bis 30 % am Gesamtenergieverbrauch nähert. Komfortlüftung und erhöhte Luftbewegung kann sehr effektiv in Kombination mit anderen Technologien eingesetzt werden (Integration mit HLK- und passiven Systemen, intelligente Steuerung und Automatisierung).

In den letzten Jahren haben Ventilatoren große Fortschritte in Bezug auf Energieeffizienz, Leistung, Ästhetik und Akzeptanz bei Planer:innen, Anwender:innen und Nutzer:innen gemacht. Diese neueren Modelle sind am Markt schnell und wettbewerbsfähig verfügbar. Der ASHRAE-Standard 216 (43) enthält eine Prüfmethode, die den Einsatz von Deckenventilatoren in der Gebäudeplanung fördert. Sie umfasst Datentabellen für die Auslegung von Ventilatoren sowie Planungswerkzeuge.

Vor- und Nachteile

- + kein/niedriger Energieverbrauch
- + günstig
- + geringer Platzbedarf bei Fensterlüftung und Ventilatoren zur Luftumwälzung
- + keine Lärmemissionen im Außenraum
- + keine Hitzeemissionen im Außenraum
- + keine Verwendung ökologisch bedenklicher Substanzen oder Materialien am Einsatzort
- + keine ökologisch nachteiligen Wirkungen am Einsatzort
- Einschränkungen der Anwendbarkeit von Fensterlüftung durch mangelnde Außenluftqualität oder hohen Lärmpegel
- schwierigere Abschätzung der Kühlwirkung von Komfortlüftung
- beschränkte Kühlwirkung von erhöhter Luftbewegung durch Zugluftempfinden bzw. von Komfortlüftung durch Abhängigkeit von den thermischen Außenluftbedingungen, daher in manchen Fällen Zusatzkühlung notwendig
- nachträglicher Einbau von Lüftungsanlagen durch Platzbedarf schwierig

1.6.4 Literaturhinweise

- Demnächst veröffentlichter Ratgeber des BMK zu Kühlmaßnahmen mit Hinweisen zu persönlicher Komfortsteigerung ohne Kühlung: Holzer P, Wimmer F, Hackl LM, Peer T und Czarnecki P [unveröffentlicht]. Ratgeber klimaaktiv Kühlen. Empfehlungen für Wohnungen und Immobilien aller Art. Wien: BMK.
- Attia S, Levinson R, Ndong E, Holzer P, Berk Kazanci O, Homaei S, Zhang C, Olesen BW, Qi D, Hamdy M, Heiselberg P. Resilient cooling of buildings to protect against heat waves and power outages: Key concepts and definition. *Energy and Buildings*. 2021; 239: 110869. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110869>
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE Handbook – Fundamentals. ASHRAE; 2021.
- Givoni B. *Climate Considerations in Building and Urban Design, Man, Climate and Architecture*. Wiley; 2. Aufl., 1998. ISBN: 978-0-471-29177-0
- Lechner N. *Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects*. John Wiley & Sons; 2015.
- Wandre R, Gaddi FA, Dongre V, Hasija S, Ullah, I. Exploration of the factors affecting the performance of the ceiling fan: A brief review. *IOP Conference Series: Material Science Engineering*. 2022; 1259: 012025. doi:10.1088/1757-899X/1259/1/012025

1.7 Mikrokühlung und individuelle Komfortregelung

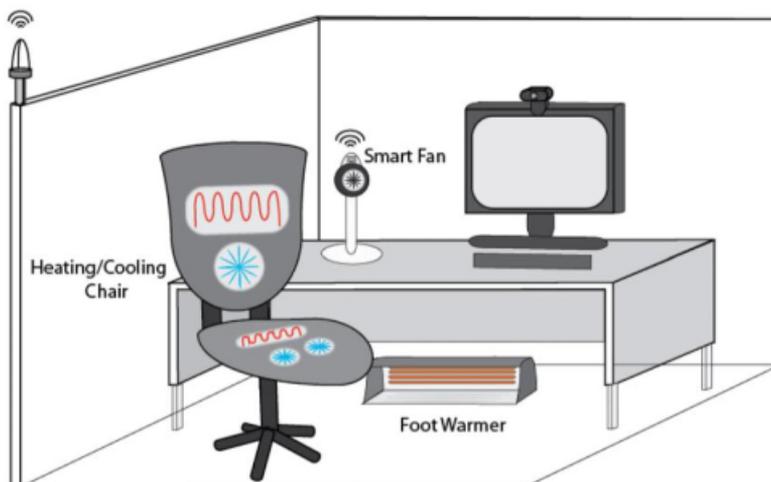
Die Relevanz dieser Technologie zur Komfortverbesserung wird in Österreich als niedrig bis mittel eingeschätzt.

Dieses Technologieprofil basiert auf dem einschlägigen Profil 4.2 *Micro-Cooling and Personal Comfort Control* des IEA EBC Annex 80 Resilient Cooling Projekts (1).

1.7.1 Beschreibung

Ein Personal Comfort System (PCS, „Persönliches Komfortsystem“) oder Personalised Environmental Control System (PECS, „personalisiertes Umgebungskontrollsystem“) ist eine Steuerungseinrichtung, die dazu dient, den/die Nutzer:in oder seine/ihre unmittelbare Umgebung (Mikroumgebung) zu klimatisieren, ohne die unmittelbare Umgebung anderer Anwesender zu beeinträchtigen. PCS können mit Heiz-, Kühl- und sogar Lüftungsfunktionen (für Frischluft) ausgestattet sein. Einige Beispiele für PCS für Heiz-/Kühlzwecke sind in Abb. 7 ersichtlich. Verschiedene PCS mit Kühlfunktion werden im Folgenden näher erläutert, wobei die in Österreich gängigsten Technologien zur Kühlung verschiedene Arten von Ventilatoren (Tisch-, Deckenventilatoren) umfassen. Die anderen angeführten Technologien werden zwar in der wissenschaftlichen Literatur diskutiert, stellen momentan aber noch Nischenprodukte dar.

Abb. 7: Beispiele für PCS mit Heiz- und/oder Kühlfunktion: beheizbarer/kühlbarer Stuhl, Fußwärmer, Tischventilator (44).



PCS-Geräte mit Kühlfunktion können folgende Technologien beinhalten:

- Deckenventilatoren mit vertikaler Achse und Wandventilatoren mit horizontaler Achse (diese fest installierten Ventilatoren unterscheiden sich von den reinen PCS-Geräten dadurch, dass sie mit einer vorgeschriebenen zentralen Regelung oder mit einer Gruppen- oder Einzelregelung betrieben werden können)
- Kleine Tischventilatoren oder Standventilatoren

- Möbelintegrierte Lüftungsdüsen
- Geräte, die Ventilatoren mit Vernebelung/Verdunstungskühlung kombinieren
- Gekühlte Stühle mit gekühlten wärmeabsorbierenden Oberflächen
- Gekühlte Tischoberflächen
- Mikroklimageräte am Arbeitsplatz mit individueller Belüftung, teilweise mit Phase Change Material (PCM)-Speicher
- Flächenkühlungen (diese werden derzeit weniger für PCS als für den Abtransport der Wärmelast im Raum verwendet)
- Wärmeleitende Kleidungsstücke
- Unterschiedlich isolierende Wirkung von Kleidung: flexible Kleiderordnung, Stoffe mit variabler Porosität

PCS-Geräte bieten einerseits einen Nutzen hinsichtlich des persönlichen Komforts und andererseits hinsichtlich des Energieverbrauchs. Da sie personalisiert sind, ermöglichen diese Geräte den Nutzer:innen, ihre direkte Umgebung thermisch zu regeln und so an ihre individuellen Komfortbedürfnisse anzupassen. Wenn es darüber hinaus in der Lage ist, während der Kühlperiode bei einer Raumtemperatur von mehr als 26 °C (40) das gleiche Maß an Komfort und Arbeitsproduktivität zu erzeugen, können weitere Energieeinsparungen erzielt und somit die Belastung des Energiesystems verringert werden. Ein ähnlicher Effekt kann bei niedrigeren Raumtemperaturen während der Heizperiode erzielt werden, wenn das PCS mit einem Heizelement ausgestattet ist.

1.7.2 Technologiespezifische Eigenschaften

Die folgenden Indikatoren können zur Bewertung von PCS herangezogen werden (45):

Temperaturbezogene Parameter

- **Klimamesspuppenbasierte Ganzkörper-Äquivalenttemperaturdifferenz (ΔT_{eq}) [K]**. Der mithilfe einer thermischen Gliederpuppe/Klimamesspuppe quantifizierte PCS-Kühleffekt. Dieser Indikator gibt die homogene Temperatur eines fiktiven Raumes mit einheitlichen Bedingungen an, in dem eine Person dieselbe Wärmemenge abgibt wie in der tatsächlichen Umgebung mit nicht einheitlichen Bedingungen (46) (47). Es ist zu beachten, dass die Ganzkörper-Äquivalenttemperaturdifferenz nicht immer die Gesamtwirkung auf das thermische Empfinden widerspiegelt, welches durch thermoregulatorische Prozesse wie die Blutzirkulation in den Extremitäten beeinflusst wird. Auch die Verdunstungskälte ist nicht immer berücksichtigt (45).
- **Korrekturleistung [K]**. Das Ausmaß, in dem ein PCS-System die Umgebungstemperatur in Richtung Neutralität "korrigieren" kann. Es ist definiert als die Differenz zwischen zwei Umgebungstemperaturen, bei denen einmal ohne PCS und einmal mit PCS das gleiche Temperaturempfinden erreicht wird (48).

Energiebezogene Parameter

- **Energieverbrauch [W]**. Leistungsaufnahme.

- **Corrective Energy and Power (CEP) [W/K]**. Verhältnis zwischen Leistungsverbrauch und Korrekturleistung (49).
- **Leistungszahl oder Coefficient of Performance (COP) [-]**. Verhältnis zwischen Ganzkörper-Wärmeverlust und Leistungsaufnahme des Systems (50).
- **Schadstoffbezogene Parameter**
- **Lüftungseffektivität (ϵ_v oder η_a) [-]**. Verhältnis zwischen tatsächlich abgeführter Schadstoffmenge und maximal durch Lüftung abführbarer Schadstoffmenge (51).
- **Effizienz der persönlichen Expositionsreduktion (ϵ_p) [-]**. Verhältnis zwischen tatsächlich vermiedener Menge an Schadstoffen, die ein/e Nutzer:in von individueller Lüftung inhaliert, bezogen auf die maximal durch individuelle Lüftung vermeidbare Schadstoffmenge (51).

Wenn das PCS beispielsweise eine Korrekturleistung von ± 2 K hat und die resultierende Innentemperatur ohne PCS 28 °C beträgt, kann die Bewertung relativ zu einer Innentemperatur von 26 °C erfolgen. In der Literatur wurden für die Kühlung Korrekturleistungswerte bis zu 3 (Kühlung durch frontale Luftdüsen) und 5 (Deckenventilatoren und gekühlte Stühle) ermittelt (48). Der elektrische Leistungsverbrauch für die Kühlung beträgt bis zu 80 W (45).

1.7.3 Anwendung

Wirkung im Gebäude

PCS verbessern den thermischen Komfort. Ein System das mit sauberer Luft versorgt wird kann darüber hinaus die Raumluftqualität verbessern und das Risiko von Infektionen durch die Luft verringern (52). Außerdem ermöglichen PCS Energieeinsparungen im HLK-System, wenn der Toleranzbereich der Raumtemperatur breiter gewählt werden kann. Hier sind Einsparungen des gesamten HLK-Energieverbrauchs um etwa 10 % pro K Raumtemperatur-Sollwertveränderung möglich (53) (54). PCS sind nicht nur als alleiniges HLK-System, sondern auch als Zusatz zu existierenden HLK-Systemen geeignet. Sie sind mit jeder anderen Gesamtvolumen-Konditionierungsstrategie (z. B. Mischlüftung, Verdrängungssysteme - und Strahlungssysteme) kompatibel, aber das Zusammenspiel, d. h. die Regelung, ist teilweise nach Situation unterschiedlich und bedarf weiterer Untersuchungen.

Verfügbarkeit

PCS variieren in ihrem Aufbau und ihrer Funktionalität, z. B. sind sie multifunktional oder nur auf Heiz-, Kühl- oder Lüftungsfunktionen beschränkt. Obwohl es bereits kommerziell erhältliche Produkte gibt, ist diese Technologie noch nicht so ausgereift wie einige andere Technologien, wie etwa die Kompressionskälte.

Vor- und Nachteile

- + Einsparungen im HLK System möglich
- + kann Flexibilität des HLK erhöhen
- + keine Lärmemissionen im Außenraum
- + keine Hitzeemissionen im Außenraum
- + keine ökologisch nachteiligen Wirkungen am Einsatzort
- noch nicht breit verfügbar
- bei Nutzung von PCM: einige PCM sind toxisch, brennbar und/oder umweltbedenklich
- wenig ausgereift

1.7.4 Literaturhinweise

- Kapitel 4: “Enhance personal comfort apart from space cooling” im Annex 80 State of the Art Review: Holzer P, Stern P, Akander J, Ai Z, Arens E, Arghand T, Attia S, Bogatu D-I, Breesch H, Cehlin M, Chiesa G, Chtioui F, Elnagar E, Hayati A, Heiselberg P, Javed S, Kazanci O, Kolokotroni M, Lemort V, Levinson R, Zinzi M. International Energy Agency EBC Annex 80 - Resilient Cooling of Buildings - State of the Art Review. 2022.
- Kapitel 4.3: “Enhance personal comfort apart from space cooling: Personal comfort system” im Reviewartikel über resiliente Kühlstrategien des Annex 80: Zhang C, Kazanci OB, Levinson R, Heiselberg P, Olesen BW, Chiesa G, Sodagar B, Ai Z, Selkowitz S, Zinzi M, Mahdavi A, Teufl H, Kolokotroni M, Salvati A, Bozonnet E, Chtioui F, Salagnac P, Rahif R, Attia S, Lemort V, Elnagar E, Breesch H, Sengupta A, Wang LL, Qi D, Stern P, Yoon N, Bogatu D-I, Rupp RF, Arghand T, Javed S, Akander J, Hayati A, Cehlin M, Sayadi S, Forghani S, Zhang H, Arens E, Zhang G. Resilient cooling strategies – A critical review and qualitative assessment. *Energy and Buildings*. 2021; 251: 111312. doi:10.1016/j.enbuild.2021.111312
- Zu erwartende Publikationen des IEA EBC Annex 87 – Energy and Indoor Environmental Quality Performance of Personalised Environmental Control Systems auf der Projektwebseite unter <https://annex87.iea-ebc.org/>
- Rawal R, Schweiker M, Kazanci OB, Vardhan V, Jin Q, Duanmu L. Personal comfort systems: A review on comfort, energy, and economics. *Energy and Buildings*. 2020; 214: 109858. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109858>
- Kim J, Bauman F, Raftery P, Arens E, Zhang H, Fierro G, Andersen M, Culler D. Occupant comfort and behavior: High-resolution data from a 6-month field study of personal comfort systems with 37 real office workers. *Building and Environment*. 2019; 148: 348-360. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.012>
- Melikov AK. Advanced air distribution: Improving health and comfort while reducing energy use. *Indoor Air*. 2016; 26 (1): 112–124. <https://doi.org/10.1111/ina.12206>
- Zhang H, Arens E, Zhai Y. A review of the corrective power of personal comfort systems in non-neutral ambient environments. *Building and Environment*. 2015; 91: 15-41. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.013>
- Veselý M, Zeiler W. Personalized conditioning and its impact on thermal comfort and energy performance - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014; 34: 401–408. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.024>
- Melikov A K. Personalized ventilation. *Indoor Air. Supplement 2004*; 14 (SUPPL. 7): 157–167. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00284.x>

2 Physikalischer Wärmeentzug aus Innenräumen

2.1 Lüftungskühlung

Die Relevanz der Nachtlüftung zur Gebäudekühlung wird in Österreich als hoch eingeschätzt, jene der Tageslüftung als niedrig.

Dieses Technologieprofil basiert auf dem einschlägigen Profil *3.1 Ventilative Cooling* des IEA EBC Annex 80 Resilient Cooling Projekts (1).

2.1.1 Beschreibung

Unter Lüftungskühlung („ventilative cooling“, VC) versteht man die Nutzung der Kühlkapazität eines Außenluftstroms mittels Belüftung, um die Kühllasten und/oder den Energieverbrauch durch mechanische Kühlung in Gebäuden zu reduzieren oder sogar gänzlich zu eliminieren und gleichzeitig eine behagliche thermische Umgebung zu gewährleisten. Es ist wichtig, zwischen Lüftungskühlung und Komfortlüftung zu unterscheiden. Im Gegensatz zu persönlichen Komfortsystemen (PCS), die eine Komfortlüftung beinhalten und in Kapitel 1.6 und 1.7 näher beschrieben werden, bezieht sich die Lüftungskühlung auf Gesamtvolumensysteme, die ganze Innenräume konditionieren. Persönliche Komfortsysteme (PCS) hingegen konditionieren nur die unmittelbare Umgebung der Nutzer:innen.

Bei der Lüftungskühlung wird das Kühlpotential und das Temperaturempfinden der kühlen Außenluft genutzt, wobei die Antriebskraft des Luftstroms entweder natürlich, mechanisch oder eine Kombination aus beiden sein kann. Die gebräuchlichste Technik ist die Erhöhung der Luftstromraten bei Tageslüftung und/oder Nachtlüftung.

- Bei der **Tageslüftung** wird tagsüber ein Außenluftstrom durch das Gebäude geleitet. Dadurch wird der thermische Komfort der Nutzer:innen durch Konvektions- und Verdunstungswärmeabgabe verbessert. Nur bei mäßigen Außentemperaturen kann die Tageslüftung auch Wärme aus den Innenräumen abführen.
- Bei der **Nachtlüftung** wird die in der thermischen Masse des Gebäudes gespeicherte Wärme während der Nacht durch Lüftung abgeführt.
- **Natürliche (oder freie) Lüftung** tritt auf, wenn natürliche Kräfte wie Wind und Auftrieb kühle Außenluft durch ein Gebäude treiben. Es wird also keine Energie verbraucht. Die Anforderungen an die Steuerung des Luftdurchsatzes sind gering und die Systeme sind technisch relativ einfach (z. B. manuelles oder automatisches Öffnen der Fenster).
- **Mechanische Lüftung** benötigt Energie, um Außenluft durch ein Gebäude zu treiben. Die mechanische Lüftung stellt höhere Anforderungen an die Steuerung und erfordert daher eine genaue Planung. Sie wird im Wohnbereich auch als „kontrollierte Wohnraumlüftung“ bezeichnet und durch raumluftechnische Anlagen (RLT-Anlagen) bereitgestellt.

Hybride Systeme kombinieren natürliche und mechanische Lüftung. Nähere Informationen zu den verschiedenen Arten der freien und mechanischen Lüftung können Kapitel 2.8.1 entnommen werden.

Die verschiedenen Lüftungsstrategien können auch tageszeitenabhängig eingesetzt werden. Beispielsweise sorgt insbesondere in Bürogebäuden eine mechanische Lüftung tagsüber für eine gute Raumluftqualität und kann zur Reduktion der Kühllast beitragen. Während der Nachtstunden kann natürliche Belüftung die Kühlkapazität des Gebäudes erhöhen, ohne zusätzlich Energie zu verbrauchen. Der Einsatz verschiedener Lüftungskonzepte ist jedoch nicht nur auf Bürogebäude beschränkt.

2.1.2 Technologiespezifische Eigenschaften

Die Art des installierten Belüftungssystems und die Regelungsstrategie der Belüftung hängen hauptsächlich von den Regelungsanforderungen, den klimatischen Bedingungen, den Installations- und Betriebskosten, den Gebäude- und Standortmerkmalen und den thermischen Lasten ab. Die Wirksamkeit von Belüftungsstrategien ergibt sich hauptsächlich aus den verfügbaren Wärmesenken (Außenlufttemperatur) mit ausgeprägten Temperaturgradienten zwischen Innen- und Außenbereich und der Kopplung zwischen thermischer Masse und Wärmesenke.

Hybride Systeme sind der am häufigsten eingesetzte Systemtyp für Lüftungskühlung, und der Einsatz mechanischer Ventilatoren zur Ergänzung eines passiven Systems sollte nach Möglichkeit in Betracht gezogen werden. Eine Kombination aus automatischer und manueller Steuerung scheint die anpassungsfähigste und zuverlässigste Lösung zu sein, um ein gut funktionierendes und für die Nutzer:innen zufriedenstellendes System zu schaffen.

Die wichtigsten technischen Eigenschaften sind:

- **Thermische Speicherkapazität des Gebäudes [J/K]**, d. h. die Fähigkeit des Gebäudes, Wärme aufzunehmen, zu speichern und abzugeben. Sie wird berechnet, indem die Wärmekapazitäten aller (internen und externen) Gebäudeelemente, die in direktem thermischem Kontakt mit der Innenluft des betrachteten Bereichs stehen, addiert werden (55). Die thermische Masse beeinflusst die Nutzbarkeit verschiedener Lüftungskühlstrategien, indem sie den Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Innentemperaturen bestimmt.
- Die **Leistungszahl (Energy Efficiency Ratio, EER) [-]** kommt eigentlich aus der Kältetechnik, kann aber auch für andere Kühlsysteme definiert werden. Sie beschreibt das Verhältnis zwischen der Nettokühlleistung und der effektiven Leistungsaufnahme mechanischer Lüftungskühlsysteme (56).
- Die **saisonale Leistungszahl (Seasonal Energy Efficiency Ratio, SEER) [-]** für mechanische Lüftungskühlsysteme drückt die Energieeffizienz des gesamten Systems aus und ist als die Verringerung des Kühlbedarfs während einer typischen Kühlsaison bezogen auf den Stromverbrauch definiert.
- Die **Kühlbedarfsreduktion (Cooling Requirements Reduction, CRR) [-1 bis +1]** drückt die Verringerung des Kühlbedarfs eines Szenarios (z. B. mit Lüftungskühlung) als Faktor im Vergleich zum Kühlbedarf des Referenzszenarios (z. B. ohne Lüftungskühlung) aus.
- **(Minimale) Lüftungsrate [1/h oder m³/h]**. Die minimale Lüftungsrate ist die minimale Außenluftstromrate, die erforderlich ist, um die Mindestluftqualität im Gebäude bei

mechanischen Belüftungssystemen zu gewährleisten. In Österreich kann hierfür die hygienische Luftwechselrate herangezogen werden, vgl. Kapitel 2.8.1.

- Die benötigte **spezifische Ventilatorleistung (specific fan power, SFP) [W]** zur Förderung des Luftstromes wird von der maximalen Lüftungsrate bestimmt. Die maximale Lüftungsrate bezeichnet jene Lüftungsrate, die das Lüftungssystem maximal bereitstellen kann. Je höher die maximale Lüftungsrate ist, desto höher ist die erforderliche spezifische Ventilatorleistung sowie der Energieverbrauch.

2.1.3 Anwendung

Wirkung im Gebäude

Lüftungskühlung kann einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion des Gebäudekühlenergiebedarfs und zur Verbesserung der thermischen Behaglichkeit in Innenräumen leisten. Das Ausmaß dieser Effekte hängt vom Außenklima, den Gebäudeeigenschaften, den internen Wärmequellen und schließlich von den erreichbaren Luftstromraten und dem Nutzer:innenverhalten ab. Hierbei ist das schwer vorherzusagende Nutzer:innenverhalten ein wichtiger Faktor, der die Leistung der Lüftungskühlung beeinflusst. Dieser Einfluss ist in passiven Niedrigenergiegebäuden noch kritischer.

Simulationsstudie Beispielgebäude

Zur weiteren Veranschaulichung der Wirkung verschiedener – vor allem sogenannter passiver – Kühltechnologien wurden vom Projektteam aufbauend auf den Ergebnissen und Modellen aus der Kältebedarfsberechnung für die Kältebedarfsmatrix Simulationsstudien mithilfe des Gebäudesimulationsprogrammes IDA ICE durchgeführt. Details zur Methodik der Simulationsstudien können dem Methodenteil (Kapitel 6.1.2) entnommen werden. Das verwendete Gebäudemodell enthält eine beispielhafte nach Südosten ausgerichtete Wohnung mit 140 m² Wohnnutzfläche im mittleren Geschoß (dem sog. Regelgeschoß) eines dreistöckigen Gebäudes. Der Fensteranteil an der Fassadenfläche beträgt 17 %, der U-Wert der Wand 1,5 W/(m²·K) und der U-Wert der Fenster 1,2 W/(m²·K). Der g-Wert der Verglasung beträgt 0,59 und der g_{tot} der Fenster ohne Verschattung (F_c = 1) folglich auch 0,59. Wird in dem Gebäude lediglich eine Nachtlüftung angewendet, kann der jährliche Kältebedarf gegenüber dem Fall, dass keine Nachtlüftung implementiert ist, um etwa 39 % reduziert werden. Dies entspricht einem spezifischen Wärmeentzug von 8,6 kWh pro m² Wohnnutzfläche und Jahr für dieses Beispielgebäude.

Grenzen

Die Umsetzung der Komfortlüftung ist mit Herausforderungen verbunden, die sich aus dem Mangel an exakten Informationen zur genauen Vorhersage der erforderlichen Kühllast sowie der Integration von Berechnungen der Energieleistung, Indikatoren und Kontrollsystemen ergeben. Darüber hinaus hängt die Wirksamkeit der Fensterlüftung vom Verhalten der Nutzer:innen ab, das von verschiedenen Faktoren wie Lebensstil, psychologischem Zustand, physiologischen Bedürfnissen und der Zugänglichkeit zu Fensteröffnungen beeinflusst wird. Folglich erweist sich die genaue Vorhersage des

Ausmaßes, in dem die natürliche Belüftung in der Praxis erfolgreich umgesetzt werden kann, als eine schwierige Aufgabe.

Das Vorhandensein eines hohen Außenlärmpegels in städtischen Gebieten stellt ein erhebliches Hindernis für die Umsetzung von natürlicher Wohnraumlüftung dar und ist von entscheidender Bedeutung, um das Potential für den wirksamen Einsatz von Belüftungsstrategien zu bewerten und das Risiko einzuschätzen, dass die Nutzer:innen die Fenster wegen Lärmbelästigung schließen, was die Wirksamkeit der Kühlung beeinträchtigt.

Luftschadstoffe wie Stickstoffdioxid (NO₂), Schwefeldioxid (SO₂), Kohlendioxid (CO₂), Ozon (O₃) sowie Schwebstoffe (PM) werden in größeren urbanen Gebieten in der Regel kontinuierlich überwacht. Diese Schadstoffe stellen ebenso erhebliche Hindernisse für die Umsetzung von Belüftungsstrategien dar. Die Bestimmung des Verhältnisses zwischen Innen- und Außenluftschadstoffen ist entscheidend für die Bewertung der Durchführbarkeit einer natürlichen Belüftung im städtischen Umfeld.

Weiters wird die Praxis des manuellen oder automatisierten Öffnens von Fenstern in Erdgeschoßwohnungen aufgrund von Sicherheitsbedenken teilweise als unerwünscht angesehen. Hier ist die Klärung des Einbruchs-, Witterungs- und Verletzungsschutzes im Einzelfall notwendig.

Mechanische Lüftungssysteme ermöglichen einen von Windgeschwindigkeit und Druckunterschieden unabhängigen Luftaustausch, sind standardmäßig automatisiert, verfügen über Schalldämpfer und Luftfilter und bieten sich darüber hinaus auch zur Integration aktiver Kühlsysteme zur Temperierung und Feuchteregulierung der Zuluft an. Allerdings sind mechanische Lüftungssysteme im Bestand aufgrund des Platzbedarfs für Lüftungskanäle häufig schwieriger umsetzbar.

Anwendung und klimatische Bedingungen

Lüftungskühlung ist für alle Arten und Größen von Gebäuden geeignet, hängt allerdings in hohem Maße vom Außenklima, dem Mikroklima um das Gebäude sowie dem thermischen Verhalten des Gebäudes ab. Sie ist eine weit verbreitete und effektive Lösung in gemäßigten Klimazonen sowie in Gebieten mit erheblichen Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht.

Bei Gebäuden mit hohen internen Gewinnen oder hohen solaren Gewinnen kann eine Kühlung auch bei niedrigen Außentemperaturen erforderlich sein. In diesem Fall kann die Außenluft zur Kühlung des Raums während des gesamten Tages verwendet werden. Dabei ist auf eine wirksame Drosselung des Luftstroms und eine zugluftfreie Luftzufuhr zu achten. Bei mechanisch angetriebenen Systemen kann die Kühlleistung durch Verringerung oder Erhöhung des Rückgewinnungsgrades gesteuert werden.

In Fällen, bei denen natürliche Lüftung zur Kühlung nicht ausreicht, können hybride Lösungen in Betracht gezogen werden: Diese können zeitlich hybrid sein, d. h. die mechanische Lüftung ersetzt oder ergänzt die freie Lüftung zu bestimmten Tages- oder Jahreszeiten; oder räumlich hybrid, d. h., mechanische Lüftung wird nur in einzelnen Räumen (z. B. Schlafzimmer) eingesetzt, während die anderen Räume ausschließlich durch freie Lüftung gekühlt werden.

Verfügbarkeit

Natürliche Belüftung durch Gebäudeöffnungen und andere passive Vorrichtungen ist in den meisten Fällen möglich. Mechanische Belüftungstechnologien und -lösungen sind für die meisten Anwendungsfälle ebenfalls leicht am Markt verfügbar.

Vor- und Nachteile

- + breite Palette an Lösungen am Markt

- + kein/geringer Energieverbrauch
- + freie Lüftung in allen Gebäuden einsetzbar
- + geringer Platzbedarf bei Fensterlüftung
- + gleichzeitige Erfüllung der Lüftungsfunktion (Versorgung mit Frischluft)
- + kostengünstig
- ohne aktive Kühlung der Zuluft begrenzte Leistungsfähigkeit
- in schadstoffbelasteten Gebieten ist freie Lüftung herausfordernd
- Platzbedarf für Lüftungskanäle mechanischer Lüftungssysteme in Bestandsbauten oft problematisch

2.1.4 Literaturhinweise

- Demnächst veröffentlichter Ratgeber des BMK zu Kühlmaßnahmen mit Hinweisen zu Nachtlüftung: Holzer P, Wimmer F, Hackl LM, Peer T und Czarnecki P [unveröffentlicht]. Ratgeber klimaaktiv Kühlen. Empfehlungen für Wohnungen und Immobilien aller Art. Wien: BMK.
- Kapitel 3.2: “Ventilative Cooling” im Annex 80 State of the Art Review: Holzer P, Stern P, Akander J, Ai Z, Arens E, Arghand T, Attia S, Bogatu D-I, Breesch H, Cehlin M, Chiesa G, Chtioui F, Elnagar E, Hayati A, Heiselberg P, Javed S, Kazanci O, Kolokotroni M, Lemort V, Levinson R, Zinzi M. International Energy Agency EBC Annex 80 - Resilient Cooling of Buildings - State of the Art Review. 2022.
- Publikationen und Deliverables aus dem IEA EBC Annex 62 „Ventilative Cooling“ unter <https://venticool.eu/information-on-annex-62/annex-62-home/>
- Psomas TC, Heiselberg PK, Duer K, Bjørn E. Control Strategies for Ventilative Cooling of Overheated Houses. CLIMA 2016: Proceedings of the 12th REHVA World Congress, 22-25 May 2016. 2016. https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/233719320/paper_198.pdf
- Yu T, Heiselberg PK, Lei B, Pomianowski MZ, Zhang C, Jensen RL. Experimental investigation of cooling performance of a novel HVAC system combining natural ventilation with diffuse ceiling inlet and TABS. Energy and Buildings. 2015; 105: 165-177. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.039>
- Yu T, Heiselberg P, Lei B, Pomianowski MZ, Zhang C. A novel system solution for cooling and ventilation in office buildings: A review of applied technologies and a case study. Energy and Buildings. 2015; 90: 142–155. doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.057
- Avantaggiato M, Belleri A, De Carli M, Lollini R. Ventilative cooling strategies to reduce cooling and ventilation needs in shopping centres. 36th AIVC Conference “Effective ventilation in high performance buildings”, Madrid, Spain, 23-24 September 2015. Madrid: AIVC; 2015. 633-644. <http://www.aivc.org/resource/ventilative-cooling-strategies-reduce-cooling-and-ventilation-needs-shopping-centres>
- Belleri A, Lollini R, Dutton SM. Natural ventilation design: An analysis of predicted and measured performance. Building and Environment. 2014; 81: 123-138. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.009>

2.2 Verdunstungskühlung

Die Relevanz dieser Technologie zur Gebäudekühlung wird in Österreich als niedrig eingeschätzt. Eine Ausnahme bildet die Nutzung indirekter Verdunstungskühlung in der Abluft-Wärmerückgewinnung, deren Relevanz als mittel eingeschätzt wird.

Dieses Technologieprofil basiert auf dem einschlägigen Profil 3.3 *Evaporative Cooling* des IEA EBC Annex 80 Resilient Cooling Projekts (1).

2.2.1 Beschreibung

Verdunstungskühlung ist eine passive hybride Kühltechnik, bei der die latente Verdunstungswärme von Wasser genutzt wird, um die Temperatur der von außen kommenden Luft zu senken. Es wird darauf hingewiesen, dass die klimatischen Bedingungen in Österreich ein geringes Potential für die Anwendung von Verdunstungskühlung begründen. Punktuell oder unter extremen Bedingungen kann diese Technologie jedoch in Erwägung gezogen werden, bzw. in Zukunft nach Änderung der klimatischen Bedingungen im Zuge des Klimawandels, weshalb sie hier der Vollständigkeit halber erläutert wird. Der einzige momentan nennenswerte Anwendungsbereich von Verdunstungskühlung ist die Abluftkühlung in Lüftungssystemen zur Erhöhung des Wirkungsgrades von Wärmerückgewinnung (Vorkühlung der Frischluft, s. die technologiespezifischen Eigenschaften weiter unten). Abgesehen davon können Verdunstungskühlsysteme in drei Kategorien unterteilt werden:

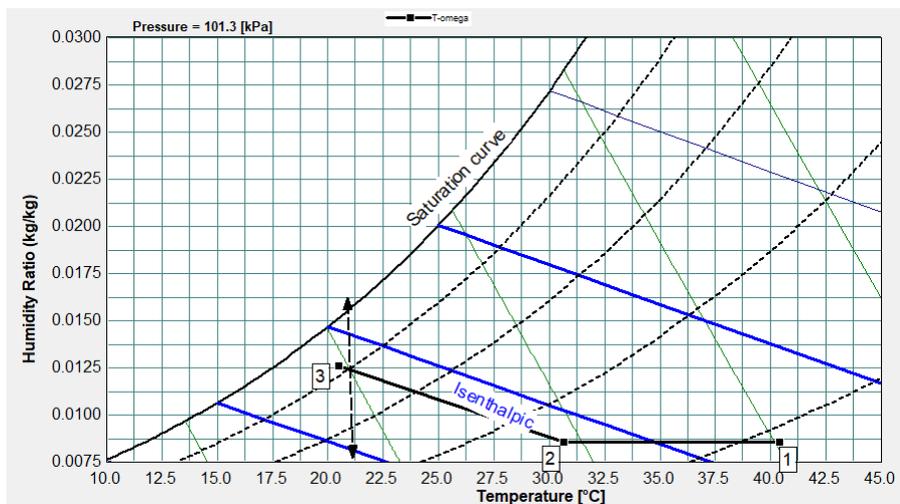
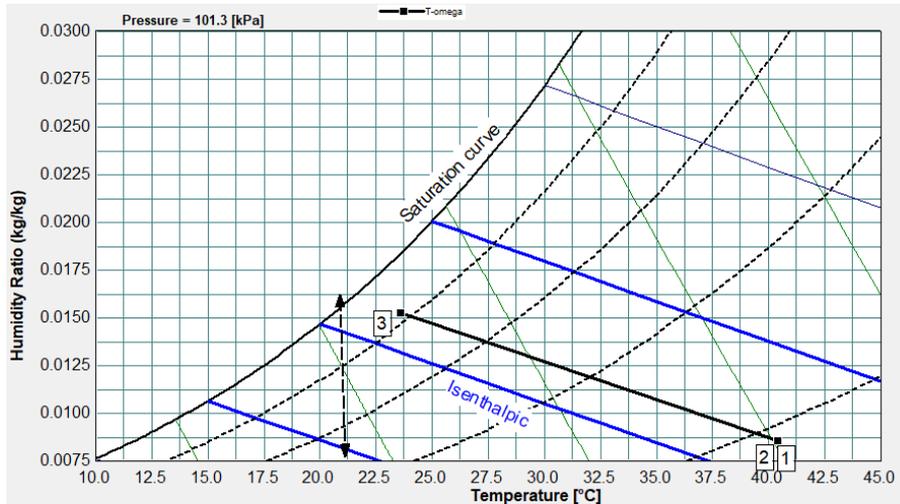
- direkte Verdunstungskühlung
- indirekte Verdunstungskühlung
- Passive Draught Evaporative Cooling (PDEC)

Thermodynamische Grundlagen der Verdunstungskühlung

Bei der Verdunstungskühlung findet ein Phasenwechsel des Wassers von flüssig zu gasförmig statt, was eine erhebliche Wärmemenge erfordert. Der Phasenwechsel erfolgt, im Vergleich zur Verdampfung, unterhalb der Verdampfungstemperatur. Diese Wärme wird der Umgebungsluft entzogen, wodurch deren Trockenkugeltemperatur sinkt. Die latente Wärme und der Feuchtigkeitsgehalt der Luft nehmen zu, während die Feuchtkugeltemperatur konstant bleibt. Der Prozess folgt einer Isenthalpen (also unter konstanter Enthalpie) in einem psychrometrischen Diagramm. Isenthalpe Kühlung bedeutet hierbei ein Kühlprozess ohne Enthalpieänderung im betrachteten System. Die Enthalpie ist ein Maß für die Gesamtenergie des Systems, die die innere Energie, den Druck und das Volumen umfasst.

Die beiden Grafiken in Abb. 8 zeigen ein zweistufiges System im Vergleich zu einem einstufigen Prozess mit reiner direkter Verdunstungskühlung. Die Daten für den zweistufigen Prozess stammen aus einer auf Messdaten beruhenden Studie (57).

Abb. 8: Psychrometrisches Diagramm der direkten Verdunstungskühlung (oben) und des zweistufigen indirekten/direkten Verdunstungskühlers (unten) (1).



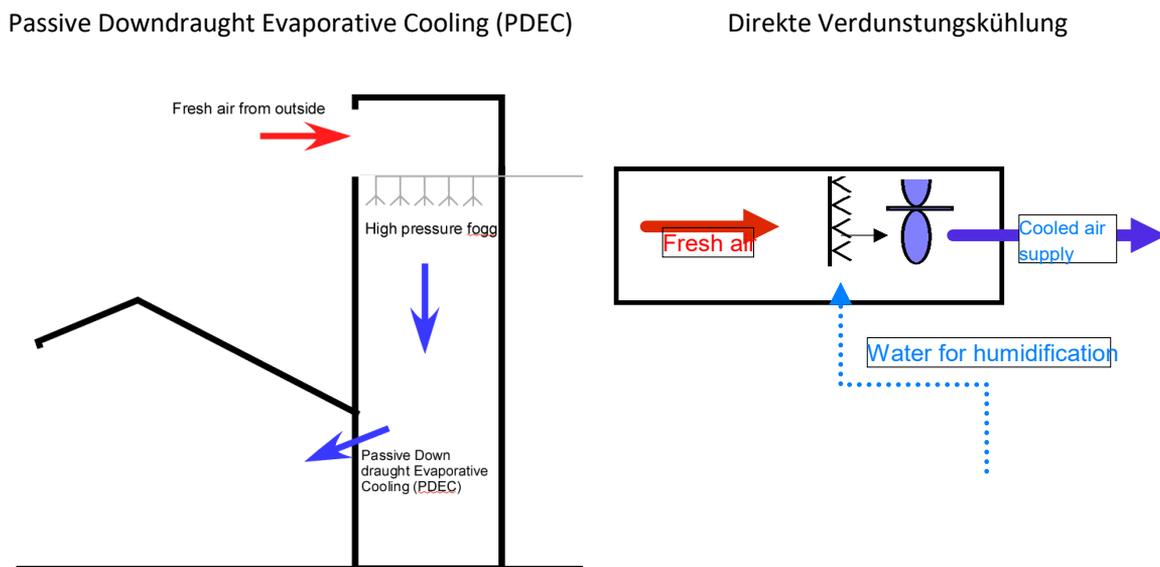
Befeuchtungsmechanismus

- **Sprühbefeuchtung:** Bei dieser Technik werden mit Hochdruckdüsen kontrollierte Mengen mikroskopisch kleiner Wassertröpfchen in die Luft gesprüht, wo die Tröpfchen verdampfen und so die Luft abkühlen. Auf diese Weise wird eine sehr hohe relative Luftfeuchtigkeit erreicht. Die Hochdruckdüsen benötigen Hochdruckpumpen und ein Leitungsnetz, um einen homogenen Tröpfchennebel zu erzeugen.
- **Verdunstung über befeuchteten Füllkörper oder Kontaktbefeuchtung:** Bei dieser Technik wird heiße und trockene Luft durch ein befeuchtetes Medium, z. B. eine Matte oder ein Netz, geleitet, wo sie Feuchtigkeit aufnimmt und sich abkühlt. Bei diesem Prozess ist die maximal erreichbare Luftfeuchtigkeit niedriger als bei der Sprühbefeuchtung.

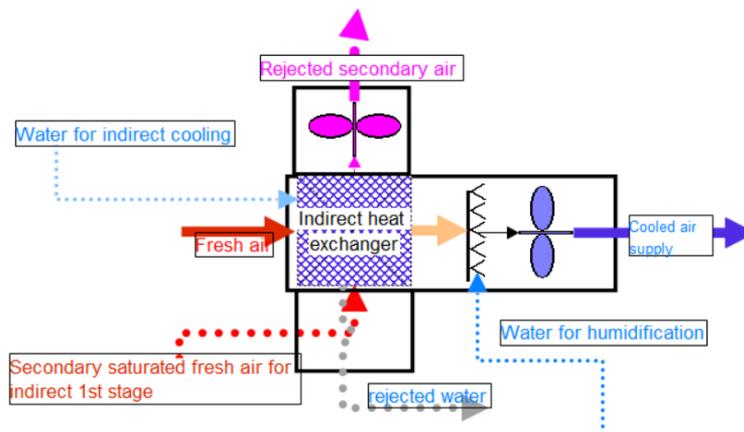
2.2.2 Technologiespezifische Eigenschaften

Wie anfangs erwähnt, können Verdunstungskühlungsprozesse in drei Kategorien eingeteilt werden (58) (59):

Abb. 9: Schematische Darstellung der drei gängigsten Verdunstungskühlprozesse (1).



Indirekte Verdunstungskühlung in einem zweistufigen Verdunstungskühlungsprozess



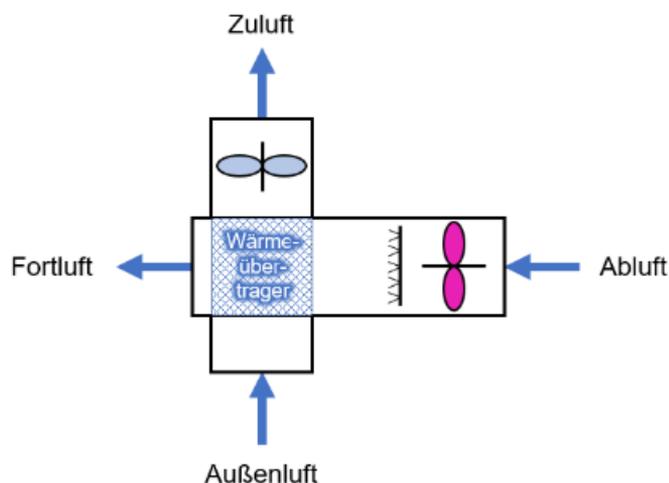
Bei der direkten Verdunstungskühlung wird Wasser direkt in den Raum versprüht, in der Regel mittels Kontaktbefeuchtung oder Hochdruckvernebelungssystemen, wodurch die Temperatur gesenkt und die Luftfeuchtigkeit erhöht wird. Unter indirekter Verdunstungskühlung wird die Befeuchtung und damit Kühlung von Zuluft mittels direkter Verdunstungskühlung und anschließende Verwendung zur Vorkühlung von Frischluft über einen Wärmeübertrager verstanden. Die zweistufige Verdunstungskühlung beschreibt Prozesse, bei denen die Zuluft über einen Wärmeübertrager mithilfe von Luft aus einem direkten Verdunstungskühlungsprozess gekühlt und in der zweiten Stufe selbst einem

direkten Verdunstungskühlungsprozess zugeführt wird. Zweistufige Systeme können Temperaturen unterhalb der Feuchtkugeltemperatur der Zuluft herstellen. (58)

Bei PDEC wird das Prinzip der direkten Verdunstungskühlung angewendet, wobei allerdings der Ventilator durch einen natürlichen Luftzug ersetzt wird. PDEC-Anlagen werden daher ähnlich wie Windtürme gebaut und kanalisieren ebenfalls aus der Bewegung der höher liegenden Umgebungsluftschichten einen natürlichen Luftzug. In den oben in den Turm eintretenden Luftstrom wird Wasser eingesprüht, sodass er am untenliegenden Austritt feuchter und kühler ist. Andererseits entsteht auch ohne Windantrieb von außen eine natürliche Konvektion, da die Luft im oberen Bereich des Turms gekühlt wird und so von alleine nach unten strömt. PDEC-Türme funktionieren besser, wenn die Luftgeschwindigkeit höher ist. Die so gekühlte Luft kann direkt für Lüftungszwecke genutzt werden. (60)

In Österreich ist jedoch momentan, wie eingangs erwähnt, allein die Nutzung indirekter Verdunstungskühlung zur Erhöhung des Wirkungsgrades in der Wärmerückgewinnung in Lüftungssystemen relevant. Die Wärmerückgewinnung in Lüftungssystemen dient während der Heizsaison der Vorwärmung und in der Kühleisaison der (Vor)Kühlung der Frischluft (Außenluft). Hierbei wird die Abluft, deren Temperatur näher an der gewünschten Raumlufttemperatur liegt, durch einen Wärmeübertrager geführt, an dem auf der anderen Seite die Frischluft durchgeleitet wird. Während der Kühleisaison kann der Abluftstrom durch Befeuchtung vor dem Wärmeübertrager weiter herabgekühlt werden, um dem zu kühlenden Frischluftstrom noch mehr Wärme zu entziehen und so den Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung zu erhöhen, vgl. Abb. 10.

Abb. 10: Indirekte Verdunstungskühlung in der Wärmerückgewinnung.



Im Folgenden werden wesentliche Kennzahlen für die Auslegung und Charakterisierung von Verdunstungskühlsystemen erläutert:

- **Sensible Kühllast [W]**. Die Dimensionierung eines Verdunstungskühlsystems sollte der sensiblen Kühllast des Gebäudes entsprechen.
- **Luftwechselrate pro Stunde (ACH) [1/h]**. Die empfohlene Luftwechselrate für Verdunstungskühlung liegt je nach Kühllast zwischen 6 und 20.

- **Feuchtkugeltemperaturabsenkung (ΔT) [°C]**. Diese Größe gibt die Differenz zwischen der Trockenkugel- und der Feuchtkugeltemperatur an und wird über ein psychrometrisches Diagramm bestimmt. Die Trockenkugeltemperatur ist jener gängige Wert, mit dem Lufttemperaturen gemessen und angegeben werden. Sie wird mit einem im Schatten installierten und direkt mit der Umgebungsluft in Kontakt stehenden Thermometer gemessen. Die Feuchtkugeltemperatur bezeichnet jene Temperatur, die bei einer gewissen Lufttemperatur (also Trockenkugeltemperatur) abhängig von der Luftfeuchtigkeit durch Verdunstung erreicht werden kann. Die Feuchtkugeltemperatur steigt also, je höher die Luftfeuchtigkeit bereits ist. Sie wird mit einem Thermometer gemessen, das mit einem mit Wasser gesättigtem Stoff umgeben ist und von einem Luftstrom umströmt wird.
- **Sättigungseffizienz [%]**. Die Sättigungseffizienz misst, wie effektiv die Luft während der Kühlung mit Feuchtigkeit gesättigt wird und wird als Prozentsatz ausgedrückt.
- Wasserverbrauch in Form der **Verdunstungsrate** oder dem **Wasserverbrauch für Nebelerzeugung [l/h]**.
- **Energieaufwand [W]**. Energie für Wasserversorgung, Hochdruckpumpe, Ventilatoren, Steuereinrichtungen.

2.2.3 Anwendung

Wirkung im Gebäude

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, wie der Kühlbedarf eines Gebäudes mithilfe von Verdunstungskühlung reduziert werden kann. Eine Methode ist die Verwendung von Niederdrucklüftern für die Luftzufuhr, wobei die Zuluft durch direkte Verdunstungskühlung in der Fassade gekühlt wird, anstatt herkömmliche HLK-Systeme mit Hochdruckkanälen und -komponenten einsetzen zu müssen. Eine andere Möglichkeit ist der Einsatz eines Vernebelungssystems mit Niedrigenergieventilatoren oder von PDEC. Diese Methoden weisen einen sehr niedrigen Energieverbrauch auf.

Beispielsweise kann ein PDEC-System die Innentemperatur um 5 bis 10 °C unter der Außentemperatur senken. Bei einer Außentemperatur von 37,8 °C kann ein gut konzipiertes PDEC-System dazu beitragen, die Innentemperatur bei 26,7 bis 32,2 °C zu halten. PDEC-Systeme erhöhen die relative Feuchtigkeit der Luft. Dieser Anstieg hält sich jedoch in der Regel in einem für die menschliche Gesundheit angenehmen und sicheren Rahmen (in der Regel unter 60 % relative Feuchte). Wenn die relative Luftfeuchtigkeit im Freien beispielsweise 20 % beträgt, kann ein PDEC-System die relative Luftfeuchtigkeit in Innenräumen auf etwa 40 – 50 % erhöhen. Die Kühlleistung eines PDEC-Systems hängt von Faktoren wie der Größe des Systems, dem Luftdurchsatz und der Qualität des benetzten Mediums (Filtermatten, Netze) ab. Ein Beispiel wäre ein PDEC-System mit einem Luftdurchsatz von 1.000 Kubikmetern pro Stunde und einer Kühlleistung von etwa 3 – 6 kW. PDEC-Systeme benötigen eine konstante Wasserzufuhr für die Verdunstung. Der Wasserverbrauch hängt von der Systemgröße und den Betriebsbedingungen ab. Ein mittelgroßes PDEC-System verbraucht etwa 38 – 76 Liter Wasser pro Stunde. Es ist hier anzumerken, dass die relative Luftfeuchtigkeit im Sommer in Österreich üblicherweise deutlich über 20 % liegt und der Einsatz dieser Technologie in Österreich momentan nicht sinnvoll ist.

Es ist darauf zu achten, dass auch die relative Luftfeuchtigkeit ein Komfortparameter ist. Idealerweise sollte in Innenräumen eine relative Luftfeuchtigkeit von 40 – 60 % eingehalten werden; und da die relative Luftfeuchtigkeit in den Sommermonaten in Österreich in oder über diesem Bereich liegt,

wird eher eine Entfeuchtung als eine Befeuchtung notwendig. Daher bietet sich für das hiesige Klima momentan lediglich die indirekte Verdunstungskühlung an, die bereits in der Wärmerückgewinnung eingesetzt wird.

Eine solche Wärmerückgewinnungsanlage mit indirekter Verdunstungskühlung im Abluftstrom kann beispielsweise bei einer Außentemperatur von 30 °C und einer Ablufttemperatur von 26 °C und relativen Luftfeuchte von 50 % eine Zulufttemperatur von 21,5 °C und eine Kühlleistung von 10,5 kW erreichen. Bei einer Ablufttemperatur von 28 °C und 50 % relativer Luftfeuchte liegt die erreichte Zulufttemperatur bei 22,5 °C sowie die Kühlleistung bei 9 kW. Liegt die relative Luftfeuchte bei 60 % (Ablufttemperatur immer noch 28 °C), wird eine Kühlleistung von 7,5 kW und Zulufttemperatur von 24 °C erreicht. Liegt die Außenlufttemperatur höher (bei 35 °C), werden bei einer Ablufttemperatur von 28 °C bei einer relativen Luftfeuchte von 60 % eine Zulufttemperatur von 25 °C und eine Kühlleistung von 12 kW erreicht. Diese Ergebnisse beziehen sich auf eine Anlage mit einem 0,7 x 0,7 x 0,7 m Kreuzstromwärmeübertrager mit einer Kanalhöhe von 4,5 mm, bei dem die Abluftseite mit Wasser benetzt ist, um die Wirkung der Verdunstungskühlung direkt am Wärmeübertrager zu nutzen. Der Zu- sowie Abluftvolumenstrom beträgt jeweils 1 m³/s. (61)

Anwendung und klimatische Bedingungen

Die Technologie der Verdunstungskühlung ist im Wesentlichen in extrem heißem Klimaten (ASHRAE-Klimazone: OB (62)), sehr heißen Klimaten (1B), heißen Klimaten (2B) und warmen Klimaten (3B) anwendbar; in Österreich ist das Potential daher im Moment eher beschränkt und nur während heißer und trockener Perioden bzw. nur sehr punktuell wirkungsfähig. In der Praxis wird die indirekte Verdunstungskühlung lediglich in der Wärmerückgewinnung von Lüftungsanlagen eingesetzt. Daneben wurden in den letzten Jahren vermehrt Sprühnebel duschen im öffentlichen Raum installiert, die eine solche kleinräumige Abkühlung verfügbar machen sollen.

Verfügbarkeit

In heißen und trockenen Klimazonen werden seit langem einfache direkte Verdunstungskühler (Swamp Coolers) verwendet. Fortschrittlichere Systeme wie die zweistufige Verdunstungskühlung sind erst in den letzten 30 Jahren entstanden. Inzwischen gibt es eine Reihe von Herstellern von Verdunstungskühlsystemen für den Hausgebrauch oder für größere HLK-Anlagen, die entweder als freistehende Geräte ausgeführt sind oder in das Gesamtsystem integriert werden. Der Einsatz von Verdunstungskühlung kann sowohl bei Neubauten als auch bei der Sanierung erfolgen.

Grenzen und Risiken

Wasserqualität

Hochdrucknebelssysteme weisen sehr kleine Düsenaustrittsöffnungen auf, weshalb auf die Wasserqualität zu achten ist. Eine angemessene Wasseraufbereitung ist vorzusehen.

Legionellen

Bei ungewollter Wasserrezirkulation und vor allem stehendem Wasser besteht die Gefahr der Entwicklung von Legionellen. Das System ist entsprechend zu planen, um Rezirkulation und stehendes Wasser zu vermeiden.

Vor- und Nachteile

- + geringer Energieverbrauch
- beschränkte Leistung, da nur bei geringer Luftfeuchtigkeit effektiv
- ausreichende Wasserverfügbarkeit und-qualität nötig

- Gefahr der Bildung von Legionellen im Verdunstungswasser

2.2.4 Literaturhinweise

- Amer O, Boukhanouf R, Ibrahim H. A Review of Evaporative Cooling Technologies. *International Journal of Environmental Science and Development*. 2015; 6: 111. 10.7763/IJESD.2015.V6.571
- Kapilan N, Isloor AM, Karinka S. A comprehensive review on evaporative cooling systems. *Results in Engineering*. 2023; 18: 101059. doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101059
- Tejero-González A, Franco-Salas A. Optimal operation of evaporative cooling pads: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021; 151: 111632. doi.org/10.1016/j.rser.2021.111632
- Hui SCM, Cheung WY. Two-stage evaporative cooling systems in hot and humid climate. *Proceedings of the Tianjin-Hong Kong Joint Symposium 2009, 29-30 Jun 2009, Tianjin, China*. 2009. 64-76.
- Ford B, Wilson R, Gillott M, Ibraheem O, Salmeron J, Sanchez FJ. Passive downdraught evaporative cooling: performance in a prototype house. *Building Research & Information*. 2012; 40 (3): 290-304. 10.1080/09613218.2012.669908

2.3 Sky Radiative Cooling

Die Relevanz dieser Technologie zur Gebäudekühlung wird in Österreich als niedrig eingeschätzt.

Dieses Technologieprofil basiert auf dem einschlägigen Profil 3.4 *Sky Radiative Cooling* des IEA EBC Annex 80 Resilient Cooling Projekts (1).

2.3.1 Beschreibung

Sky Radiative Cooling (oder auch Radiative Sky Cooling) ist ein passiver Kühlprozess, bei dem Wärmeabgabe mittels langwelliger Strahlung genutzt wird. Es wird vor allem in der Nacht eingesetzt, wenn keine zusätzliche Wärme durch einfallende Sonnenstrahlung anfällt. Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit und Wolken sind weitere Einflussfaktoren, die das Strahlungskühlungspotential beeinflussen. Eine Außenlufttemperatur, die höher ist als die Temperatur des Objekts, verringert das Nettokühlpotential, während eine niedrigere Temperatur es erhöht. Je höher die Außenlufttemperatur, desto niedriger das Nettokühlpotential. Ebenso wird das Kühlpotential in heißen und feuchten Umgebungen und durch Wolken, die Infrarotstrahlung einfangen können, verringert.

Das Gebäudedach kann direkt als Radiator genutzt werden, d. h. als das Objekt, das Wärme abstrahlt. Zu diesem Zweck können kühle Farben, Ziegel und Beschichtungen verwendet werden, um das Reflexions- und Emissionsvermögen des Daches zu erhöhen. Dachteiche und bewegliche Dämmsysteme stellen Lösungen dar, die das Nettokühlpotential durch Verdunstungskühlung bzw. die Verringerung des Wandwiderstands des Strahlers weiter erhöhen können. Für weitere Einzelheiten zu letzteren beiden Systemen wird auf die Kapitel 1.2 Kühle Hüllmaterialien und 2.7 Natürliche Wärmesenken verwiesen.

Sky Radiative Cooling kann auch mithilfe eines Wärmeträgermediums wie Luft oder Wasser betrieben werden. Das Wärmeträgermedium wird durch einen Radiator zirkuliert. Der Radiator ist ein Objekt mit einer strukturierten Oberfläche (z. B. gewellte Metallbleche), um so die Strahlungsoberfläche zu vergrößern, und einem System von Rohren und Kanälen, die über eine wärmeleitende Schicht mit der Oberfläche des Radiators verbunden sind. Bei luftbasierten Systemen wird ein Radiator mit Luftkanälen verwendet, der normalerweise auf dem Dach angebracht ist und so die durchströmende Luft vorkühlt. Bei einigen Anwendungen wird das Dach direkt als Radiator verwendet. Diese Systeme verfügen über Ventilatoren zum Transport der Luft. Die Luft kann direkt in die Innenräume geleitet werden, oder der Radiator kann mit einer Klimaanlage gekoppelt werden, um deren Leistung zu verbessern (63). Wasserbasierte Systeme erzeugen kaltes Wasser, indem sie es durch den Radiator zirkulieren. Das gekühlte Wasser kann direkt genutzt oder zur späteren Verwendung gespeichert werden. Diese Systeme sind mit Wärmepumpen zur Verbesserung ihrer Leistung (13) oder mit Bauteilaktivierungen zur direkten Temperierung der Innenräume kombinierbar (64). Solarthermieanlagen und Solarhybridkollektoren (PV/T) werden häufig als wasserbasierte Radiatoren verwendet, wodurch sich ihr Nutzungsfaktor erhöht (65).

2.3.2 Technologiespezifische Eigenschaften

Bei der Auswahl des Radiators unter dem Hauptzweck, das Strahlungskühlungspotential zu maximieren, sind die technischen Eigenschaften des Radiators – Emissionsgrad und Reflexionsgrad – von Bedeutung. Für einen idealen Radiator wird ein maximaler Reflexionsgrad im kurzwelligen Bereich (0,25 - 2,8 μm) angestrebt, um die Sonnenstrahlung zu reflektieren, während der Emissionsgrad

insbesondere im Bereich des atmosphärischen Fensters (8 – 13 μm) möglichst nahe bei 1 und ansonsten bei 0 liegen sollte.

Wichtige Auslegungsparameter sind die Fläche, die Ausrichtung und die Neigung des Radiators. Eine horizontale Ausrichtung verbessert die Strahlungskühlung gegen Himmel, setzt aber den Radiator der direkten Sonneneinstrahlung am längsten aus. Eine von der Sonne weg gerichtete Orientierung bringt das höchste Kühlpotential mit sich. Stellt die Kühlung jedoch einen Nebennutzen dar, z. B. beim Einsatz von PV/T für die Erzeugung von Strom, Heizung und Kühlung, dann sollten die Neigung und die Ausrichtung entsprechend der Hauptfunktion der Anlage oder dem höchsten Bedarf (Strom, Wärme oder Kühlung) gewählt werden.

Eine häufig untersuchte Anwendung von Sky Radiative Cooling ist die Verwendung von Solarkollektoren und Solarhybridkollektoren (PV/T) für die Erzeugung von Kaltwasser. Polyethylenfolien auf den Modulen verringern den konvektiven Wärmeverlust (65). Bei diesen Systemen sollten auch auf den Betrieb bezogene Auslegungsparameter berücksichtigt werden, wie zum Beispiel die Durchflussmenge des Wärmeträgermediums und die Speichergröße.

Die folgenden Indikatoren können verwendet werden, um die Leistung einer Sky Radiative Cooling-Anlage zu bewerten:

- **Spezifische Kühlleistung [W/m^2]**. Das Verhältnis zwischen der durchschnittlich erzielten Kühlleistung und der Fläche des Radiators oder Systems.
- **Leistungszahl (EER) [-]**. Das Verhältnis zwischen der für die Umwälzung des Wärmeträgers verbrauchten Leistung und der erzeugten Kühlleistung.
- **Deckungsgrad [-]**. Der Anteil der Kühllast, der durch die vom Radiator erzeugte Nettokühlleistung abgedeckt wird.

Aus der Literatur geht hervor, dass bei der Verwendung von wasserbasierten Radiatoren (hauptsächlich PV/T-Anlagen und unverglaste Solarkollektoren) je nach Klima eine durchschnittliche Kühlleistung zwischen 23 und 120 W/m^2 (66) (67) (68) (69) (70) erzielt werden kann. Je höher der Temperaturunterschied zwischen Rücklauf Temperatur aus dem Kälteabgabesystem (also Eintrittstemperatur in den Kollektor) und Außenlufttemperatur, desto höher ist die Kühlleistung: bei einer Temperaturdifferenz von 30 $^{\circ}\text{C}$ liegt die Kühlleistung bei etwa 120 W/m^2 (66). Beispielsweise erreicht ein PV/T-Kollektor in der Nacht bei Außentemperaturen zwischen 15 und 20 $^{\circ}\text{C}$ eine Kühlleistung zwischen 30 und 45 W/m^2 und eine Spreizung von 3 – 6 $^{\circ}\text{C}$, wodurch eine Kaltwassertemperatur von zwischen 11 und 19 $^{\circ}\text{C}$ erreicht werden kann (66). Die erreichbaren Kaltwassertemperaturen hängen hauptsächlich von der Außenlufttemperatur sowie auch anderen atmosphärischen Bedingungen, wie etwa Luftfeuchtigkeit und Bewölkung ab. Sky Radiative Cooling ist durch hohe Leistungszahlen, die bei PV/T-Anlagen Werte von bis zu 30 erreichen können, charakterisiert (66). Bei verglasten Solarkollektoren rührt der Energieverbrauch ausschließlich von der Umwälzung des Wärmeträgermediums her (z. B. Pumpleistung). Die durchschnittliche Nettokühlleistung von luftbasierten Systemen ist mit Werten zwischen 20 und 30 W/m^2 am geringsten (63).

Der Deckungsgrad kann je nach den Außenbedingungen variieren, kann aber durch die Oberfläche, die Anzahl der Radiatoren und den Wärmeträgermediumsdurchsatz angepasst werden.

2.3.3 Anwendung

Wirkung im Gebäude

Da es sich bei Sky Radiative Cooling um Hochtemperatur-Kühlsysteme handelt, können diese direkt mit Bauteilaktivierungen gekoppelt werden, bei denen die Heizung und Kühlung über die thermische Masse des Gebäudes erfolgt.

Sky Radiative Cooling kann bei allen Gebäudetypen eingesetzt werden. Je geringer das Verhältnis zwischen Dach- und Nutzfläche ist, desto kleiner ist jedoch der Effekt. Die Technologie kann auch im Zuge von Gebäudesanierungen angewandt werden.

Grenzen

Bei der Anwendung von Sky Radiative Cooling muss je nach Klima und Umgebung (hohe oder niedrige Gebäudedichte) das optimale System gewählt werden, d. h. eine gute Planung ist für ein hohes Nutzungspotential erforderlich. Lösungen, bei denen das Gebäudedach als Radiator verwendet wird, sind für mehrstöckige Gebäude weniger geeignet, da die übrigen Stockwerke, mit Ausnahme des obersten, nicht mit dem Radiator in Kontakt sind.

Die verfügbare Dachfläche des Gebäudes begrenzt die installierte Leistung. Außerdem ist das Potential in sehr dicht bebauten Umgebungen, in denen andere Gebäude die Abstrahlung zum Himmel behindern, begrenzt.

Anwendung und klimatische Bedingungen

Das höchste langwellige Abstrahlungspotential wird bei klarem Himmel erreicht, da Wolken langwellige Strahlung abfangen. Hohe Lufttemperaturen und Luftfeuchtigkeit verringern das Kühlpotential. So kann beispielsweise ein Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit (50 auf 100 %) und der Außenlufttemperatur (um 9 K) die Kühlleistung von Solarthermiekollektoren um 18 % bzw. 41 % verringern (1). Hohe Luftgeschwindigkeiten können den konvektiven Wärmeaustausch erhöhen, was die Nettokühlleistung steigert.

Verfügbarkeit

Wasserbasierte Radiatoren wie PV/T-Anlagen sind am Markt verfügbare Lösungen, die in mehrstöckigen Gebäuden eingesetzt und auch mit Speicherlösungen gekoppelt werden können. Ein Speichersystem ermöglicht es, Kälte in Zeiten mit günstigen Bedingungen zu speichern und sie zu Zeiten zu nutzen, in denen das Strahlungskühlungspotential begrenzt ist.

Vor- und Nachteile

- + kein/geringer Energieverbrauch
- + geringe Betriebskosten
- + gute Verfügbarkeit der einzelnen Komponenten
- auf Dachflächen in Konkurrenz mit PV-Anlagen und anderen Systemen
- in dicht bebauten Gebieten geringe Effizienz
- Kühlleistung abhängig von Umweltbedingungen
- noch wenig Erfahrungswerte

2.3.4 Literaturhinweise

- Kapitel 3.7, “Night Sky Radiative Cooling” im Annex 80 State of the Art Review: Holzer P, Stern P, Akander J, Ai Z, Arens E, Arghand T, Attia S, Bogatu D-I, Breesch H, Cehlin M, Chiesa G, Chtioui F, Elnagar E, Hayati A, Heiselberg P, Javed S, Kazanci O, Kolokotroni M, Lemort V, Levinson R, Zinzi M. International Energy Agency EBC Annex 80 - Resilient Cooling of Buildings - State of the Art Review. 2022.
- Section 4.2.6: “Sky radiative cooling” im Reviewartikel über resiliente Kühlstrategien des Annex 80: Zhang C, Kazanci OB, Levinson R, Heiselberg P, Olesen BW, Chiesa G, Sodagar B, Ai Z, Selkowitz S, Zinzi M, Mahdavi A, Teufl H, Kolokotroni M, Salvati A, Bozonnet E, Chtioui F, Salagnac P, Rahif R, Attia S, Lemort V, Elnagar E, Breesch H, Sengupta A, Wang LL, Qi D, Stern P, Yoon N, Bogatu D-I, Rupp RF, Arghand T, Javed S, Akander J, Hayati A, Cehlin M, Sayadi S, Forghani S, Zhang H, Arens E, Zhang G. Resilient cooling strategies – A critical review and qualitative assessment. Energy and Buildings. 2021; 251: 111312. doi:10.1016/j.enbuild.2021.111312
- Wu Y, Zhao H, Sun H, Duan M, Lin B, Wu S. A review of the application of radiative sky cooling in buildings: Challenges and optimization. Energy Conversion and Management. 2022; 265: 115768. doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115768

2.4 Kompressionskältemaschinen

Die Relevanz dieser Technologie zur Gebäudekühlung wird in Österreich als hoch eingeschätzt.

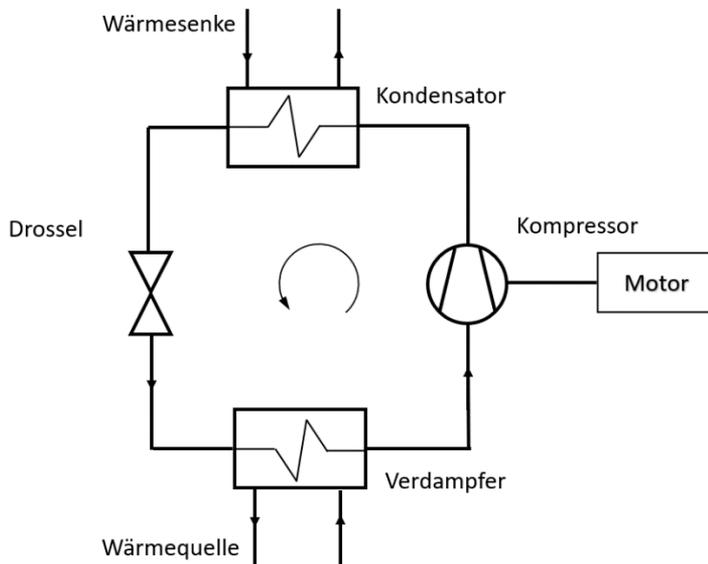
Dieses Technologieprofil basiert auf dem einschlägigen Profil 3.5 *Compression Refrigeration* des IEA EBC Annex 80 Resilient Cooling Projekts (1).

2.4.1 Beschreibung

Kompressionskältemaschinen zur Gebäudekühlung nutzen thermodynamische Kreisprozesse, die es ermöglichen, Wärme aus dem Gebäude effektiv an eine Wärmesenke abzuführen. Sie enthalten sogenannte Kältemittel als Arbeitsmittel, die durch Änderung ihres Aggregatzustandes Wärme bei einem bestimmten Temperaturniveau (durch Verdampfung) aufnehmen und bei einem höheren Temperaturniveau (durch Kondensation) wieder abgeben können. Nach demselben Prinzip funktionieren beispielsweise auch Kühlschränke. Kompressionskältemaschinen bestehen aus vier Hauptkomponenten (Abb. 11):

1. Ein Verdampfer, wo das kalte Kältemittel durch die Aufnahme von Wärme aus der warmen Umgebung (der sogenannten Wärmequelle) verdampft, was den Kühleffekt bewirkt.
2. Ein Kompressor, wo das gasförmige Kältemittel unter Druck- und Temperaturzunahme komprimiert wird.
3. Ein Kondensator, wo das Kältemittel – das nun deutlich wärmer ist als die den Kondensator umschließende kühle Umgebung (oder Wärmesenke) – Wärme abgibt, bis es vollständig kondensiert ist. In der Praxis wird für den Kondensator häufig das Wort „Verflüssiger“ verwendet.
4. Ein Expansionsventil, worüber das flüssige Kältemittel bei Druck- und Temperaturabfall entspannt wird.

Abb. 11: Hauptkomponenten einer Kompressionskältemaschine.



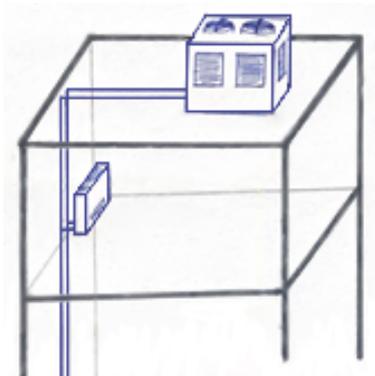
Um den Kühleffekt durch das Verdampfen des Kältemittels zu nutzen, wird der Verdampfer in der zu kühlenden Umgebung platziert oder mit der zu kühlenden Umgebung über ein Kälte transportmedium in Verbindung gebracht, während der Kondensator in die Wärmesenke platziert oder mit ihr gekoppelt wird. Häufig wird Außenluft als Wärmesenke eingesetzt; am effizientesten ist jedoch die Nutzung des Erdreichs oder Grundwassers aufgrund der tieferen Temperaturen, bei der die Kondensation möglich ist und der höheren Wärmeleitfähigkeit dieser Medien. Zusätzlich bewirkt die Nutzung des Untergrunds auch keine unangenehme Erhitzung der Außenluft; siehe auch das Technologieprofil über natürliche Wärmesenken (Kapitel 2.7). Es gibt mehrere Ausführungen von Kompressionskältemaschinen:

- **Single Split- Klimaanlage.** Diese Systeme bestehen aus einer Außen- und Inneneinheit. Die Inneneinheit enthält den Verdampfer und die Außeneinheit den Kondensator, wobei beide Einheiten über kältemittelgefüllte Rohrleitungen miteinander verbunden sind. Single Split-Systeme werden eingesetzt, um einen Raum direkt durch Wärmeaufnahme aus der Raumluft zu kühlen und die gekühlte Luft zurück in den Raum zu transportieren.
- **Multiple Split- Klimaanlage.** Hier versorgt eine Außeneinheit mehrere Inneneinheiten.
- **VRF/VRV- Systeme.** Variable Refrigerant Flow- oder Variable Refrigerant Volume- Systeme funktionieren ähnlich wie Multiple Split- Systeme, unterscheiden sich aber darin, dass für jede Inneneinheit mittels Thermostat ein eigener Kältemittelmassenstrom eingestellt werden kann. Bei Nutzung eines Dreirohrsystems statt eines Zweirohrsystems kann sogar gleichzeitig in einem oder mehreren Bereichen geheizt werden, während in anderen Bereichen gekühlt wird. Hohe Kältemittelmengen führen dazu, dass immer mehr Hersteller von VRV- Außengeräten bei den Innengeräten auf ein wassergeführtes Leistungsnetz wechseln.
- **Kompakt-/Monoblock- Klimageräte.** In diesem Fall befinden sich alle Komponenten der Kältemaschine in einem Gehäuse, welches in einer Ausnehmung in der Fassade des Gebäudes installiert ist. Die Wärmesenke stellt die Außenluft über Öffnungen in der Fassade dar.
- **Mobile Klimageräte.** Weil nicht immer eine nutzbare Ausnehmung vorhanden ist, wurden mobile Klimageräte entwickelt, die freistehend im Innenraum aufgestellt werden können und deren Abwärme aus dem Kondensator über einen Schlauch nach außen abgeführt wird.

Meist wird das Schlauchende in einer Fensteröffnung platziert. Dadurch, dass Kurzschlussströmungen zurück in den Raum möglich sind und dass die im Raum befindliche Kältemaschine Wärme abstrahlt, ist diese Variante sehr ineffizient und wird von den Autor:innen nicht für einen flächendeckenden Einsatz empfohlen.

- **„Rooftop“-Anlagen.** Dies sind auf Dächern installierte Kompaktanlagen, die zur Gebäudekühlung und Lüftung eingesetzt werden. Sie mischen Abluft aus Innenräumen mit Frischluft, kühlen sie auf die gewünschte Temperatur herunter und übergeben sie an das Lüftungssystem. Zur Effizienzsteigerung der Kältemaschine kann ein Luft-Luft-Wärmeübertrager zwischen Abluft und Frischluft zur Vorkühlung der Frischluft installiert werden.
- **Kaltwassersätze.** Hier gibt es einen zusätzlichen hydraulischen Kreis, über den Wärme aus den zu kühlenden Räumen über Kaltwasser aufgenommen und zur Kältemaschine transportiert wird. Die Wärmeaufnahme erfolgt über Kühlkonvektoren, Gebläsekonvektoren (sogenannte Fan Coil Units (Abb. 12)), Strahlungskühlsysteme und Bauteilaktivierungen oder über Kühlregister in der Lüftungsanlage. Die Wärme wird vom Kaltwasser an das Kältemittel der Kompressionskältemaschine übergeben, welche sie wiederum an die Wärmesenke abgibt.

Abb. 12: Beispiel für einen am Dach installierten luftgekühlten Kaltwassersatz, der mehrere Fan Coil Units mit Kälte versorgt.



2.4.2 Technologiespezifische Eigenschaften

Die Kühlleistung einer Kompressionskältemaschine wird abhängig vom benötigten Kühlbedarf dimensioniert, was diese Maschinen sehr vielseitig anwendbar macht. Die größten Einschränkungen in der Praxis bestehen in der Verfügbarkeit verschiedener Arten von Wärmesenken und für luftgekühlte Systeme das Platzangebot für die Außeneinheit. Bei der Planung sind hier auch die jeweiligen örtlichen Gegebenheiten (z.B. Schutzzonen in Wien) sowie die Schallemissionen der Außengeräte zu berücksichtigen.

Die Effizienz einer Kompressionskältemaschine hängt von den Temperaturniveaus im Verdampfer und im Kondensator ab, wobei ein größerer Temperaturunterschied eine niedrigere Effizienz bedeutet. Daher erfordert die Kühlung eines Gebäudes mit einer luftgekühlten Kältemaschine bei 30 °C Außentemperatur eine geringere elektrische Kompressorleistung als bei 40 °C Außentemperatur. Des Weiteren hat die Rückkühlung des Systems eine Wirkung auf die Effizienz der Kältemaschine: nutzt man Kühlwasser (z.B. aus Grundwasser, Vorfluter, o.ä.) zur Rückkühlung anstatt Außenluft, steigt die

Effizienz, da aufgrund der üblicherweise niedrigeren Temperaturen im Kühlwasser die Kondensatontemperatur sinkt, was den Kälteprozess effizienter macht. Zudem kann der Kondensator kompakter gebaut werden, da durch die höhere Wärmekapazität von Wasser mehr Wärme pro Masseneinheit aufgenommen werden kann als bei Luft. Genauso beeinflusst die Innenraumtemperatur die Effizienz der Maschine: niedrigere Innenraumtemperaturen benötigen mehr elektrische Leistung.

Da Multiple Split- Systeme oft nur mit einer Außeneinheit versorgt werden, sinkt die Effizienz dieser Systeme. VRV/VRF- Systeme, die in der Lage sind, gleichzeitige Heiz- und Kühllasten zu bestreiten, zeigen eine höhere Effizienz als Single- und Multi Split Systeme. Die Effizienz von der am Markt verfügbaren luftgekühlten Kaltwassersätze ist mit jener von VRV/VRF-Systemen vergleichbar, jene von wassergekühlten Kaltwassersätzen liegt sogar etwas höher (71).

Im Betrieb können Effizienzsteigerungen bei Kompressionskältemaschinen durch Anheben der Vorlauftemperatur im Kälteabgabesystem erzielt werden. Dies kann durch den Einsatz von Flächenkühlungen bzw. Bauteilaktivierungen realisiert werden, da hier eine größere Abgabefläche genutzt wird. Besteht allerdings Entfeuchtungsbedarf, sind niedrige Vorlauftemperaturen erforderlich.

Eine weitere Steigerung der Gesamteffizienz ist durch die Nutzung der entstandenen Abwärme z.B. für Raumwärme- oder Warmwasserbereitung möglich. So kann bei ganzjährig betriebenen Kältemaschinen, wie z.B. der Serverraumkühlung, die Abwärme in den Wintermonaten zur Raumheizung verwendet werden. Die Produktion von Trinkwarmwasser kann entweder durch direkte Nutzung der Abwärme der Kältemaschine und Anhebung auf das nötige Trinkwassertemperaturniveau mittels Elektroheizstäben erfolgen oder über sogenannte "Booster-Wärmepumpen", die als Wärmequelle die Abwärme der Kältemaschine nutzen und mit einem zweiten Kompressionskältekreis die Wärme auf das geforderte Trinkwassertemperaturniveau heben.

Kälteabgabesysteme

Abhängig von der erforderlichen Vorlauftemperatur des Kühlsystems kann eine Kompressionskältemaschine mehr oder weniger effizient arbeiten. Die Vorlauftemperatur wird durch den Kühlbedarf der zu kühlenden Räume sowie vom verwendeten Kälteabgabesystem vorgegeben. Anlagen zur Luftkonditionierung und/oder Entfeuchtung arbeiten bei Temperaturen von etwa 6 °C (72). Im Vergleich dazu können Bauteilaktivierungen, Flächenheizungen oder Lüftungsanlagen ohne Entfeuchtung mit deutlich höheren Vorlauftemperaturen zwischen 16 °C und 23 °C betrieben werden (73). Die nachfolgend aufgelisteten Kälteabgabesysteme werden im Kapitel 2.8 im Detail vorgestellt.

- Lüftung
- Kühlkonvektoren/Induktionsgeräte
- Gebläsekonvektoren (Fan Coil Units)
- Heizkörper
- Passive Nutzung thermischer Masse
- Strahlungskühlsysteme und Bauteilaktivierung

Rückkühlung

Auch das Rückkühlsystem ist maßgeblich für die Effizienz einer Kältemaschine ausschlaggebend. Hier werden die gängigsten Rückkühlssysteme in Österreich zur Flüssigkühlung von Kondensatoren erläutert:

- Trockene Rückkühlung: Hier wird die Wärme im Kühlwasser über einen im Außenbereich aufgestellten Wärmeübertrager an die umströmende Umgebungsluft abgegeben, die über

einen Ventilator angesaugt wird. Maßgeblich für die Wärmeabgabe ist hier die Temperatur der angesaugten Umgebungsluft sowie die Strömungsgeschwindigkeit der Luft (also Ventilatorumdrehzahl). Je niedriger die Außentemperatur und je höher die Ventilatorumdrehzahl, desto höher ist die Rückkühlleistung. Vorteilhaft bei diesen Systemen ist die hohe Betriebssicherheit (es wird nur Strom für den Ventilator benötigt) sowie die Einfachheit des Konzepts (keine hygienischen Risiken) und die geringen Betriebskosten; allerdings sind die durch den Ventilator verursachten Schallemissionen zu beachten. Eine ausreichende Dimensionierung beugt hohen Schallemissionen vor. Es werden Kühlwasseraustrittstemperaturen von 5 – 9 K über der Außenluftansaugtemperatur sowie Rückkühlleistungen von bis zu 10 kW/m² Aufstellungsfläche erreicht. (74)

- **Adiabate Rückkühlung:** Zur Leistungssteigerung von Trockenrückkühlern im Sommer wurden Modelle mit integrierter Verdunstungskühlungsvorrichtung entwickelt. Bei diesen Lösungen wird die angesaugte Außenluft durch Wassereinsprühung in den Luftstrom oder das Durchführen des Luftstroms durch befeuchtete Matten mit Wasser angereichert. Das Wasser verdunstet und so wird die Luft adiabatisch abgekühlt, bevor sie auf den kühlwasserführenden Wärmeübertrager trifft. (74) (75)
- **Hybridkühler:** Bei diesen Systemen wird der kühlwasserführende Wärmeübertrager direkt mit Wasser benetzt. Die Verdunstung findet also an der Oberfläche des Wärmeübertragers statt und nicht wie bei der adiabatischen Kühlung direkt in der Ansaugluft. Die Vorteile von adiabatischen und Hybridkühlern liegen in der höheren Rückkühlleistung gegenüber Trockenrückkühlern von bis zu 30 kW/m² Aufstellungsfläche und den niedrigeren erreichbaren Kühlwasseraustrittstemperaturen von 3 – 5 K unter der Außenluftansaugtemperatur sowie der guten Kühlleistung bei höheren Außentemperaturen. Allerdings sind Wartungs- und Betriebskosten höher und bei Hybridkühlern mit Wasserrückführung sind hygienische Risiken durch Legionellenbildung gegeben, die eine angemessene Überwachung der Wasserqualität und regelmäßige Reinigung erfordert. (75) (76) (74)
- **Kühltürme:** Auch Rückkühlwerke genannt. In der offenen Bauweise wird das Kühlwasser direkt in den durch den Kühlturm streifenden und von Ventilatoren angesaugten Luftstrom gespritzt, wodurch ein Teil des Wassers verdunstet und so dem Kühlwasser Wärme entzieht (sog. adiabatische Kühlung). Die Luft wird somit befeuchtet. Gleichzeitig kühlt auch der Luftstrom das Kühlwasser, das wieder aufgefangen und dem Kühlkreislauf zugeführt wird. Da das Kühlwasser in direkten Kontakt mit der Außenluft kommt, reichert sich dieses mit Schmutzpartikeln an, die sich in der Auffangwanne sammeln und unter zusätzlichem Wasserverbrauch regelmäßig entfernt werden müssen. Bei der geschlossenen Bauweise hingegen kommt das Kühlwasser in keinen direkten Kontakt mit der Außenluft, sondern wird über einen mit Wasser besprühten Wärmeübertrager und daran vorbeiströmender Luft gekühlt. Allerdings liegt die Kühlwasserabkühlung bei gleichen Betriebsbedingungen niedriger als bei offenen Kühltürmen und auch Kosten und Platzbedarf sind höher. Die Vorteile von Kühltürmen bestehen in ihrer guten Rückkühlleistung bei geringerem Platzbedarf als bei Trockenrückkühlern und der höheren Effizienz bei höheren Außentemperaturen. Ein Einbruch der Kühlleistung tritt lediglich bei hohen relativen Luftfeuchtwerten vor Gewittern auf. Nachteilig sind die erhöhten Wartungs- und Betriebskosten, die Risiken hinsichtlich Legionellenbildung und die für den Betrieb notwendige Wasseraufbereitung. Kühltürme

erreichen Kühlwasseraustrittstemperaturen von 3 – 5 K unter der Außenluftansaugtemperatur sowie Rückkühlleistungen von 300 kW/m² Aufstellungsfläche. (74) (77)

- Natürliche Wärmesenken: Hier bieten sich verschiedene Wärmesenken an, wie etwa das Erdreich (Sole-Erdwärmeübertrager), Grund- oder Oberflächengewässer, s. Kapitel 2.7.
- Eisspeicher: Dies sind Wassertanks, deren Wasserinhalt über einen Wärmeübertrager während der Heizsaison abgekühlt und vereist wird, um Heizwärme zu erzeugen, und der zur Erhaltung der Effizienz der Wärmepumpe wieder regeneriert werden muss. In der warmen Jahreszeit bietet sich die darin gespeicherte Kälte also zur Gebäudekühlung an. Ausschlaggebend für die Kapazität und Leistung von Eisspeichern ist deren Volumen; für die gewünschte Speicherkapazität und Leistung können Eisspeicher also beliebig ausgelegt werden. Die theoretische Speicherkapazität von Eisspeichern liegt bei 40-60 kWh/m³ Speichervolumen (78). Am Markt werden Eisspeicher für verschiedene Leistungsklassen im Gebäudeheizungs- bzw. -kühlungsbereich mit Leistungen von etwa 6-17 kW angeboten (79). Vorrangig werden Eisspeicher jedoch nicht zur Rückkühlung, sondern insbesondere zur freien Kühlung (Freecooling, passive Kühlung) genutzt.
- Wärmerückgewinnung: Wird die von der Kompressionskältemaschine produzierte Abwärme genutzt, anstatt sie an eine Wärmesenke abzugeben, steigt die Effizienz des Gesamtsystems. Gleichzeitig kann ein unerwünschter Wärmeeintrag von luftgekühlten Klimaanlage in die urbane Umwelt vermieden werden. Die rückgewonnene Wärme kann z.B. anteilig für die Warmwasserbereitung genutzt werden oder einen Beitrag zu Heizwärmebereitung leisten, wenn ein ganzjähriger Kühlbedarf vorherrscht. Im Bereich der Serverraumkühlung wird dies schon häufig umgesetzt und die abgegebene Wärme der Kältemaschinen für Warmwasser- und Heizwärmebereitung genutzt.

Wird der Kondensator direkt an der Außenluft mittels Ventilator ohne zwischengeschalteten Kühlwasserkreis gekühlt, spricht man von direkter Kühlung (ähnlich zur trockenen Rückkühlung).

Kompressoren

Kompressoren wandeln die aufgenommene elektrische Arbeit in Verdichtungsarbeit um. Verdichter sind eine zentrale Komponente einer Kompressionskältemaschine, deren Effizienz maßgeblich von der Bauform und dem zu überwindenden Druckverhältnis abhängt. Die Umwandlungseffizienz von mechanischer Arbeit zu Verdichtungsarbeit wird über den isentropen Wirkungsgrad beschrieben. Bei den Verdichtern wird zwischen Verdrängungsverdichtern (z.B. Hubkolbenverdichter) und Strömungsmaschinen (Turboverdichter) unterschieden.

- Verdrängungsverdichter (mechanische Verdichtung):
 - Hubkolbenverdichter: Die Verdichtung des Kältemitteldampfes wird durch das Zusammenpressen des gasförmigen Kältemittels in einem Zylinder mittels Kolben erzielt. Diese Verdichter können offen (Verdichter in eigenem Gehäuse von außen über eine Welle angetrieben), halbhermetisch (Elektromotor und Verdichter gemeinsam in einem aufschraubbaren Gehäuse verbaut) oder vollhermetisch (Motor und Verdichter befinden sich in einem fest verschweißten Gehäuse) ausgeführt sein, wobei das maximale geometrische Fördervolumen für offene Verdichter bei 2.000 m³/h, für halbhermetische bei 330 m³/h und für vollhermetische bei 50 m³/h liegt (78). Offene Hubkolbenverdichter werden in Autoklimaanlagen bis hin zu großen Kältemaschinen eingesetzt,

halbhermetische im Klimabereich und vollhermetische vorwiegend in kleineren Anwendungen, wie Kühlschränken oder Raumklimageräten (78). Kolbenverdichter zeichnen sich durch hohe Enddrücke und kleine Förderströme (80) aus und erreichen kleine bis mittlere Kälteleistungen bis etwa 600 kW (81).

- Schraubenverdichter: Zwei parallel angeordnete, ineinandergreifende Rotoren schließen in einer Ebene, die sich durch die Drehung der Rotoren von der Saug- zur Druckseite hinbewegt dicht ab, wodurch der in dem Hohlraum daneben liegende Kältemitteldampf verdichtet wird (78). Die Kälteleistung bewegt sich im Bereich von 8 bis 600 kW (81). Durch zusätzliche Unterkühlung in einem Economizer lässt sich das erreichbare geometrische Fördervolumen größerer Doppelschraubenverdichter auf einen Bereich von 100 bis 15.000 m³/h für Kälteleistungen von 80 bis 12.000 kW erweitern (78). Schraubenverdichter zeichnen sich ebenfalls durch hohe Enddrücke und kleine Förderströme aus, sind jedoch laufruhiger als Kolbenverdichter (80).
- Spiral/Scrollverdichter: Diese bestehen aus zwei spiralförmig eingebogenen Platten, die ineinandergesteckt sind, und wodurch durch die Drehung der beweglichen Platte gegen die fixierte Platte der im Hohlraum zwischen beiden Platten befindliche Kältemitteldampf verdichtet wird. Scrollverdichter weisen Fördervolumina zwischen 5 und 45 m³/h auf und erreichen Kälteleistungen zwischen 8 und 80 kW (81). Sie zeichnen sich durch hohe Laufruhe und einen kontinuierlichen Förderstrom aus (80).
- Rollkolbenverdichter: Ein an der Innenwand eines Zylinders abrollender Kolben mit einem oder mehreren Schiebern bewirkt die Verdichtung des Kältemitteldampfes. Geometrisches Fördervolumen zwischen 10 und 40 m³/h (78).
- Turboverdichter (strömungsmechanische Verdichtung): Diese funktionieren ähnlich wie Hochdruck- Radialventilatoren und werden für hohe Leistungen und Volumenströme eingesetzt. Turboverdichter erreichen Geschwindigkeiten von bis zu 15.000 U/min und Drücke von bis zu 11 bar und werden für Kälteleistungen von 300 bis über 10.000 kW eingesetzt (81). Eine stetige Leistungsregelung ist durch Drehzahl-, Vordrall-, Diffusor- und Heißgas- Bypass- Regelung möglich (78). Turboverdichter erreichen geringere Druckunterschiede, liefern aber einen kontinuierlichen Förderstrom und sind laufruhig (80).

In Luftkühlanlagen (Direktverdampfer) werden ausschließlich Verdrängungsverdichter verbaut, während in Wasserkühlanlagen neben Spiral- und Schraubenverdichtern auch Turboverdichter zum Einsatz kommen (78). In Tab. 3 sind nochmals die wichtigsten Eigenschaften der verschiedenen Verdichtertypen laut Brunner et al. (74) zusammengefasst. Wie ersichtlich, decken sich die Kälteleistungen gut mit den Angaben aus den anderen oben verwendeten Quellen.

Tab. 3: Die wichtigsten Merkmale verschiedener Verdichtertypen aus Brunner et al. (74).

Verdichterart	Hubkolben	Scroll	Schraube	Turbo
Einsatz	kleine bis mittlere Leistungen	kleine bis mittlere Leistungen	mittlere bis grössere Leistungen	ab 200 kW, bis sehr grosse Leistungen
Kälteleistung Verdichter	bis 500 kW	bis 90 kW	bis 800 kW	ab 250 kW
Kälteleistung Kältemaschine	bis 1000 kW	bis 300 kW	bis 6000 kW	200 kW–30 MW
Regulierbarkeit				
bei konstanter Drehzahl	Stufen mit Zylinderabschaltung	nur Digitalscroll: stufenlos möglich	stufenlos mit Schieber oder Bypass-Regelung	stufenlos mit Saugdrossel
mit Drehzahlregelung ca. ³	50 %–100 %	20 %–100 %	20 %–100 %	25 %–100 %
Wärmenutzung mit Heissgasenthitizer möglich	ja (ca. 10 % der Leistung)	ja (ca. 10 % der Leistung)	bedingt	nein
Temperatur-Hub (ca.) ¹	0 °C–65 °C	0 °C–65 °C	0 °C–65 °C	0 °C–50 °C
Anlaufstrom ²	relativ hoher Einschaltstrom	klein	mittel	mittel
Verursacht Erschütterungen	ja	nein	nein	nein
Wartung	einfach zu warten		grössere Wartungsarbeiten nur in Spezialwerkstatt möglich	durch Spezialisten relativ einfach zu warten
Weiteres	Pulsation beachten			

1 Verdampfung auf Verflüssigung
2 ohne Drehzahlregelung
3 Die minimale Drehzahl ist (bei den ölgeschmierten Verdichtern) von der Ölrückführung abhängig. Eine zu kleine Drehzahl führt zu einer mangelhaften Schmierung (Öldruckstörung).

Wichtige technische Kennzahlen

- **Kälteleistung ($\dot{Q}_{Kälte}$) [kW]**. Diese gibt die maximale Kühlleistung des Geräts an. Kompressionskältemaschinen können von einigen 100 W für Raumkühlungszwecke auf bis zu etwa 8 MW für industrielle Zwecke ausgelegt werden (82). Ausschlaggebend für die Kälteleistung der Kältemaschine ist die Kühllast im Gebäude, die nach ÖNORM H 6040 oder VDI 2078 ermittelt wird.
- **Nennleistung (P_{el}) [kW]**. Die von der Maschine gezogene Leistung am Auslegungspunkt. Diese hängt von der Effizienz und Kühlleistung der Maschine ab und kann sich bei industriellen Anlagen bis in den Megawattbereich erstrecken.
- **Energy Efficiency Ratio (EER) [-]** (83) (84) (85) (86) (87). Dieser Wert beschreibt das Verhältnis aus der bereitgestellten Kälteleistung $\dot{Q}_{Kälte}$ abhängig von der benötigten elektrischen Leistung P_{el} bei Standardbedingungen:

$$EER = \frac{\dot{Q}_{Kälte}}{P_{el}}$$

Diese Standardbedingungen sind in unterschiedlichen Ländern unterschiedlich festgelegt und auch von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich. Am europäischen Markt angebotene Split- Anlagen mit <6 kW Kühlleistung wiesen laut einer 2022 publizierten Studie EERs von 2,6-6,5 auf, solche mit 6-12 kW Kühlleistung 2,6-5,3; solche mit >12 kW Kühlleistung 1,7-6; VRF- Systeme mit >12 kW Kühlleistung 1,7-6; Aufdachanlagen 2,4-5,1; Luft/Wasser- Kaltwassersätze mit <400 kW Kühlleistung 1,9-3,9; Luft/Wasser- Kaltwassersätze mit >=400 kW Kühlleistung 1,9-4,1; Wasser/Wasser- Kaltwassersätze mit <400 kW Kühlleistung 2,8-6,1; Wasser/Wasser- Kaltwassersätze mit >400 kW Kühlleistung 4-6,3 (71).

- **Seasonal Energy Efficiency Ratio (SEER) [-]** (88) und **Cooling Seasonal Performance Factor (CSPF) [-]** (89). Die SEER wird als das Verhältnis aus der gesamten aufgenommenen Wärmemenge $Q_{Kälte}$ zu dem gesamten elektrischen Energieverbrauch W_{el} in einer Kühlsaison mit typischer Außentemperaturverteilung für das lokale Klima berechnet:

$$SEER = \frac{Q_{Kälte}}{W_{el}}$$

Auch hier sind die Annahmen für die Berechnungen länderspezifisch. Die SEER von am europäischen Markt angebotenen Split- Anlagen mit <6 kW Kühlleistung liegt bei 4,6-8,5; jene von Split- Anlagen mit 6-12 kW bei 4,3-8,5; jene von Split- Anlagen mit >12 kW bei 4,6-6,5; jene von VRF- Systemen mit >12 kW bei 4,6-6,5; jene von Aufdachanlagen bei 3-6,5; jene von Luft/Wasser- Kaltwassersätzen mit <400 kW bei 3,8-5,3; jene von Luft/Wasser- Kaltwassersätzen mit ≥ 400 kW bei 4,1-5,7; jene von Wasser/Wasser- Kaltwassersätzen mit <400 kW bei 5,1-7; jene von Wasser/Wasser- Kaltwassersätzen mit 400-1500 kW bei 5,9-9 und jene von Wasser/Wasser- Kaltwassersätzen mit 1500-2000 kW bei 6,3-9 (71). Der CSPF beschreibt ebenfalls das Verhältnis der gesamten aufgenommenen Wärmemenge zu dem gesamten Stromverbrauch in einer Kühlsaison mit typischer lokaler Temperaturverteilung, jedoch unter Berücksichtigung von Perioden mit Teillastbetrieb. Der minimal erforderliche CSPF beispielsweise von Single Split- Anlagen liegt international zwischen 3,7 und 6 abhängig von der Klimazone (90).⁴

- **Carnot-Effizienz (η_c) [-]**. Die maximal theoretisch erreichbare Leistungszahl nach Carnot. Diese ist von den Temperaturniveaus im Verdampfer T_u und Kondensator T_o abhängig:

$$\eta_c = \frac{T_u + 273,15}{T_o - T_u}$$

- **Gütegrad (ζ) [-]**. Der Gütegrad der Maschine gibt das Ausmaß der Erreichung der Carnot-Effizienz an und wird berechnet, indem die EER durch die Carnot-Effizienz geteilt wird:

$$\zeta = \frac{EER}{\eta_c}$$

Üblicherweise liegt der Gütegrad zwischen 0,5 und 0,6 (78).

- **Total Equivalent Warming Impact (TEWI) [kg CO₂-eq.]** (92). Diese Größe berücksichtigt sowohl direkte (durch in die Umwelt gelangendes Kältemittel) als auch indirekte durch den Betrieb einer Kompressionskältemaschine (durch Stromkonsum) verursachten Treibhausgasemissionen über die Laufzeit einer Anlage.

Ein weiterer wichtiger Aspekt sind die Kältemiteleigenschaften, s. hierzu Kapitel 4.

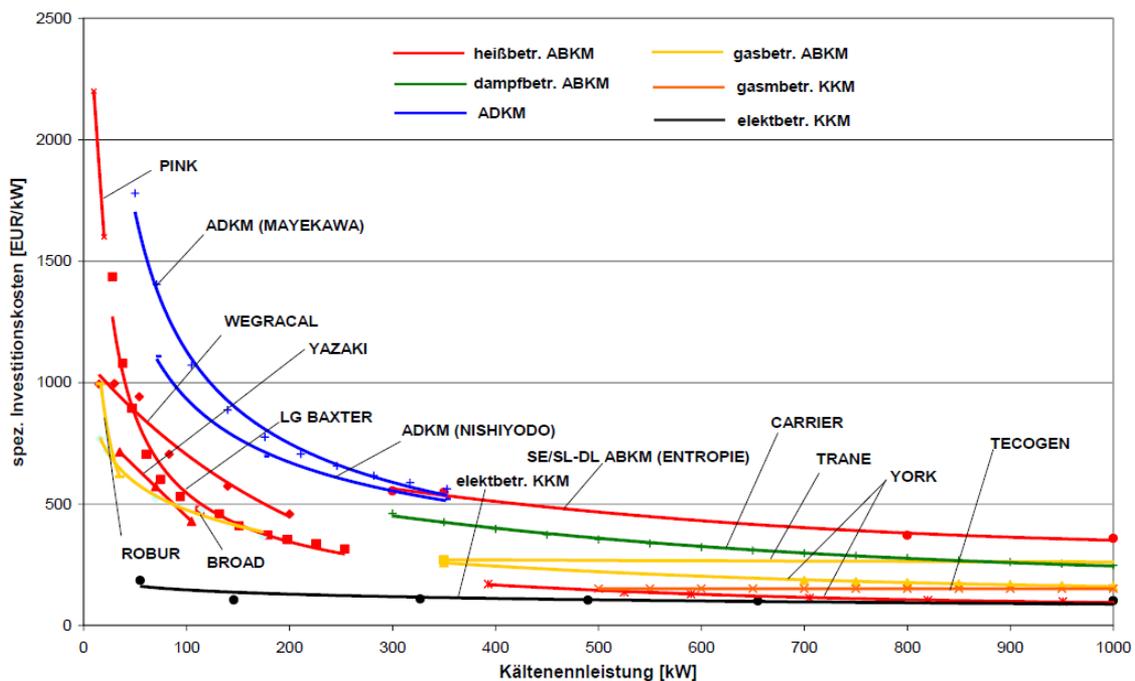
2.4.3 Anwendung

Kompressionskältemaschinen sind die wichtigste Technologie, um aktiv Wärme einem Gebäude zu entziehen. Kompressionskältemaschinen sind technologisch ausgereift und eine weit verbreitete Technologie im Gebäudesektor. Gesamtheitlich betrachtet bieten Kompressionskältemaschinen auch eine gute Möglichkeit, Strom aus erneuerbaren Energiequellen, wie z.B. Wind oder Sonnenlicht, in die Kältebereitung einzubinden. Da Kompressionskältemaschinen konstruktiv komplexere Systeme

⁴ Weitere länder- und regionenspezifische Informationen (u. a. für die Europäische Union) können (91) entnommen werden.

sind und nicht unbedenkliche Betriebsstoffe (insbesondere das Kältemittel) enthalten, gelten verschiedene Sicherheitsbestimmungen (s. Kapitel 4) und es ist eine regelmäßige Wartung dieser Anlagen erforderlich. Diesbezügliche Kosten wartungsintensiverer Anlagen belaufen sich auf 3-5 % der Investitionskosten pro kW Kälteleistung und Jahr (93). Krottil (94) hat 2020 eine Erhebung der spezifischen Investitionskosten (Kosten pro kW installierter Kälteleistung [€/kW]) verschiedener Kältemaschinentypen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 13 dargestellt. Die Investitionskosten von Kompressionskältemaschinen mit Leistungen ab 50 kW (ohne Kälteverteilung und Rückkühlssysteme) belaufen sich hiernach auf unter 200 €/kW. Für den Einsatz zur Gebäudekühlung werden vor allem auch Maschinen mit kleinerer Leistung eingesetzt, deren Kosten jedoch höher liegen. Laut dem Projektteam vorliegenden Informationen (Stand 1. Quartal 2024) kann man hier mit spezifischen Investitionskosten von etwa 800 €/kW rechnen. Für Maschinen im Megawattbereich liegen dem Projektteam spezifische Investitionskosten unter 500 €/kW vor, was allerdings bereits deutlich höher liegt als die 2020 von Krottil ermittelten Zahlen.

Abb. 13: Spezifische Investitionskosten am Markt verfügbarer Kältemaschinen (94).



Simulationsstudie Beispielgebäude

Zur weiteren Veranschaulichung der Wirkung verschiedener – vor allem sogenannter passiver – Kühltechnologien wurden vom Projektteam aufbauend auf den Ergebnissen und Modellen aus der Kältebedarfsberechnung für die Kältebedarfsmatrix Simulationsstudien mithilfe des Gebäudesimulationsprogrammes IDA ICE durchgeführt. Details zur Methodik der Simulationsstudien können dem Methodenteil (Kapitel 6.1.2) entnommen werden. Das verwendete Gebäudemodell enthält eine beispielhafte nach Südosten ausgerichtete Wohnung mit 140 m² Wohnnutzfläche im mittleren Geschoß (dem sog. Regelgeschoß) eines dreistöckigen Gebäudes. Der Fensteranteil an der Fassadenfläche beträgt 17 %, der U-Wert der Wand 1,5 W/(m²·K) und der U-Wert der Fenster 1,2 W/(m²·K). Der g-Wert der Verglasung beträgt 0,59 und der g_{tot} der Fenster ohne Verschattung (F_c = 1) folglich auch 0,59. In dem Gebäude wird außer der Nachtlüftung keine andere Kühltechnologie angewendet. Wird der sich ergebende jährliche Kältebedarf für dieses Gebäude mit einer Kompressionskältemaschine gedeckt, fallen Stromkosten an, die von der Effizienz der Anlage (SEER) und dem Strompreis abhängig sind. Es wurden die Stromkosten (die sog. Kältegestehungskosten) für eine beispielhafte Anlage ermittelt, die eine SEER zwischen 2 und 4 aufweist und mit Strom, der zwischen 0,2 und 0,4 €/kWh kostet, betrieben wird. Das Zustandekommen der Annahmen hinsichtlich dieser beiden Faktoren sowie der Rechenweg werden in Kapitel 6.1.1 und 6.2.3 erläutert. Bei einem Strompreis von 0,2 €/kWh schwanken die jährlichen Kältegestehungskosten zwischen 98 und 195 €, bei einem Strompreis von 0,3 €/kWh zwischen 146 und 293 € und bei einem Strompreis von 0,4 €/kWh zwischen 195 und 390 € je nach Effizienz der Anlage (s. Abb. 37 in Kapitel 6.2.3). Auf die Wohnfläche bezogen wären das spezifische Kältegestehungskosten von 0,7 – 1,4 €/m²·a für einen Strompreis von 0,2 €/kWh, 1,0 – 2,1 €/m²·a für einen Strompreis von 0,3 €/kWh und 1,4 – 2,8 €/m²·a für einen Strompreis von 0,4 €/kWh (s. Abb. 38 in Kapitel 6.2.3). Weiters kann der TEWI (Total Equivalent Warming Impact) der Anlage berechnet werden. Hierfür wurden ebenfalls verschiedene Effizienzen (SEERs zwischen 2 und 4) der Anlage angenommen sowie vier verschiedene Kältemittel (R717, R290, R600A, R1234ze(E)). Bei einer SEER von 2 beträgt der TEWI je nach Kältemittel zwischen 2.284 und 2.305 kg CO₂-Äq. und bei einer SEER von 4 je nach Kältemittel zwischen 1.142 und 1.163 kg CO₂-Äq. (s. Abb. 40 in Kapitel 6.3.1).

Grenzen

Der Einsatz von Kompressionskältemaschinen wird lediglich durch Vibration, Schallproduktion, Hitzeemissionen und Platzbedarf für die Außeneinheit von luftgekühlten Systemen sowie durch die Verfügbarkeit von Wärmesenken bei nicht- luftgekühlten Systemen begrenzt. In einigen Bundesländern ist die Aufstellung von Luftwärmepumpen bzw. Klimaanlage mitteilungs- oder bewilligungspflichtig, wobei auch die Schallproduktion dieser Anlagen häufig ein Kriterium für die Bewilligungsfähigkeit ist. Je nach Bauordnung und ggf. Verordnungen oder Gesetzen hinsichtlich der Anforderungen an Heizungs- bzw. Klimaanlage existieren unterschiedliche Regelungen, ab wann (d. h. ab welchem Schallpegel) eine Anlage bewilligungspflichtig ist. Es sei angemerkt, dass auch die Förderfähigkeit von Wärmepumpen anhand der Schallemissionen der zu fördernden Anlage bewertet wird. Eine Übersicht

der bundesländerspezifischen Regelungen hinsichtlich Schallproduktion kann (95) entnommen werden. Bei der Bewertung von Schallemissionen werden zwei Maße verwendet: der Schalldruckpegel und der Schalleistungspegel. Ersterer ist ein Immissionswert, d. h. gibt die Lautstärke an einem bestimmten Punkt im Raum an. Zweiterer beschreibt die Lautstärke einer Schallquelle am Emissionspunkt, also direkt an der Schallquelle. Beispielweise darf der Schalldruckpegel an der Grundstücksgrenze in Wohngebieten üblicherweise tagsüber nicht mehr als 40 dB und nachts nicht mehr als 30 dB betragen; für Kern- bzw. Dorfgebiete liegen die Grenzwerte bei tagsüber 50 dB und nachts 40 dB, vgl. etwa die Tiroler Gas-, Heizungs- und Klimateanlagenverordnung 2014 – TGHKV 2014 § 3 sowie die Burgenländische Heizungs- und Klimateanlagenverordnung 2019 – Bgld. HK-VO 2019 § 24c, beides in der Fassung vom 05.02.2024 (in den anderen Bundesländern existieren ähnliche oder gleiche Regelungen). Außengeräte von Split-Klimateanlagen und Luftwärmepumpen erreichen in der Regel Schalleistungspegel von zwischen 40 und 60 dB (96) (97) (98). Bei Rückkühlern von zentralen Kältesystemen sind höhere Schallpegel möglich, da hier größere Anlagen mit mehreren Modulen notwendig sind, um die erforderliche Rückkühlleistung zu erbringen.

Darüber hinaus sollte auch der Strombedarf von Kompressionskältemaschinen und speziell bei Single-Split-Klimateanlagen und mobilen Klimageräten nicht unterschätzt werden. Dieser ist besonders bei heißen Außentemperaturen hoch und führt zu großen Netzlasten. Daher sollten bei der Planung solcher Anlagen hocheffiziente Technologien mit möglichst geringem Energieeinsatz berücksichtigt werden.

Nachrüstbarkeit

Die Kompressionskältetechnik ist eine leistungsstarke Technologie, die thermischen Komfort für alle Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsniveaus bietet. Sie kann sowohl im Neubau als auch in Bestandsgebäuden durch Nachrüstung, unter Berücksichtigung der am Standort gegebenen Bedingungen, eingesetzt werden. In den Sommermonaten wird sie häufig auch zur Luftentfeuchtung eingesetzt, primär im Büro- und Dienstleistungssektor. Im Wohnbau spielt Entfeuchtung eine eher untergeordnete Rolle. Die wichtigsten Vorteile von Split-Systemen sind zwar die einfache Installation und der geringe Platzbedarf. Allerdings werden diese wegen ihrer Vibrationen, Schallemissionen und Hitzeemissionen immer unattraktiver in dicht besiedelten Gebieten. Im Vergleich zu Kaltwassersätzen und Kältemaschinen mit Flächenkühlensystemen oder thermischer Bauteilaktivierung sind sie auch deutlich ineffizienter. Wird Wasser als Wärmesenke verwendet, steigt die Effizienz der Kältemaschine. Allerdings ist Wasser nicht so leicht verfügbar wie Außenluft, weshalb eine adiabate Kühlung oder ein Fernkältesystem mit zentraler Kältebereitung eine gute Alternative, vor allem für den Bestandsbau, sein können.

Vor- und Nachteile

- + nahezu überall einsetz- und nachrüstbar (mit entsprechenden baulichen Maßnahmen)
- + technische Maßnahme, um bei passender Dimensionierung den Kühlbedarf des Gebäudes optimal zu decken und nicht nur eine Entwärmung zu ermöglichen (vgl. Freecooling)
- Energieverbrauch
- Wärme- und Schallemissionen von luftgekühlten Rückkühlern und Split-Systemen
- Vibration der Maschine
- technische Anforderungen an die Sicherheit bei brennbaren Kältemitteln
- Investitions-, Wartungs- und Betriebskosten

2.4.4 Literaturhinweise

- Klimaaktiv über Kältesysteme: https://www.klimaaktiv.at/energiesparen/energieeffiziente_betriebe/technologieschwerpunkte/kaelte.html
- Klimaaktiv über Wärmepumpen: <https://www.klimaaktiv.at/erneuerbare/erneuerbare-waerme/Heizungssysteme/Waermepumpe.html>
- Demnächst veröffentlichter Ratgeber des BMK zu Kühlmaßnahmen mit Hinweisen zu Klimaanlageanlagen: Holzer P, Wimmer F, Hackl LM, Peer T und Czarnecki P [unveröffentlicht]. Ratgeber Klimaaktiv Kühlen. Empfehlungen für Wohnungen und Immobilien aller Art. Wien: BMK.
- Steckbriefe zu verschiedenen aktiven Kühltechnologien: Schmidt D, Goetschkes C, Pollerberg C. Kältetechnik in Deutschland. Steckbriefe zu Kältetechnologien. Oberhausen: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT; 2022. https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/referenzen/flexkaelte/K%C3%A4ltetechnik_in_Deutschland-Steckbriefe_zu_K%C3%A4ltetechnologien.pdf
- Webseite des Verbandes Wärmepumpe Austria unter <https://www.waermepumpe-austria.at/>
- Website der Europäischen Union über das Energy label unter https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labeling-rules-and-requirements/energy-label-and-ecodesign_en
- Website der European Heat Pump Association unter <https://www.ehpa.org/>
- IIR-Publikationen zu den neuesten Entwicklungen der Kältetechnik und Kältemittel über FRIDOC unter <https://iifiir.org/en/fridoc>
- Freiwilliger Leitfaden für Regierungen für effizientere Klimaanlageanlagen: United Nations Environment Programme - United for Efficiency Initiative. Model Regulation Guidelines September 2019. Energy-Efficient and Climate-Friendly Air Conditioners. 2019. https://united4efficiency.org/wp-content/uploads/2021/11/U4E_AC_Model-Regulation_EN_2021-11-08.pdf
- Publikation über die ambitioniertesten Effizienzanforderungen für Klimaanlageanlagen und fünf andere emissionsintensive Technologien für zehn von den weltweit am meisten emittierenden Ländern: Mavandad S, Malinowski M. World's Best MEPS: Assessing Top Energy Efficiency Standards for Priority Appliances. Washington: CLASP; 2023. <https://www.clasp.ngo/research/all/worlds-best-meps/>
- Bericht über den zukünftigen Kühlbedarf und dessen Auswirkungen auf das Energiesystem, mit Policy-Empfehlungen zur Erhöhung der Effizienz von Kühlgeräten: IEA. The Future of Cooling. Opportunities for energy-efficient air conditioning. IEA; 2018. https://iea.blob.core.windows.net/assets/0bb45525-277f-4c9c-8d0c-9c0cb5e7d525/The_Future_of_Cooling.pdf

2.5 Adsorptionskältemaschinen

Die Relevanz dieser Technologie zur Gebäudekühlung wird in Österreich als niedrig eingeschätzt.

Dieses Technologieprofil basiert auf dem einschlägigen Profil 3.6 *Adsorption Chiller* des IEA EBC Annex 80 Resilient Cooling Projekts (1).

2.5.1 Beschreibung

Kältemaschinen werden in thermisch angetriebene und mechanisch angetriebene Kältemaschinen unterteilt. Eine Adsorptionskältemaschine ist eine thermisch angetriebene Kältemaschine, die Wärme aus einer Wärmequelle wie Solarthermie, Geothermie oder Abwärme als Antriebsenergie nutzen kann. Adsorptionskältemaschinen haben einige Vorteile gegenüber Kompressionskältemaschinen, wie z. B. niedrige Betriebskosten, keine Vibrationen oder Lärm sowie Umweltfreundlichkeit aufgrund fehlender brennbarer oder synthetischer Kältemittel. Grundsätzlich wird unter Adsorption das Binden von Molekülen an einer festen Oberfläche unter Wärmeabgabe verstanden.

Adsorptionskältemaschinen bzw. -wärmepumpen können zum Heizen und Kühlen von thermischen Niedertemperatursystemen genutzt werden. Da es keine beweglichen Komponenten gibt, ist das System leise, langlebig, wartungsarm und aufgrund des einfachen Funktionsprinzips auch sehr leicht zu installieren. Sie werden nicht wie mechanische Kältemaschinen elektrisch angetrieben, sondern nutzen thermische Energie. Folglich wird nur für die Regelung der Verteilpumpen und der Steuereinheiten elektrische Energie verbraucht, nicht aber für das Kühlsystem selbst. Dadurch sind Adsorptionskältemaschinen sparsamer im elektrischen Energieverbrauch als Kompressionskältemaschinen. Im Vergleich zu Absorptionskältemaschinen haben Adsorptionskältemaschinen auch den Vorteil, dass keine umweltrelevanten Stoffe wie Ammoniak oder Lithiumbromid zum Einsatz kommen.

Für die thermische Antriebsenergie ist Wärme bei einem Temperaturniveau zwischen 70 °C und 85 °C nötig. Gleichzeitig muss aus dem Prozess Abwärme bei ca. 50 °C abgeführt werden, die z.B. für die Trinkwarmwasserbereitung verwendet werden kann. Unter dem Begriff "solare Kühlung" wird das Konzept von Adsorptionskältemaschinen verstanden, die als Antriebsenergie solare Quellen wie Sonnenkollektoren oder Geothermie nutzen und Kälte zur Raumkühlung erzeugen. Dadurch können jahreszeitabhängige Synergien (Kühlbedarf bei gleichzeitig hoher Produktion von solarer Wärme) genutzt werden.

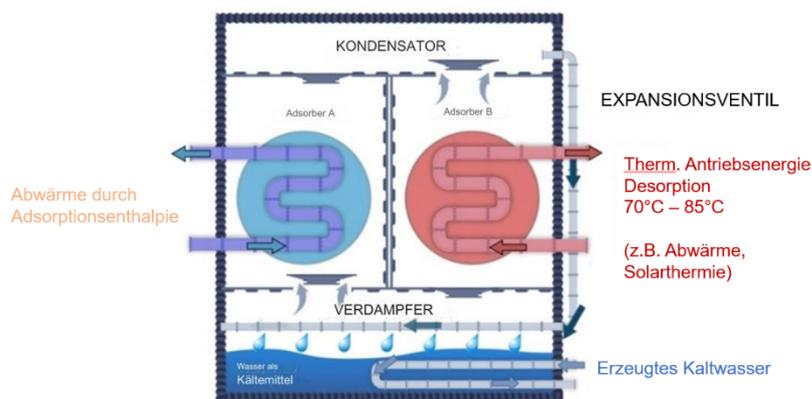
Eine Adsorptionskältemaschine besteht aus vier Hauptkomponenten: einem festen Adsorbentmaterial, einem Kondensator, einem Verdampfer und einem Expansionsventil. Als Arbeitsmedium wird Wasser eingesetzt, das im Verdampfer verdampft wird und dadurch Kälte erzeugt. Damit das Wasser bei Temperaturen zwischen 6 °C und 20 °C verdampfen kann, muss das System unter Vakuum stehen. Nachdem das Wasser im Verdampfer vollständig verdampft ist, und dabei die nötige Kälteenergie erzeugt hat, wird das Ventil zum Adsorber geöffnet und der Wasserdampf adsorbiert an der Oberfläche des Adsorbers. Während der Adsorption wird Adsorptionswärme frei, die mittels Kühlwasser abgeführt werden muss. Diese Wärme kann z.B. für die Vorwärmung von Trinkwarmwasser verwendet werden.

Nachdem im Adsorber das gesamte Wasser adsorbiert wurde, muss dieses wieder vom Adsorber getrennt werden. In der Desorption wird durch Zufuhr von Wärme auf einem höheren Temperaturniveau (meist Heißwasser mit 70 °C – 85 °C) der Wasserdampf aus dem Adsorbentmaterial angetrieben. Der Wasserdampf wird anschließend im Kondensator verflüssigt, über ein Expansionsventil entspannt und so wieder dem Verdampfer zugeführt (siehe Abb. 14).

Da bei Adsorptionskältemaschinen Adsorber und Desorber das gleiche Material im selben Behälter sind, kann der Kälteprozess nur diskontinuierlich ablaufen. Um einen quasikontinuierlichen Betrieb zu ermöglichen, werden zwei Adsorber gegenphasig betrieben. Dabei wird ein Adsorber regeneriert, während im anderen Adsorber adsorbiert wird.

Ideale Adsorbermaterialien sind (meist) Feststoffe mit einer großen Oberfläche wie z.B. Aktivkohle, Silikagel oder Zeolithe. Der Wasserdampf sollte vollständig an der Oberfläche binden, und aber auch mit einem gewissen Energieeinsatz wieder vom Adsorbermaterial trennbar sein (Desorption).

Abb. 14: Funktionsprinzip einer Adsorptionskältemaschine (1) (modifiziert).



Einer der größten Nachteile von Adsorptionskältemaschinen sind die vergleichsweise hohen spez. Investitionskosten, die geringen am Markt verfügbaren Kälteleistungen (bis max. 350 kW) und ihre im Vergleich zu Kompressionskältemaschinen relativ niedrigen spezifischen Kälte- und Wärmeleistungen sowie Leistungszahlen.

2.5.2 Technologiespezifische Eigenschaften

Die technologischen Eigenschaften und relevanten Kennzahlen von Adsorptionskältemaschinen sind ähnlich zu denen von Kompressionskältemaschinen. Da jedoch als Antriebsenergie thermische Energie nötig ist, wird von einem Wärmeverhältnis β gesprochen. Während die Leistungszahlen von elektrischen Klimaanlage zwischen 2 und 4 liegen, schwankt das theoretische Wärmeverhältnis von Adsorptionskältemaschinen zwischen 0,5 und 0,9.

Wichtige technische Kennzahlen

- **Wärmeverhältnis β [-]** (99) (78) = $\frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_{\text{Desorption}} + P_{\text{el}}} \approx \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_{\text{Desorption}}}$
- **Kälteleistung (\dot{Q}_0) [kW]**. Diese gibt die Kühlleistung des Geräts an. Adsorptionskältemaschinen erreichen Kälteleistungen von bis zu 350 kW. Ausschlaggebend für die Kälteleistung der Kältemaschine ist die Kühllast im Gebäude, die nach ÖNORM H 6040 oder VDI 2078 ermittelt wird.
- **Antriebsleistung ($\dot{Q}_{\text{Desorber}}$) [kW]**. Wärmestrom auf einem Temperaturniveau zwischen 55 °C – 85 °C.

- **Elektrische Leistungsaufnahme der Pumpe zum internen Wärmeaustausch P_{el} [kW]**, wobei diese betragsmäßig deutlich geringer ist als die Antriebsleistung für die Desorption ($P_{el} \ll \dot{Q}_{Desorption}$).
- **Spezifische Kälteleistung des Adsorbermaterials (SCP) [kJ/kg] (100)**

2.5.3 Anwendung

Die Entwicklung von Adsorptionskältemaschinen hat in den letzten Jahren enorm an Fahrt aufgenommen. Während 2010 Anlagen in Prototypengröße errichtet wurden, können mittlerweile Leistungen bis zu 350 kW abgedeckt werden. Als Antriebsenergie ist anstatt Strom Wärme nötig, dabei reicht schon 55 °C warmes Wasser aus, um Kälte zu erzeugen. Bei 65 °C – 85 °C wird die volle Kälteleistung erzielt. Auf der Kaltwasserseite werden Vorlauftemperaturen von bis zu 5 °C erreicht; die besten Ergebnisse zeigen sich bei etwa 10 °C. Dies macht die Adsorptionskältetechnik sowohl einsetzbar für den Klimakältebereich (inklusive Entfeuchtung) als auch für Anwendungen in Industrie und Gewerbe. Eine wirtschaftlich sinnvolle Anwendung ergibt sich aber erst, wenn gleichzeitig günstig Wärme (z.B. Abwärme, Solarthermie, Geothermie) am Standort verfügbar ist. (101)

Für Adsorptionskältemaschinen können Wartungskosten von etwa 1 % der Investitionskosten pro kW Kälteleistung und Jahr angenommen werden (93). Die spezifischen Investitionskosten von Adsorptionskältemaschinen betragen je nach Kälteleistung 500 – 1.750 €/kW installierter Kälteleistung (94), vgl. Abb. 13 in Kapitel 2.4.3.

Im folgenden Abschnitt werden Anwendungsbeispiele von Adsorptionskältemaschinen im Gebäudesektor angeführt.

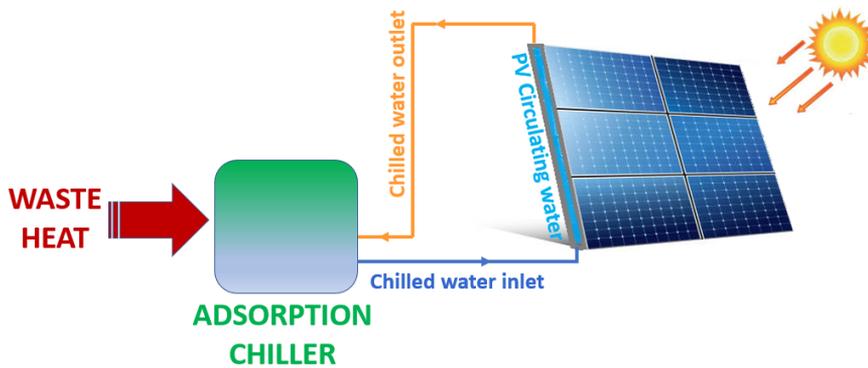
Gebäudekühlung mit Adsorptionskältemaschinen

Bei der Betrachtung von Technologien zur Gebäudetemperierung wird der Kühlbedarf von Gebäuden hauptsächlich durch elektrisch angetriebene Kältemaschinen oder Fernkältenetze gedeckt. In diesem Fall wird ein hoher Anteil der im Gebäude benötigten elektrischen Energie, insbesondere im Sommer, für die Kühlung verwendet. Hier können Adsorptionskältemaschinen eingesetzt werden, um den Stromverbrauch von Gebäuden für die Kühlung zu reduzieren oder sogar zu eliminieren. Als thermische Antriebsenergie kann dafür Wärme aus Sonnenkollektoren, PV/T-Paneeelen und vorhandenen Kesselsystemen (z.B. Erdgas) verwendet werden.

Einsatz von Adsorptionskältemaschinen zur Kühlung von Photovoltaik-Modulen

Eine Anwendungsmöglichkeit von Adsorptionskältemaschinen ist die Steigerung der Leistung von Photovoltaik (PV)-Paneelen durch Kühlung. Bekanntlich wandeln PV-Paneele die von der Sonne aufgenommene Wärme in elektrische Energie um. Im Gegensatz dazu produzieren PV/T-Paneele elektrischen Strom und Wärme gleichzeitig. Die Effizienz von PV-Paneeelen nimmt mit Anstieg der Außentemperatur ab. Eine Möglichkeit, die Effizienz von PV-Paneeelen zu erhöhen, besteht daher darin, die Paneele abzukühlen. Dazu können Kompressionskältemaschinen als auch Adsorptionskältemaschinen eingesetzt werden. Die für den Betrieb einer Adsorptionskältemaschine nötige Antriebsenergie kann aus Solarthermie, Geothermie, einem Kesselsystem oder Abwärme – wenn diese am Standort vorhanden ist – entnommen werden. Abb. 15 zeigt ein Konzept zur Kühlung von PV-Paneeelen mittels Adsorptionskälte.

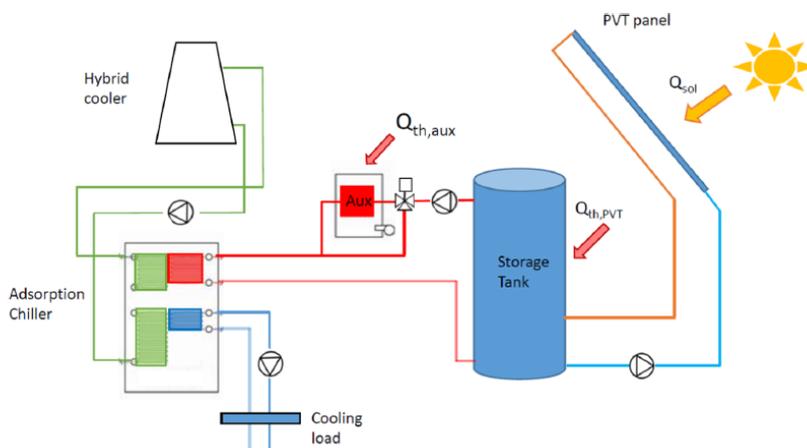
Abb. 15: Beispiel für eine Adsorptionskältemaschine zur Kühlung der Oberflächentemperatur von PV-Paneelen (1).



Kombination von PV/T-Paneelen und Adsorptionskältemaschinen

Im Gegensatz zu den oben erwähnten PV-Paneelen werden in diesem Abschnitt PV/T-Paneele behandelt, die sowohl Warmwasser als auch Strom erzeugen können. Sowohl für industrielle als auch für häusliche Anwendungen können PV/T-Paneele anstelle von PV-Paneelen zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Das erzeugte Warmwasser kann auch zur Kühlung verwendet werden, indem es Adsorptionskältemaschinen zugeführt wird, und so die Umwandlungseffizienz der PV/T-Paneele zu verbessern (102). Abb. 16 zeigt eine schematische Darstellung der Kühlung von PV/T-Paneelen mit Hilfe einer Adsorptionskältemaschine.

Abb. 16: Nutzung des von PV/T-Paneelen erzeugten Warmwassers durch Adsorptionskältemaschinen (102).



Vor- und Nachteile

- + wartungsarm aufgrund fehlender beweglicher Teile
- + keine ökologisch bedenklichen Substanzen im Einsatz
- + kein elektrischer Energieeinsatz nötig (vor allem in Regionen interessant, die eine instabile bzw. schlechte Strominfrastruktur aufweisen)
- + Nutzung von Abwärme (auf hohem Temperaturniveau)
- diskontinuierlicher Prozess

- geringe Effizienz
- geringe spezifische Kälte; daraus resultieren große Anlagen
- hohe spezifische Investitionskosten 500 – 1.750 €/kW (Kompressionskälte üblicherweise ca. 800 €/kW) (94)
- Abwärme mit zwischen 55 und 85 °C sollte günstig am Standort vorhanden sein, damit wirtschaftlicher Betrieb möglich

2.5.4 Literaturhinweise

- Wang R, Wang L, Wu J. Adsorption Refrigeration Technology: Theory and Application. Singapore: John Wiley & Sons; 2014. 10.1002/9781118197448
- Rieberer R, Moser H, Kottenko O, Zotter G, Malenkovic I. IEA Wärmepumpenprogramm. Annex 34: Thermisch angetriebene Wärmepumpen für Heizung und Kühlung. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 48/2013. 2013. https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/iea_pdf/endbericht_201348_iea_hpp_annex34.pdf
- Steckbriefe zu verschiedenen aktiven Kühltechnologien: Schmidt D, Goetschkes C, Pollerberg C. Kältetechnik in Deutschland. Steckbriefe zu Kältetechnologien. Oberhausen: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT; 2022. https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/referenzen/flexkaelte/K%C3%A4ltetechnik_in_Deutschland-Steckbriefe_zu_K%C3%A4ltetechnologien.pdf

2.6 Absorptionskältemaschinen

Die Relevanz dieser Technologie zur Gebäudekühlung mittels Fernkälte oder bei Verfügbarkeit von hoher Abwärme wird in Österreich als mittel, mittels alleinstehender Einzelanlagen für Gebäude als niedrig eingeschätzt.

2.6.1 Beschreibung

Absorptionskältemaschinen (ABKM) nutzen den Effekt der Absorption und arbeiten mit einem thermischen Verdichter anstatt mit einem mechanischen Verdichter. Absorptionskältemaschinen werden daher mit einem Wärmestrom mit hoher Temperatur angetrieben. Die Wärme sollte auf einem Temperaturniveau zwischen 100 °C und 150 °C vorliegen, damit eine Absorptionskältemaschine wirtschaftlich betrieben werden kann (103).

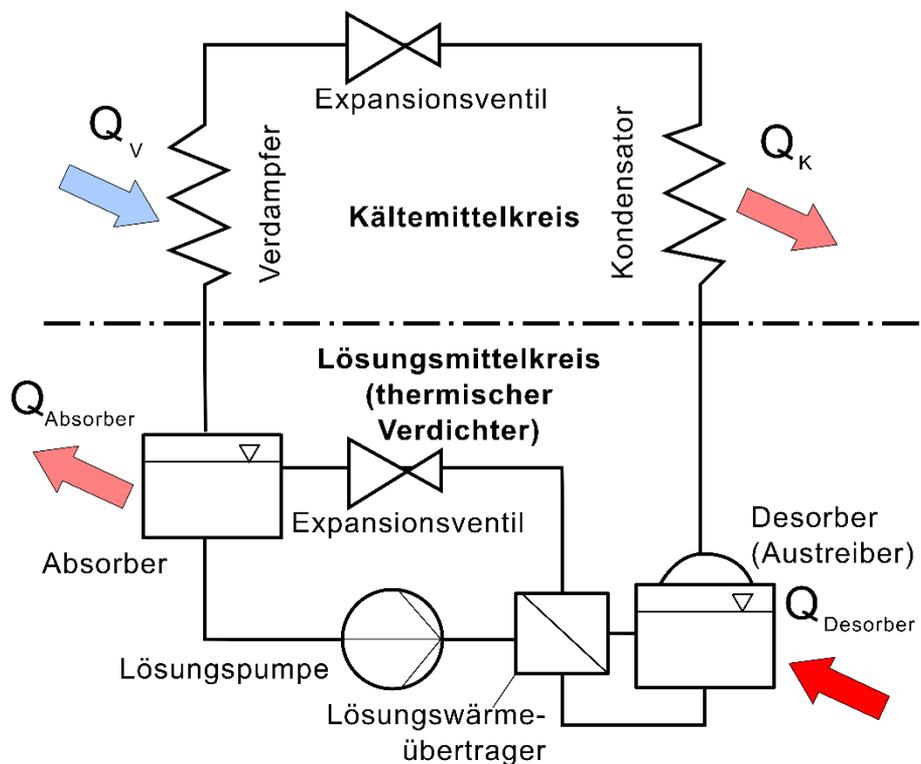
Absorption bezeichnet die Bindung eines Moleküls in einer flüssigen Phase. Dabei gehen die Stoffe in eine homogene flüssige Phase über. Dieser Vorgang ist exotherm, d.h., dass während der Absorption Wärme frei wird. Bei der Absorptionskältemaschine wird ein gasförmiges Arbeitsmittel (Kältemittel, KM) im flüssigen Lösungsmittel (LM) absorbiert. Folgende Stoffpaare finden in der Absorptionskälte-technik Anwendung:

- Ammoniak (KM) / Wasser (LM)
- Wasser (KM) / Lithiumbromid (LM)

Bei der Erzeugung von Klimakälte (Zieltemperatur > 0 °C) kommt hauptsächlich das Stoffpaar Wasser / Lithiumbromid zum Einsatz, während bei Zieltemperaturen < 0 °C Ammoniak / Wasser verwendet wird.

Abb. 17 zeigt ein Schema eines einstufigen Absorptionskälteprozesses. Hauptkomponenten einer Absorptionskältemaschine sind ein Verdampfer, ein Kondensator, ein Expansionsventil und der thermische Verdichter, der wiederum aus mehreren Komponenten (Absorber, Lösungspumpe, Desorber und einem zweiten Expansionsventil) besteht. Die ersten drei Komponenten erfüllen die gleiche Funktion wie bei einer Kompressionskältemaschine: Kältemittel (Ammoniak oder Wasser) werden im Verdampfer verdampft und nehmen Wärme aus dem zu kühlenden Objekt oder Raum auf. Bei ABKM mit dem Stoffpaar Wasser / Lithiumbromid ist darauf zu achten, dass im Verdampfer ein Unterdruck vorherrschen muss, damit das Wasser bei Temperaturen um 6 °C verdampfen kann.

Abb. 17: Schematische Darstellung einer einstufigen Absorptionskältemaschine.



Nach dem Verdampfer tritt das gasförmige Kältemittel in den thermischen Verdichter ein. Dort wird das gasförmige Kältemittel im Absorber im flüssigen Lösungsmittel (Wasser oder Lithiumbromid-Lösung) absorbiert. Dabei wird Wärme abgegeben, die mit einem Kühlmedium abgeführt werden muss. Das Kältemittel ist im Lösungsmittel gelöst und gelangt in die Lösungspumpe, die das Druckniveau erhöht. Da bei einer ABKM eine Flüssigkeit verdichtet wird, ist die elektrische Leistungsaufnahme der Pumpe deutlich geringer als bei Kompressionskältemaschinen. Im anschließenden Lösungswärmeübertrager wird das an KM reiche Lösungsmittel mit dem KM-armen Lösungsmittel nach dem Desorber vorgewärmt. Im Desorber wird das Kältemittel durch Zufuhr von thermischer Energie mit einer Temperatur von 100 °C bis 150 °C vom Lösungsmittel getrennt (ausgetrieben, desorbiert). Der reine Kältemitteldampf strömt in den Kondensator und wird dort, analog zu einer Kompressionskältemaschine, kondensiert, im Expansionsventil entspannt und wieder dem Verdampfer zugeführt.

Das heiße Lösungsmittel wird nach dem Desorber im Lösungswärmeübertrager abgekühlt und mit einem Expansionsventil entspannt, sodass Temperatur- und Druckniveau auf die entsprechenden Bedingungen im Absorber reduziert werden. Das gekühlte und entspannte Lösungsmittel tritt in den Absorber ein, um wieder gasförmiges Kältemittel aufzunehmen.

2.6.2 Technologiespezifische Eigenschaften

Zur energetischen Bewertung einer Absorptionskältemaschine wird das Wärmeverhältnis herangezogen:

$$- \text{Wärmeverhältnis } \beta [-] \text{ (99) (78)} = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_{\text{Desorber}} + P_{\text{el}}} \approx \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_{\text{Desorber}}}$$

- **Kälteleistung (\dot{Q}_0) [kW]**. Die nützliche Kälteleistung der Anlage. Diese kann bis zu 6 MW pro Maschine betragen (82). Ausschlaggebend für die Kälteleistung der Kältemaschine ist die Kühllast im Gebäude, die nach ÖNORM H 6040 oder VDI 2078 ermittelt wird.
- **Antriebsleistung ($\dot{Q}_{\text{Desorber}}$) [kW]**. Wärmestrom auf einem Temperaturniveau zwischen 100°C -150°C.
- **Elektrische Leistungsaufnahme der Lösungspumpe P_{el} [kW]**, wobei diese betragsmäßig deutlich geringer ist als die Antriebsleistung im Desorber ($P_{\text{el}} \ll \dot{Q}_{\text{Desorber}}$).

Das Wärmeverhältnis β beschreibt, wieviel Kälteleistung aus der eingesetzten Antriebsleistung (Wärmestrom auf hohem Temperaturniveau und elektr. Leistung Lösungspumpe) erzeugt werden kann. In der Praxis liegen diese Werte zwischen 1,8 und 2,5.

2.6.3 Anwendung

Ein wirtschaftlicher Einsatz von Absorptionskältemaschinen ist eng mit dem Vorhandensein von Abwärme bei passendem Temperaturniveau (100°C – 150°C) verbunden. Daher finden diese Kältemaschinen häufig Anwendung in Kombination mit Abwärmenutzung, z.B. bei Müllverbrennungsanlagen, Kraft-Wärmekopplung oder Einbindung von Kesselabwärme bei gleichzeitigem Kältebedarf (z.B. Produktionsprozesse, Fernkälteerzeugung). Die Antriebswärme kann auch durch Verbrennung von fossilen Energieträgern, wie Erdgas, erzeugt werden. So ist ein Einsatz für mobile Zwecke (z.B. Outdoor- oder Campingkühlschränke) mit gasbetriebenen Absorptionskältemaschinen möglich. Auch Solarthermische Anlagen können als Wärmequelle eingesetzt werden („solare Kühlung“).

Die spezifischen Investitionskosten für dieselbe Kältenennleistung liegen zwischen denen von Adsorptionskältemaschinen und elektrisch betriebenen Kompressionskältemaschinen und betragen je nach Kältenennleistung zwischen 200 und 2.250 €/kW (94), vgl. Abb. 13 in Kapitel 2.4.3.

Bei der Erzeugung von Klimakälte ist zu beachten, dass bei Absorptionskältemaschinen mit Wasser / Lithiumbromid das Wasser verdampft und in einer wässrigen Lithiumbromidlösung absorbiert wird. Lithiumbromid ist in seiner Molekularstruktur ein Salz, das in einer wässrigen Lösung gelöst wird. Diese Lösung bildet das Lösungsmittel für Absorptionskältemaschinen. Bei Zieltemperaturen für Kaltwasser von bis zu 6 °C muss das Wasser unter Vakuum stehen, damit es bei diesen Temperaturen verdampfen kann. Eine technische Herausforderung ist es daher, den Verdampfer im Vakuum zu betreiben und das System diffusionsdicht auszuführen.

Vor- und Nachteile

- + geringer elektrischer Leistungsverbrauch
- + Nutzung von Abwärme
- geringe Effizienz
- spezifische Investitionskosten 200 – 2.250 €/kW (Kompressionskälte üblicherweise ca. 800 €/kW) (94)
- Abwärme mit zwischen 100 und 150 °C sollte günstig am Standort vorhanden sein, damit wirtschaftlicher Betrieb möglich
- Wärmeabgabe an das Rückkühlmedium höher als bei Kompressionskältemaschinen

2.6.4 Literaturhinweise

- Rieberer R, Moser H, Kotenko O, Zotter G, Malenkovic I. IEA Wärmepumpenprogramm. Annex 34: Thermisch angetriebene Wärmepumpen für Heizung und Kühlung. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 48/2013. 2013. https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/iea_pdf/endbericht_201348_iea_hpp_annex34.pdf
- Steckbriefe zu verschiedenen aktiven Kühltechnologien: Schmidt D, Goetschkes C, Pollerberg C. Kältetechnik in Deutschland. Steckbriefe zu Kältetechnologien. Oberhausen: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT; 2022. https://www.um-sicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/referenzen/flexka-elte/K%C3%A4ltetechnik_in_Deutschland-Steckbriefe_zu_K%C3%A4ltetechnologien.pdf

2.7 Natürliche Wärmesenken

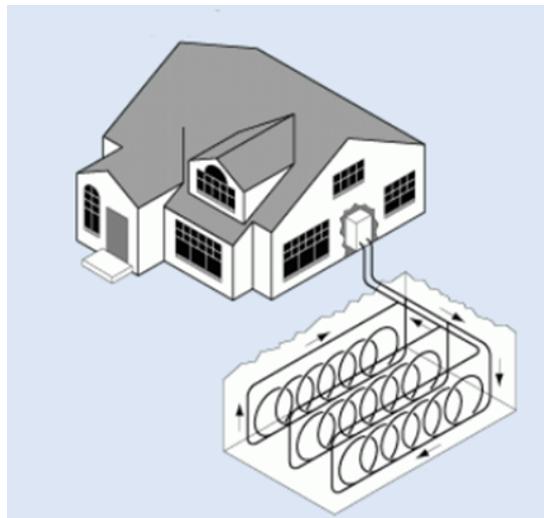
Die Relevanz dieser Technologie zur Gebäudekühlung wird in Österreich als hoch für (Sole-)Erdwärmeübertrager und Grundwasser, mittel für Oberflächengewässer/Deep Lake Cooling und niedrig für Erdreich- Luftregister und Dachteiche eingeschätzt.

Dieses Technologieprofil basiert auf dem einschlägigen Profil 2.7 *Natural Heat Sinks* des IEA EBC Annex 80 Resilient Cooling Projekts (1).

2.7.1 Beschreibung

Wärmesenken sind Medien, die überschüssige Wärme aus der Gebäudekühlung aufnehmen können. Zu ihnen zählen das Weltall, die Umgebungsluft, das Erdreich, Grundwasser sowie Oberflächengewässer, wie etwa das Meer oder Seen. Das Weltall kann mittels Sky Radiative Cooling verwendet werden und die Umgebungsluft durch Lüftungskühlung oder luftgekühlte Kompressionskältemaschinen; siehe die betreffenden Technologieprofile in den Kapiteln 2.3, 2.1 und 2.4. Natürliche Wärmesenken können im Freecooling-Modus (nur mit Ventilatoren oder Zirkulationspumpen) betrieben werden oder mit einer Kältemaschine gekoppelt werden, um ihre Kühlwirkung zu verstärken.

Abb. 18: Horizontaler geschlossener, in Schleifenform verlegter Sole-Erdwärmeübertrager, der mit einer Kältemaschine gekoppelt ist (104) (modifiziert).



Das Funktionsprinzip der natürlichen Wärmesenke beruht auf der Tatsache, dass die Temperatur der Wärmesenke niedriger als die Innenraumtemperatur des zu kühlenden Gebäudes ist, weshalb ein Wärmestrom von der warmen Innenraumluft oder dem erwärmten Kühlmedium zur Wärmesenke möglich ist. Mit natürlichen Wärmesenken lässt sich eine Temperaturabsenkung erzielen und der Kühlbedarf des Gebäudes abhängig von der Dimensionierung des Wärmeabgabesystems in der Wärmesenke und den klimatischen Bedingungen gänzlich oder teilweise decken. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, natürliche Wärmesenken zu nutzen:

- **(Sole-)Erdwärmeübertrager.** Diese horizontal oder vertikal installierten Wärmeübertrager geben die überschüssige Wärme aus dem Gebäude an das umgebende Erdreich ab.

Horizontale geschlossene Systeme (sogenannte Flächenkollektoren) werden nahe der Erdoberfläche in geraden Linien, mäanderförmig oder Schleifenform (Abb. 18) verlegt und dienen als Wärmeübertrager zwischen der Kühlhydraulik des Gebäudes und dem Erdreich. Sie werden auf unversiegelten Flächen installiert und benötigen ausreichend Platz frei von größerer Bepflanzung wie Sträucher und Bäume, um Wurzelschäden an den Rohren zu vermeiden. Vertikale, sogenannte Erdsondenwärmeübertrager haben eine Tiefe zwischen üblicherweise 20 und 150 m und benötigen weniger Fläche, sind jedoch in der Installation teurer. In den meisten Fällen werden Sole- Erdwärmeübertrager in Kombination mit einer Erdwärmepumpe für Heiz- und Kühlzwecke installiert; sie können allerdings auch im Freecooling-Modus ohne Wärmepumpe betrieben werden.

- **Erdreich- Luftregister**, auch Erdluftbrunnen oder Luft-Erdwärmeübertrager genannt. Diese Systeme bestehen aus horizontal verlegten Rohren in einer Tiefe von etwa 3 m, wo die Erdtemperatur ein konstantes Niveau nahe der jährlich durchschnittlichen Umgebungstemperatur der Region aufweist. Außen- oder Innenraumluft wird durch diese Kanäle geleitet und so gekühlt und dann dem Lüftungssystem als gekühlte Frischluft oder rezirkulierte Luft zur Verfügung gestellt. In den letzten Jahren ist man allerdings von diesem System aufgrund hygienischer Bedenken abgekommen. Stattdessen werden sogenannte Sole- Luft- Erdwärmeübertrager empfohlen, bei denen Sole aus einem Sole- Erdwärmeübertrager genutzt wird, um die angesaugte Frischluft im Lüftungssystem abzukühlen.
- **Grundwasser**. Grundwasser wird in Österreich üblicherweise über einen Entnahmebrunnen angesaugt, durch einen mit dem Kälteverteilsystem des Gebäudes gekoppelten Wärmeübertrager geführt und anschließend über einen Schluckbrunnen wieder in den Grundwasserkörper eingeleitet. Weiters gibt es die Möglichkeit, Wärme über einen Wärmeübertrager im Grundwasserkörper abzugeben, oder über „Standing Column Wells“, wo ein Grundwasserreservoir genutzt wird, das nur bei hohen Kältebelastungen unter Abgabe des Rücklaufwassers aus dem Gebäude in einen anderen Brunnen mit frischem Grundwasser versorgt wird.
- **Oberflächengewässer/Deep Lake Cooling**. Die niedrigste Wassertemperatur am Grund eines Oberflächengewässers kann bis zu 4 °C in Süßwasserseen betragen. Diese sogenannten Deep Lake Cooling- Systeme sind in Österreich wenig verbreitet (z. B. wird 7 ° kaltes Seewasser aus dem Bodensee mittels Freecooling zur Kühlung eines Hotels genutzt (105)). Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung von Flusswasser, das allerdings häufiger für Rückkühlzwecke als für Freecooling genutzt wird (z. B. wird Wasser aus dem Donaukanal zur Rückkühlung der Kältemaschinen im Trillple und Austro Tower genutzt (106) sowie auch für Rückkühlzwecke in der Fernkälteerzeugung, s. Kapitel 2.9). Wie auch bei grundwassergekühlten Systemen begrenzt die Wassernachbildungsrate des Gewässers die maximal mögliche Entnahmemenge.
- **Dachteiche**. Dies ist ein System, das in der Literatur zwar viel diskutiert wird, aber in Österreich nicht verbreitet ist. Momentan wird es hauptsächlich in heißen und trockenen Klimaten (arabischer Raum, Mittelmeerraum) erforscht. Prinzipiell hat das Wasser in einem Dachteich mehrere Funktionen: an sonnigen und heißen Tagen wird ein Teil der Sonnenstrahlung reflektiert, ein Teil wird unter Erwärmung des Wassers aufgenommen und ein weiterer Teil durch Verdunstung abgeführt. In der Nacht strahlt das warme Wasser Wärme an den Himmel ab. Das Wasser dient so als Puffer zwischen Außen- und Innenraumklima und reduziert die Amplitude von Innenraumtemperaturschwankungen. Ein abgedeckter durchlüfteter

Dachteich oder ein mit einem Wasser-/Luft-Wärmeübertrager ausgestatteten Dachteich kann auch zur Kühlung von Zuluft für Lüftungszwecke verwendet werden.

Abhängig von Art und Temperatur der Wärmesenke kann die Wärmeaufnahme über Luft oder Wasser als Wärmetransportmedium erfolgen. Gekühlte Luft wird häufig direkt zur Lüftung verwendet, während (vor)gekühltes Wasser abhängig von der Temperatur in Kaltwassersätzen, thermisch aktiven Bauteilen oder Air Handling Units eingesetzt wird. Wasser eignet sich hier aufgrund seiner hohen Wärmekapazität und -leitfähigkeit besonders gut als Wärmetransportmedium.

Die Nutzung von wasser- und erdgekühlten Kühlsystemen führt zu wenig oder keiner akustischen und ästhetischen Beeinträchtigung. Ein Wärmeübertragungsprozess stellt allerdings in jedem Fall eine Erwärmung der jeweiligen Wärmesenke dar.

2.7.2 Technologiespezifische Eigenschaften

Erdgekoppelte Wärmeübertrager

- **Wärmeleitfähigkeit der Wärmesenke [W/(m·K)]** (107). Dieser Wert gibt das Vermögen eines Stoffes an, Wärme zu leiten. Die Wärmeleitfähigkeit des Erdreiches ist von seiner Zusammensetzung, Textur und von seinem Wassergehalt abhängig. Sie schwankt abhängig vom Bodentyp üblicherweise zwischen 0,1 und 3 W/(m·K) (108) abhängig von Nässe, Körnung sowie Luft- und Wassereinschlüssen.
- Die **spezifische [W/m]** und **installierte [kW] Kühlleistung** wird über einen Thermal Response Test oder Bodengutachten bestimmt.⁵ Zum Beispiel kann die spezifische Kühlleistung für vertikale Erdwärmesonden zwischen 22 und 63 W pro Meter Sondenlänge betragen (112). Bei horizontalen Erdwärmübertragern liegt die spezifische Kühlleistung zwischen 17 und 35 W/m Rohrlänge (113).
- **Maximal erlaubte Rücklauftemperatur [°C]** des Kühlmediums. Diese wird durch Vorschriften hinsichtlich der ökologischen und chemischen Stabilität der genutzten Wärmesenke reguliert; s. Anwendungsgrenzen weiter unten.
- **Erdreich-Luftregister** in moderaten Klimazonen zeigen eine spezifische Maximalkühlleistung von 45 W/m² Kollektorfläche bei einer Außenlufttemperatur von 32 °C (114). Die Kälteleistung eines **Sole- Luft- Erdwärmeübertragers** (bestehend aus einem horizontal verlegten Erdwärmekollektor mit 500 m Rohrlänge gekoppelt mit einem Sole- Luft- Wärmeübertrager) beträgt beispielsweise im Mittel 3 und maximal 7 W/m Rohrlänge, was die Vorkühlung der Zuluft um bis zu 7 K auf etwa 28 °C ermöglicht (115).
- **Nennleistung der Hilfsmaschinen [kW]**. Die maximal gezogene Leistung der für den Betrieb des Kühlsystems notwendigen Ventilatoren, Förder- oder Zirkulationspumpen.

Die Kühlleistung von Erdwärmübertragern ist von Temperatur, Wärmekapazität und -leitfähigkeit des Erdreichs, von Rohrlänge und -durchmesser, Wärmekapazität und Fließgeschwindigkeit des Wärmetransportmediums und, für Erdreich-Luftregister, der Eintrittstemperatur des Wärmeträgermediums, abhängig. Durch Beschattung, Befeuchtung oder hellen Anstrich der Erdoberfläche über dem

⁵ vgl. z. B. (107), (109), (110) und (111).

Wärmeübertrager ist eine Absenkung der Oberflächentemperatur und damit bei Flachkollektoren eine Erhöhung der Kühlleistung möglich.

Wassergekoppelte Systeme

- Geschlossene wassergekoppelte Wärmeübertrager können eine **spezifische Kühlleistung** von zwischen 35 und 117 W/m Rohrlänge bereitstellen (113).
- Bei offenen Systemen sind die **Gewässernachbildungsrate [m³/Tag]** sowie wasserrechtliche Vorschriften betreffend der **maximal erlaubten Entnahmemenge [m³/Tag]** weitere wichtige Größen für die Berechnung der Kühlleistung. Beispielsweise erreicht das im Freecooling betriebene Grundwasserkühlsystem der WU Wien mit einer maximalen Wasserentzugsmenge von 150 l/s (ca. 13.000 m³/Tag), einer Grundwassertemperatur von 12 °C und einer bewilligten Rückgabetemperatur von 17 °C eine Kälteleistung von 3,2 MW (116) (117).
- **Maximal erlaubte Rücklauftemperatur [°C]** des Kühlmediums; s. Anwendungsgrenzen weiter unten.
- **Nennleistung der Hilfsmaschinen [kW]**.

Bei der Nutzung von Grundwasser ist das lokale Klima sowie Boden- und Aquifereigenschaften wie etwa Wassermenge, -temperatur und -nachbildungsrate ausschlaggebend für die Kühlleistung der Wärmesenke. Die Erschließung oberflächennaher Grundwasserkörper ist billiger, kann aber zu geringerer Effizienz aufgrund von stärker schwankenden Grundwassertemperaturen führen.

Bei der Nutzung von Oberflächengewässern muss darauf geachtet werden, dass zwischen Entnahme- und Rückgabepunkten ein ausreichender Abstand eingehalten wird, um Kurzschlussströmungen zu vermeiden.

Dachteiche

- Die Kühlleistung eines Dachteiches hängt von der **Wassertiefe [m]** einerseits und der **Dicke [m], Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)], Strahlungsabsorptionsgrad [-], dem solaren Reflexionsgrad [-] und Emissionsgrad [-]** der Dachoberfläche und evtl. vorhandenen Dachteichabdeckungen andererseits ab. Beispielsweise liegen die täglichen Wärmeeinträge durch einen Dachteich laut einer Studie von Chtioui et al. (118) tagsüber (max. Außenlufttemperatur 27,6 °C, max. Sonneneinstrahlung 511,5 W/m²) leicht über den Wärmeverlusten in der Nacht mit einem kleinen Überschuss von 0,01 kWh/(m²·Tag). Im Vergleich dazu zeigt ein unbedecktes Bitumendach einen Überschuss von 0,323 kWh/(m²·Tag) und ein „kühles Dach“ (mit kühlem Anstrich mit einem Emissionsgrad von 0,92 und einem Strahlungsabsorptionsgrad von 0,07) einen Nettowärmeverlust von 0,211 kWh/(m²·Tag) (118). Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass Dachteiche abhängig von den klimatischen Bedingungen und den Dachteicheigenschaften die Innenraumtemperatur um mehrere °C verringern können (119).
- **Nennleistung der Hilfsmaschinen [kW]** (z. B. für Wasserpumpen oder bei der Nutzung von Wasser-/Luft-Wärmeübertragern zur Raumluftkühlung).

Aufgrund des maßgeblichen Beitrags der Evaporationskühlung sind Dachteiche besonders effektiv in heißen und trockenen Klimaregionen und weniger wirkungsvoll in feuchten Klimaten.

Weitere allgemeine Informationen

Effizienzverluste durch den Transport des Kühlmediums von der Wärmesenke zum Gebäude sowie bei der Kälteabgabe sollten durch kurze Strecken und adäquate Kälteabgabesysteme so gering wie möglich gehalten werden. Dies ist besonders bei raumtemperaturnahen Vorlauftemperaturen wichtig, wofür sich Strahlungssysteme wie etwa Bauteilaktivierungen besser eignen als konvektive Systeme wie z. B. Kaltwassersätze.

Im Vergleich zu aktiven Systemen ist die passive Nutzung von Wärmesenken (Freecooling) in aller Regel effizienter, weil für den Betrieb nur Pumpen oder Ventilatoren benötigt werden. Die höheren Investitionskosten eines Erdgebundenen Systems stehen den höheren Betriebskosten eines Außenluftgekühlten Systems gegenüber. Bei der Verwendung einer Kältemaschine zur Erhöhung der Kühlleistung der Wärmesenke steigt die Effizienz der Anlage bei niedrigeren Wärmesenkentemperaturen.

2.7.3 Anwendung

Die Investitionskosten von Erdsonden belaufen sich auf etwa 75-90 €/Laufmeter inklusive Zusammenführung und Glykolfüllung und jene von Flächenkollektoren auf etwa 30-45 €/m².

Technologieausreifungsgrad

Abgesehen von Dachteichen sind alle in diesem Profil erwähnten Technologien weit fortgeschritten. Vor allem Sole-Erdwärmeübertrager, Erdreich-Luftregister und Grundwasser werden seit mehreren Jahrzehnten erfolgreich eingesetzt.

Grenzen

Die örtliche Verfügbarkeit von natürlichen Wärmesenken ist eine maßgebliche Herausforderung für ihre Anwendbarkeit. Während Erdreich theoretisch leicht verfügbar ist (abgesehen von dicht bebautem Gebiet), sind Grund- und Oberflächengewässer nicht überall verfügbar. Für horizontale Erdwärmeübertrager und Erdreich-Luftregister muss ausreichend Platz vorhanden sein; Erdsonden benötigen günstige geologische Bedingungen und Grundwasser sowie Deep Lake Cooling sind durch die Wassernachbildungsrate des Gewässers begrenzt. Um eine ökologische Beeinträchtigung zu vermeiden, sollte das rückgeführte Wasser bei Oberflächengewässern nicht mehr als 5 – 7 °C wärmer als das dort vorhandene Wasser sein.

Eine weitere Einschränkung ist die Temperatur der Wärmesenke. Diese sollte möglichst niedrig sein, um eine gute Kühlleistung zu erzielen.

Vorschriften hinsichtlich maximal erlaubter Rücklauftemperaturen aus dem Gebäude ins Erdreich und Grundwasser zum Schutz der ökologischen und chemischen Stabilität der natürlichen Wärmesenke bilden eine weitere Grundlage zur Planung von erd- und wassergekühlten Kühlsystemen. In Wien beispielsweise ist die Rückführung von Grundwasser in den Grundwasserkörper bei mit maximal 18 °C erlaubt (120). Bei Erdsonden liegt die maximal erlaubte Rücklauftemperatur des Wärmeträgermediums aus dem Gebäude ins Erdreich bei 30 °C (121). In Oberösterreich und Kärnten liegt der Grenzwert der maximalen Temperatur des rückgeführten Grundwassers bei 20 °C (122) (123), in Salzburg darf die Rückgabtemperatur um nicht mehr als 5 K gegenüber der Temperatur des entnommenen Grundwassers abweichen (124). Weiters sind Entnahme und Versickerung von Grundwasser in allen Bundesländern lt. WRG 1959 zu genehmigen (121). Für die Planung von Kühlsystemen, die das Grundwasser oder den Untergrund als Wärmesenke nutzen, ist das ÖWAV RB 207:2009 zu beachten.

Bei der direkten Nutzung von Luft aus Erdreich-Luftregistern sind Hygienestandards hinsichtlich der Innenraumluftqualität einzuhalten.

Dachteiche sind umso effektiver, je größer die vom Dachteich bedeckte Dachfläche im Vergleich zur Fassadenfläche des Gebäudes ist, weshalb diese Lösung für mehrgeschoßige Wohnhäuser weniger gut geeignet ist. Der Bau eines Dachteichs ist von der Tragfähigkeit des Dachs abhängig und erfordert eine gewissenhafte Ausführung der Abdichtung, um die statische und hygienische Sicherheit des Bauwerks zu gewährleisten.

Nachrüstbarkeit

Bei der Planung von Neubauprojekten ist die Nutzung natürlicher Wärmesenken relativ einfach vorzusehen, während der hohe Platzbedarf für viele der natürlichen Wärmesenkenysteme bei Bestandsgebäuden eine Herausforderung darstellt. Sie sind gut mit anderen Kühltechnologien kombinierbar, können aber bei geringem Platzangebot in Konkurrenz zu anderen gebäudetechnischen Anlagen stehen; wie etwa Dachteiche und PV.

Vor- und Nachteile

- + große Palette an erprobten Technologien
- + auch passive Systeme (Freecooling) mit Wärmesenken kombinierbar
- Verfügbarkeit von verschiedenen Wärmesenken (z.B. Gewässer) regional unterschiedlich
- mögliche Umweltauswirkungen durch Wärmeab- oder -zufuhr
- Platzbedarf einiger Technologien

2.7.4 Literaturhinweise

- Technologieleitfaden zu Erdwärme der Stadt Wien: Niederbrucker R, Haslinger E. Erdwärme! voraus. Technologieleitfaden Erdwärme. Wien: Magistrat der Stadt Wien; 2016. <https://www.digital.wienbibliothek.at/wbrup/download/pdf/3598184?originalFilename=true>
- Resilienzbewertung verschiedener Kühltechnologien: Zhang C, Kazanci OB, Levinson R, Heiselberg P, Olesen BW, Chiesa G, Sodagar B, Ai Z, Selkowitz S, Zinzi M, Mahdavi A, Teufl H, Kolokotroni M, Salvati A, Bozonnet E, Chtioui F, Salagnac P, Rahif R, Attia S, Lemort V, Elnagar E, Breesch H, Sengupta A, Wang LL, Qi D, Stern P, Yoon N, Bogatu D-I, Rupp RF, Arghand T, Javed S, Akander J, Hayati A, Cehlin M, Sayadi S, Forghani S, Zhang H, Arens E, Zhang G. Resilient cooling strategies – A critical review and qualitative assessment. *Energy and Buildings*. 2021; 251: 111312. doi:10.1016/j.enbuild.2021.111312
- Kapitel 3.2 “Ventilative cooling”, 3.6 “Ground source cooling”, 3.7 “Night sky radiative cooling” im Annex 80 State of the Art Review: Holzer P, Stern P, Akander J, Ai Z, Arens E, Arghand T, Attia S, Bogatu D-I, Breesch H, Cehlin M, Chiesa G, Chtioui F, Elnagar E, Hayati A, Heiselberg P, Javed S, Kazanci O, Kolokotroni M, Lemort V, Levinson R, Zinzi M. International Energy Agency EBC Annex 80 - Resilient Cooling of Buildings - State of the Art Review. 2022.
- Abschnitte über das Erdreich und Wasser als Wärmesenken in: Samuel DGL, Nagendra SMS, Maiya MP. Passive Alternatives to Mechanical Air Conditioning of Building: A review. *Building and Environment*. 2013; 66: 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.016>

- Literaturhinweise im Kapitel 2.4.4 (Kompressionskältemaschinen)

2.8 Kälteabgabesysteme

Für die Verteilung und Abgabe von Kälte (bzw. physikalisch korrekter: Aufnahme und Sammlung von Wärme) aus einem Gebäude stehen verschiedene Abgabesysteme zur Verfügung, über die die mittels der in Kapitel 2.1 bis 2.7 beschriebenen Technologien erzeugte oder bereitgestellte Kälte in den Innenraum eingebracht werden kann. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Aufgaben, das Funktionsprinzip und die wichtigsten Betriebsbedingungen der gängigeren und einiger noch in Entwicklung befindlicher, aber aussichtsreich scheinender Kälteabgabesysteme.

2.8.1 Lüftung

Die Notwendigkeit der Wohnraumlüftung resultiert aus den Ansprüchen an die Qualität der Innenraumluft, deren Schadstoffbelastung, Feuchtegehalt und Temperatur sich in einem gesunden und behaglichen Rahmen bewegen sollen. Daraus ergeben sich die verschiedenen Aufgaben der Lüftungstechnik, die sich in luft- und wärmetechnische Aufgaben einteilen lassen. Die lufttechnischen Aufgaben umfassen hierbei die Außenluftversorgung, Luftreinhaltung und Feuchteregulierung sowie etwa auch im Falle von raumluftversorgten Feuerungen die Verbrennungsluftzufuhr und die Schutzdruckhaltung in Reinnräumen oder Sicherheitslabors. Zu den wärmetechnischen Aufgaben zählt die Abfuhr thermischer Lasten. (125) (126)

Ein zentraler Anspruch an die Lüftung ist die Einhaltung der hygienischen Anforderungen an die Raumluft im Sinne von maximalen Konzentrationen an CO₂ und anderen Schadstoffen sowie Staub, Bakterien und Sporen (125). Die dafür notwendige sogenannte hygienische Luftwechselrate ist von der Gebäudenutzung abhängig und bezeichnet den ausgetauschten Luftvolumenstrom bezogen auf das Raumluftvolumen (127). Beispielsweise beträgt die hygienische Luftwechselrate für ein Wohngebäude mit bis zu zwei Nutzungseinheiten 0,28/h und für ein Wohngebäude mit mehr als zwei Nutzungseinheiten 0,38/h (128) (129). Lüftungsanlagen werden so ausgelegt, dass die Zuluft in Wohn-, Arbeits- und Schlafräumen zugeführt und dann als Abluft in Küche und Sanitärräumen wieder abgezogen wird. In der ÖNORM H 6038 sind die notwendigen Zuluft- bzw. Abluftvolumenströme je Raum in m³/h angegeben. Beispielsweise liegt der Richtwert für den Zuluftvolumenstrom in Schlafzimmern bei 25 m³/h pro Person und in Arbeitszimmern bei 30 m³/h pro Person; In der Küche und im Badezimmer wird ein Abluftvolumenstrom von mindestens 30 m³/h empfohlen (130).

Zur Einhaltung der erforderlichen luft- und wärmetechnischen Anforderungen gibt es verschiedene Arten von Lüftungskonzepten, die zuallererst in die Kategorien der natürlichen und mechanischen Lüftung eingeteilt werden können. Die natürliche oder freie Lüftung beruht auf dem natürlichen durch Druck- oder Dichteunterschiede zwischen Innen- und Außenluft hervorgerufenen Luftaustausch. Hierzu zählen neben der Fensterlüftung auch die Schacht- und Dachaufsatzlüftung. Die durch Undichtigkeiten in der Gebäudehülle hervorgerufene Fugenlüftung spielt nur noch im Altbau eine Rolle. Die Schachtlüftung nutzt den thermischen Auftrieb der warmen Innenraumluft, der sich mit der Höhe des Schachts verstärkt und ist insbesondere in Gebäuden des frühen 20. Jahrhunderts anzutreffen. Daraus folgt aber auch, dass sich die Strömungsrichtung bei kühlen Innen- und heißen Außentemperaturen umkehren kann, sodass die Schachtlüftung durch andere Lüftungsmaßnahmen ersetzt werden muss. Beim Einsatz der Schachtlüftung sind jedenfalls die geltenden Brandschutzbestimmungen zu beachten. Die Dachaufsatzlüftung wird ebenfalls durch die Temperaturunterschiede zwischen Innen- und Außenluft angetrieben und wird vor allem in Industriegebäuden und Hallen eingesetzt. Die wohl am weitest verbreitete Art der freien Lüftung ist die Fensterlüftung. Hierbei werden Stoß- und Dauerlüftung unterschieden, wobei Stoßlüften das kurzzeitige Öffnen der Fenster

beschreibt und die Dauerlüftung den Zustand dauernd geöffneter Fenster. Der notwendige hygienische Luftwechsel lässt sich schon mit gekippten Fenstern schnell erreichen und sogar deutlich überschreiten; so beträgt die Luftwechselrate bei gekipptem Fenster schätzungsweise 0,3 – 3/h, bei halb offenem Fenster 2 – 10/h und bei ganz offenem Fenster 5 – 15/h. Es ist daher vor allem bei ungünstigen Außentemperaturbedingungen Stoßlüften anzuraten, um ungewollte Lüftungswärmegewinne im Sommer und Lüftungswärmeverluste im Winter zu minimieren. Mit freier Lüftung können Kühllasten bis etwa 30 W/m² bewältigt werden. (131) (132)

Die mechanische oder maschinelle Lüftung mittels raumlufttechnischer Anlagen (RLT-Anlagen) bezeichnet komplexere Lüftungssysteme, die sich aus mehreren aktiv betriebenen Komponenten zur Förderung des Transportmediums sowie zur Konditionierung (Temperatur, Feuchtegehalt) der Zuluft zusammensetzen. Je nach Kühllast des betreffenden Gebäudes kann bei geringer Kühllast eine Lüftung und Konditionierung mittels nur-Luft-Systemen erfolgen. Bei höheren Kühllasten sollte auf eine Trennung der Lüftungstechnischen von den wärmetechnischen Aufgaben unter Heranziehung eines eigenen Lüftungssystems und separaten Kühlanlagen in Form von Luft-Wasser oder Luft-Kältemittelsystemen zurückgegriffen werden. Bei nur-Luft-Anlagen werden alle thermischen und hygienischen Lasten sowie Feuchtelasten über den Lüftungsstrom abgeführt. Der notwendige Zuluftvolumenstrom errechnet sich daher aus der notwendigen thermischen Leistung der Lüftung. Die Leistungsregelung der nur-Luft-Anlage lässt sich über den Luftvolumenstrom (VVS – Variabel-Volumenstrom-Systeme mit konstanter Zulufttemperatur) oder die Lufttemperatur (KVS – Konstant-Volumenstrom-Systeme mit variabler Zulufttemperatur) bewerkstelligen. Bei höheren Kühllasten sind Luft-Wasseranlagen anzuraten, da sonst zu hohe Luftvolumenströme und Ventilatorleistungen notwendig werden, was nur-Luft-Anlagen höchst ineffizient werden lässt. Nur-Luft-Anlagen können als Einkanal- oder Zweikanalanlagen ausgeführt werden, wobei heutzutage aufgrund des hohen Ventilatorenergieverbrauchs von Zweikanalanlagen nur noch Einkanalanlagen in Betracht gezogen werden. Bei Einkanalanlagen gibt es einen Zuluftkanal, über den die konditionierte Luft an die Räume abgegeben wird, während bei Zweikanalanlagen ein Warmluft- und ein Kaltluftkanal mit vordefinierten Temperaturniveaus installiert wurde, deren Luftströme abhängig vom jeweiligen Raumtemperatursollwert gemischt werden können. Die notwendige wärme- und feuchtetechnische Aufbereitung der Zuluft wird über Luftherhitzer bzw. Luftkühler sowie Luftbe- und -entfeuchter bewerkstelligt. Dies sind Wärmeübertrager, deren Rohre an der Luftseite eine berippte Oberfläche haben und auf der anderen Seite mit Dampf, Wasser oder Kältemittel zur Erhitzung, Kühlung und/oder Entfeuchtung der Zuluft durchströmt sind. Mechanische Lüftungssysteme eignen sich darüber hinaus auch zur Wärmerückgewinnung, die im Kühlfall zur Vorkühlung des Zuluftstromes genutzt werden kann und so zu Einsparungen in der aktiven Kühlung führt. (126) (133) (134)

Bei höheren Kühllasten ist, wie bereits oben erwähnt, die Trennung der lufttechnischen von den wärmetechnischen Aufgaben effizienter. Hier wird neben dem luftführenden Lüftungssystem ein zweites wasserführendes System oder eine Luft-Kältemittelanlage zur Heizung oder Kühlung eingesetzt. Hierfür werden in den Räumlichkeiten Wärmeübertragerflächen vorgesehen, die der Wärmeabfuhr im Kühlfall und/oder der Wärmezufuhr im Heizfall dienen. Oftmals kann die Zuluft im Wärmeübertrager an die Umgebung abgegeben werden, oder es wird ein von der Raumtemperierung unabhängiges Lüftungssystem installiert, sodass die Wärmeübertrager nur noch als Umluftkühler oder -erhitzer dienen. (126)

Zu den wichtigsten Wärmeübertragerflächen oder Kälteabgabesystemen zählen bei den Luft-Wasser-Anlagen etwa Kühlkonvektoren sowie Gebläsekonvektoren, und bei den Luft-Kältemittelanlagen die Direktverdampfer.

Für Lüftungsanlagen in Wohngebäuden ohne aktiver Lufttemperierung oder Feuchteregulierung können jährliche Kosten für Wartung, Inspektion und Instandhaltung von 1,5 – 2 % der

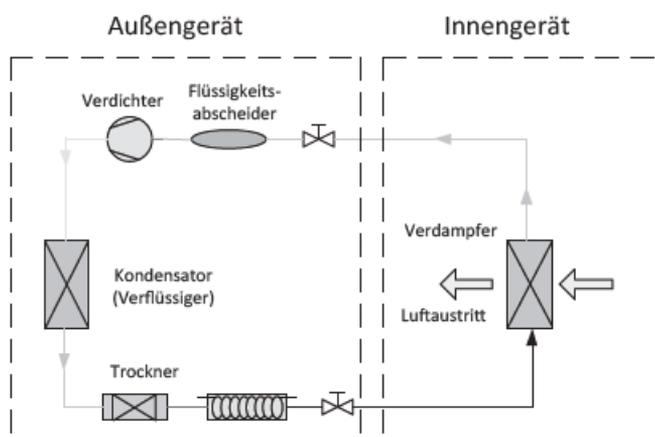
Investitionskosten der Anlage angenommen werden. Bei Lüftungsanlagen für Bürogebäude mit Luftkühlung und Feuchteregulierung belaufen sich die jährlichen Kosten für Wartung, Inspektion und Instandhaltung auf 3 – 4 % der Investitionskosten. (135)

2.8.2 Direktverdampfer (Klimaanlage/VRF-Systeme)

Direktverdampfer oder Luft-Kältemittelsysteme umfassen alle Kälteabgabesysteme, die die Luft direkt im Raum durch Verdampfung von Kältemittel in einem Innengerät mit Verdampfer kühlen. Diese Systeme gehören den Kompressionskältemaschinen an und umfassen insbesondere VRF (Variable Refrigerant Flow)-Systeme sowie Single- und Multiple-Split-Anlagen. (126)

In Abb. 19 ist ein Schema einer Single-Split-Anlage mit den wesentlichen Komponenten in der Innen- und Außeneinheit dargestellt. Bei Multiple-Split-Anlagen und VRF-Systemen sind mehrere Inneneinheiten je Außeneinheit vorhanden. Die Funktionsweise von Kompressionskältemaschinen wird in Kapitel 2.4.1 erläutert.

Abb. 19: Schema einer Single-Split-Anlage (126).



VRF-Systeme regeln die Menge des zirkulierenden Kältemittels entsprechend der angeforderten Wärmemenge. Es können je Außeneinheit mit zwischen 11 und 180 kW Kühlleistung bis zu 64 individuell regelbare Inneneinheiten angeschlossen werden. VRF-Systeme können so wie auch Single- und Multiple-Splitanlagen leicht nachgerüstet werden. Bei Single-Splitanlagen versorgt eine Außeneinheit in der Regel eine Inneneinheit; jedoch ist es auch möglich, bis zu vier Inneneinheiten mit einer Außeneinheit zu versorgen, wobei die Kühlleistung nur für alle Inneneinheiten gleich eingestellt werden kann. Diese Lösung wird daher nur für die Kühlung großer Räume eingesetzt, in denen sich alle Inneneinheiten der Single-Splitanlage befinden. Bei Multiple-Splitanlagen versorgt eine Außeneinheit bis zu fünf Inneneinheiten, die hier allerdings einzeln regelbar sind. Die Inneneinheiten von Splitanlagen werden für verschiedene Raumgrößen ausgelegt und haben üblicherweise eine Kühlleistung von zwischen 1 und 5 kW je Stück. (126) (132) (136)

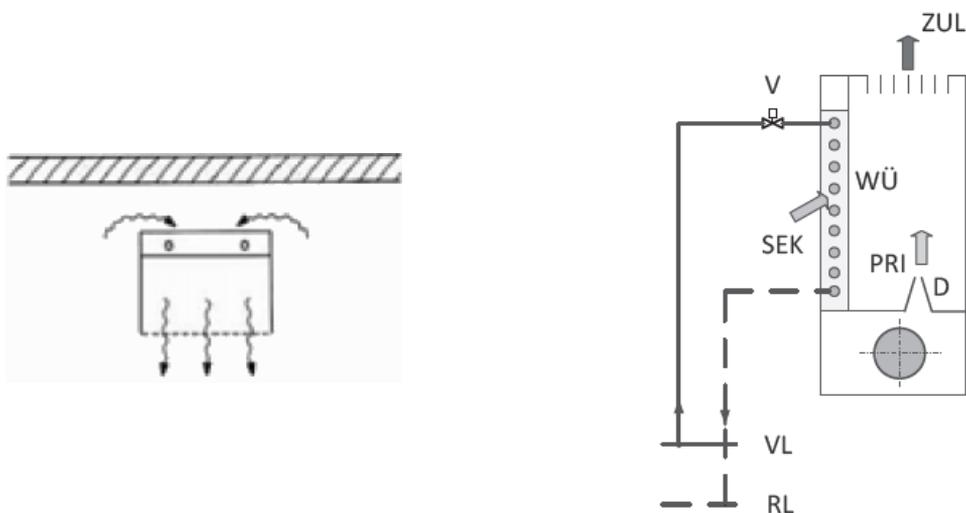
Die Vorteile der Direktverdampfer liegen in ihrer guten Nachrüstbarkeit sowie vor allem bei Single- und Multiple-Splitanlagen der einfachen Installation. Darüber hinaus sind diese Systeme individuell regelbar und erreichen schnell die gewünschten Zieltemperaturen. VRF-Systeme ermöglichen sogar das zeitgleiche Heizen einzelner Zonen, während andere gekühlt werden. Außerdem kann die Raumluft mit dieser Technologie entfeuchtet werden.

Zu den Nachteilen zählen allerdings der insbesondere bei Single- und Multiple-Splitanlagen hohe Stromverbrauch, da diese Anlagen in den allermeisten Fällen luftgekühlt sind. Zusätzlich geht damit der Platzbedarf sowie die Lärm- und Abwärmelast am Aufstellungsort der Außeneinheiten einher.

2.8.3 Kühlkonvektoren/Induktionsgeräte

Kühlkonvektoren können in aktive und passive Modelle eingeteilt werden. Passive Kühlkonvektoren stellen im Prinzip wasserdurchströmte Wärmeübertrager dar, die die aufsteigende warme Luft abkühlen ohne eine erzwungene Konvektion der Luft zu erzeugen (126). Die abgekühlte schwere Luft sinkt wieder ab, vgl. Abb. 20. Passive Kühlkonvektoren werden daher nahe der Decke angebracht. Sie können Kühllasten bis zu etwa 70 W/m^2 abdecken, die Behaglichkeitsgrenze liegt jedoch durch die als unangenehm empfundenen Fallluftströme bei 50 W/m^2 (72) (137).

Abb. 20: Links: Funktionsprinzip eines passiven Kühlkonvektors (126) (modifiziert). Rechts: Funktionsprinzip eines aktiven Kühlkonvektors (Induktionsgeräts) (126) (modifiziert). VL = Kaltwasservorlauf, RL = Kaltwasserrücklauf, V = Ventil, D = Düse, PRI = Primärluft, SEK = Sekundärluft, ZUL = Zuluft, WÜ = Wärmeübertrager.



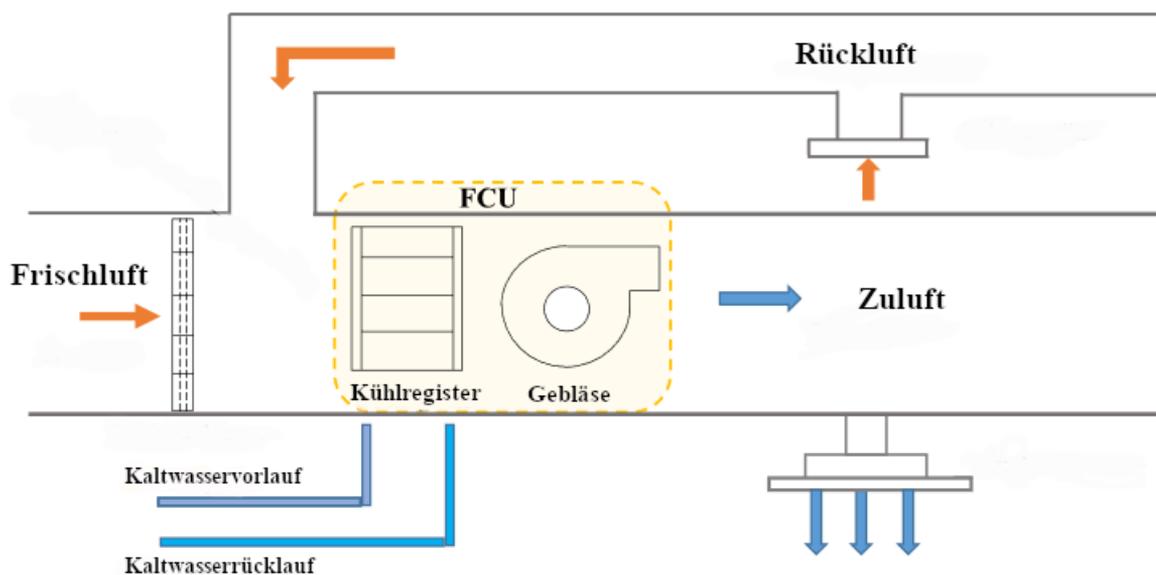
Aktive Kühlkonvektoren kombinieren durch Anwendung des Induktionsprinzips die Lüftungstechnik mit der wärmetechnischen Funktion. Hierbei wird feuchtetechnisch aufbereitete Frischluft (Primärluft) über Düsen mit hoher Geschwindigkeit eingeblasen, wodurch über einen mit Kaltwasser durchströmten Wärmeübertrager eintretende (induzierte) Raumluft (Sekundärluft) angesogen wird, die sich mit der Primärluft vermischt (126). Die Vorlauftemperatur von aktiven und passiven Kühlkonvektoren beträgt üblicherweise zwischen 16 und 18 °C und die maximal abzudeckende Kühllast von aktiven Kühlkonvektoren reicht bis zu 200 W/m^2 (72) (137).

Kühlkonvektoren haben den Vorteil, dass sie billiger als Flächenkühlsysteme sind und sehr effizient funktionieren, da auch sie nicht so kalte Vorlauftemperaturen wie andere Kühlsysteme benötigen; jedoch besteht bei passiven Kühlkonvektoren das Risiko unangenehmer Zugscheinungen durch die kalte Fallluft (72). Weiters sind Kühlkonvektoren leichter regelbar und nachrüstbar als Flächenkühlsysteme.

2.8.4 Gebläsekonvektoren (Fan Coil Units)

Gebläsekonvektoren oder Fan-Coil-Units zählen zu den Luft-Wasser-Systemen und bestehen ähnlich wie die Kühlkonvektoren aus einem Wärmeübertrager, der allerdings mit einem Ventilator ausgestattet ist, um die Raumluft durch den Wärmeübertrager anzusaugen und wieder an den Raum abzugeben. Fan-Coil-Anlagen können mit oder ohne Zuluft einlass ausgeführt sein und so entweder auch als Lüftungsgerät oder nur zur Kühlung dienen. Sie können an der Decke oder auch im Brüstungsbereich installiert werden oder direkt in das Lüftungssystem integriert werden (vgl. Abb. 21). (126)

Abb. 21: Schema für eine Fan Coil Anlage mit Zuluft- und Rücklufteinlass als Teil eines Lüftungssystems (138) (modifiziert).



Gebläsekonvektoren können Kühllasten bis zu 90 W/m^2 bedienen. Sie sind günstig in der Anschaffung, nachträglich installierbar und individuell regelbar. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass sie mit ausreichend niedrigen Vorlauftemperaturen ($6 - 8 \text{ }^\circ\text{C}$) auch die Raumluft entfeuchten. Hierfür ist ein Kondensatanschluss notwendig. Allerdings nehmen diese Geräte Platz im Wohnraum in Anspruch, und da diese Anlagen mit Ventilatoren ausgestattet sind, ist auf die von ihnen verursachten Schallemissionen zu achten. (139)

2.8.5 Heizkörper

Neben dem Heizen von Innenräumen können Heizkörper als Wärmeübertragerflächen im Zuge der immer weiter fortschreitenden Entwicklung hin zu effizienteren Niedertemperaturheiz- und Hochtemperaturkühlsystemen auch zum Kühlen herangezogen werden. Unterschiedliche Heizkörperbauformen sind unterschiedlich für die Kühlung von Innenräumen geeignet.

2.8.5.1 Gebläseunterstützte Niedertemperaturheizkörper (Wärmepumpenheizkörper)

Gebläseunterstützte Niedertemperaturheizkörper (oder auch „Wärmepumpenheizkörper“) sind auf das niedrige Vorlauftemperaturniveau aus der Wärmebereitung mittels Wärmepumpen ausgelegt. Die Wärmeabgabeleistung wird durch den Einsatz eines Gebläses zur Steigerung der konvektiven Wärmeabgabe erhöht. Ein Beispiel für einen gebläseunterstützten Niedertemperaturheizkörper ist in Abb. 22 abgebildet. Immer mehr Hersteller bieten nun auch Modelle an, mit denen im Sommer mit relativ hohen Vorlauftemperaturen über dem Taupunkt zur Kondensatvermeidung gekühlt werden kann. Im Kühlfall bewirkt das Gebläse eine optimale Durchströmung des Heizkörpers mit Raumluft und steigert so die Wärmeaufnahme. Es wird hier also auch ein Stromanschluss für den Betrieb des Gebläses benötigt. Wird der Niedertemperaturheizkörper nicht an den Strom angeschlossen, verhält er sich wie ein herkömmlicher Heizkörper.

Üblicherweise liegt die Vorlauftemperatur auch hier zwischen 16 und 20 °C, um Kondensation am Heizkörper zu vermeiden. Bei Leistungsangaben von Heizkörpern, deren Durchströmungsrichtung nicht umgeschaltet werden kann, ist die Anschlussart zu beachten, da je nachdem, ob der Heizkörper im Heiz- oder Kühlbetrieb ist, die abdeckbare Heiz- bzw. Kühllast entsprechend geringer ausfällt, als im Datenblatt angegeben. Es gibt auch Modelle, die den Anschluss zwischen Heiz- und Kühlbetrieb umschalten können. Beispielsweise erreichen Modelle mit 600 x 1000 mm bei 17 °C Vorlauftemperatur und 19 °C Rücklauftemperatur etwa 200 – 250 W Kühlleistung bei einer Raumtemperatur von 28 °C (140) (141). Dies sind Werte für Heizkörper, die einen für die Kühlung optimierten Anschluss haben (also umgekehrt angeströmt werden als im Heizfall), oder deren Platten seriell anstatt parallel durchströmt werden, was ebenfalls vorteilhaft für den Kühlbetrieb ist (s. dazu auch den folgenden Abschnitt über Bestandsheizkörper). Wärmepumpenheizkörper können im Zuge einer Sanierung anstelle der vorhandenen Radiatoren installiert werden. Der benötigte Stromanschluss, um die angegebenen Kühlleistungen erreichen zu können, muss dabei mitbedacht werden.

Abb. 22: Beispiel für einen gebläseunterstützten Niedertemperaturheizkörper (142). Auf mittlerer Höhe sind unterhalb der freigelegten Konvektorbleche die integrierten Lüfter zu erkennen.



2.8.5.2 Bestandsheizkörper

Die Nutzung von Bestandsheizkörpern zur Raumkühlung ist ein relativ neuer Ansatz, dessen Eignung zur Raumkühlung in den letzten Jahrzehnten immer wieder erforscht wurde. Die größten Herausforderungen in der Anwendbarkeit bestehen in der Kondensatvermeidung bei ausreichender Kühlleistung sowie der für einen effektiven Betrieb notwendigen Umkehr der Strömungsrichtung des Kühlwassers.

Beispielsweise zeigte Hirayama (143) 1998, dass ein stählerner Säulenradiator mit Außendimensionen von 1 x 1 m bei einer Raumtemperatur von 25 °C und einer Vorlauftemperatur von etwa 18 °C eine sensible Kühlleistung von 140 W erreicht. Hierbei tritt kein Kondensat auf, wenn die relative Luftfeuchte 50 % beträgt. Bei einer relativen Luftfeuchte von 70 % würde bei diesen Bedingungen bereits der Taupunkt erreicht und daher beginnen, Kondensat anzufallen. Hirayama führte seine Untersuchungen mit optimierter Strömungsrichtung des Radiators durch, d. h., die für den Heizfall eingesetzte Strömungsrichtung (von oben nach unten im Radiator) wurde für den Kühlfall umgekehrt (von unten nach oben).

Das Umkehren der Strömungsrichtung in Bestandsradiatoren könnte allerdings zum Ablösen von Metalloxidablagerungen führen, die eventuell sensiblere Anlagenteile in der Hydraulik verlegen könnten. Um Schäden zu vermeiden, kann von einer Umkehr der Strömungsrichtung abgesehen werden.

Arendt et al. (144) zeigen 2021 in ihren Untersuchungen, wie sich eine Beibehaltung der normalerweise im Heizfall eingesetzten Strömungsrichtung auf die Radiatordurchströmung eines parallel durchströmten Plattenheizkörpers (Typ 22) im Kühlfall auswirkt. Bei einem Kaltwasservolumenstrom von 50 l/h zeigt sich ein sofortiges Absinken des Kaltwassers direkt nach dem Eintritt in den Radiator, dessen Heizflächen kaum durchströmt werden. Eine vollständige Durchströmung wird bei einem Volumenstrom von 150 – 200 l/h erreicht. Bei einer sequentiellen Verschaltung der Heizflächen zeigt sich eine gleichmäßige Durchströmung bereits bei einem Durchfluss von 50 l/h.

Die Kühlleistung von Radiatoren hängt im Einzelfall von verschiedenen Faktoren ab: einerseits von konstruktiven Merkmalen wie Größe und Luftdurchströmung, aber auch von der Position im Raum und den Betriebsbedingungen (Kaltwasservolumenstrom und -temperatur). Theoretisch wäre auch die Abfuhr latenter Wärmelasten möglich (Entfeuchtung), allerdings ist die notwendige Kondensatsammlung und -abfuhr zu gewährleisten. Hierfür werden zusätzliche technische Maßnahmen erforderlich, die für Systeme im Bestand noch nicht weitgehend erprobt sind.

2.8.5.3 Heizkörper mit nachrüstbaren Ventilatoren

Ähnlich den gebläseunterstützten Niedertemperaturheizkörpern kann ein Gebläse (Heizkörperlüfter oder Heizkörperventilator) auch nachträglich installiert werden, um die Wärmeaufnahme eines Bestandsheizkörpers zu erhöhen. Diese Lösungen sind relativ neu, weshalb die Quantifizierung ihrer Wirkung noch Gegenstand der Forschung ist. Beispielsweise haben Vösa et al. (145) 2022 eine Studie veröffentlicht, in der auch die Kühlleistung von mit Ventilatoren nachgerüsteten modernen Plattenheizkörpern ermittelt wurde (vgl. Abb. 23). Bei einer Vorlauftemperatur von 15 °C, einer Rücklauf-temperatur von 17 – 18 °C und einer Raumtemperatur von 25 °C wird eine Kühlleistung von etwa 220 – 265 W je Heizkörper (Typ 22, 600 x 1200 mm) erreicht. Es ist zu beachten, dass bei Kaltwasservorlauftemperaturen von 15 °C unter normalen Raumluftbedingungen das Risiko von Kondensatbildung besteht. In der eben zitierten Studie wurde bereits entfeuchtete Zuluft in den Testraum geleitet und das Kondensationsrisiko unter normalen Feuchtebedingungen folglich nicht evaluiert.

Abb. 23: Ein mit Heizkörpergebläse nachgerüsteter Plattenheizkörper im Versuchsaufbau von Vösa et al. (145).



In jedem Fall ist das Nachrüsten mit Ventilatoren aufgrund des zusätzlichen Stromverbrauchs eine Maßnahme, die nur bei Mangel an anderen Möglichkeiten zur effizienten Kühlung eingesetzt werden sollte oder wenn der bestehende Radiator bereits ohnehin gute Kühlleistungen erbringt und daher ein Heizkörpertausch nicht notwendig ist.

2.8.6 Passive Nutzung thermischer Masse

Dieses Technologieprofil basiert auf dem einschlägigen Profil 3.2 *Thermal Mass Utilization* des IEA EBC Annex 80 Resilient Cooling Projekts (1).

2.8.6.1 Beschreibung

Materialien mit hoher thermischer Masse, wie z. B. schwere Baumaterialien, werden bei passiven Kühlstrategien häufig verwendet, um tagsüber im Sommer, wenn die Außentemperatur höher ist als die Innentemperatur, Wärme aufzunehmen und zu speichern. Die Wärme, die nachts verloren geht, kann tagsüber gewonnen und in der thermischen Masse gespeichert werden, um so das Gebäude warm zu halten.

Die Energiespeicherung durch thermische Masse bezieht sich auf die Fähigkeit eines Materials, Wärme aufzunehmen, zu speichern und wieder abzugeben, so dass es im Wesentlichen wie ein Wärmespeicher funktioniert. Thermische Energie kann auf unterschiedliche Weise gespeichert werden, z. B. durch eine Veränderung der inneren Energie eines Materials in Form von sensibler Wärme (z. B. durch Nutzung des Erdreichs, von Wassertanks und Aquiferen), latenter Wärme (z. B. durch Phasenwechselmaterialien („Phase Change Material“, PCM) inkl. organischer und anorganischer Stoffe sowie Eisspeicher) oder chemischer Energie (z. B. thermochemische Speicher) (73). Der Einsatz von thermischer Masse in einem Gebäude kann zu einer Verringerung der Heiz-/Kühllastspitzen beitragen und die Schwankungen der Raumlufttemperatur minimieren. Dies ermöglicht eine Verlagerung der Heiz-/Kühllasten auf Stunden mit niedrigem Stromtarif, trägt zu einer geringeren Nachfrage nach Spitzenstrom bei und verbessert den thermischen Komfort und die Resilienz von Gebäuden gegenüber Hitzewellen (11).

Thermische Masse kann in verschiedenen Formen vorliegen, z. B. als Betonplatten, Ziegel, PCM oder Eis. Bei der Verwendung von PCMs wird die latente Wärme des Phasenübergangs genutzt, um eine vergleichsweise beträchtlichere Menge an Wärmeenergie zu absorbieren oder abzugeben. Zusätzlich kann thermische Masse durch die Verwendung von Rohren, die Wasser oder eine Mischung aus Wasser und Zusatzstoffen enthalten, erwärmt oder gekühlt werden, was als Bauteilaktivierung bezeichnet wird – mehr dazu in Kapitel 2.8.7; das vorliegende Kapitel soll lediglich die passive Nutzung thermischer Masse ohne weiterer Hilfssysteme behandeln.

Thermische Masse wird in Bezug auf ihre Speicherfunktion auch als „thermische Energiespeichersysteme“ (TES) bezeichnet. Thermische Energiespeichersysteme können nach der Art der Wärmespeicherung klassifiziert werden, d. h. die Speicherung von sensibler Wärme, latenter Wärme oder eine Kombination aus beidem. Gängige Baumaterialien wie Beton und Gips speichern als einphasige Feststoffe ausschließlich sensible Wärme, während PCMs auch latente Wärme speichern können. Folglich benötigen PCMs im Vergleich zu einphasigen Feststoffen viel weniger Masse, um die gleiche Energiemenge zu speichern. Neben ihrem hohen Wärmespeicherpotential bieten PCMs den weiteren Vorteil, dass sie ihre Temperatur bei Phasenwechsel nahezu konstant halten (11).

2.8.6.2 Technologiespezifische Eigenschaften

Zu den wichtigsten technischen Eigenschaften von thermischer Masse gehören die spezifische Wärmekapazität, die Dichte und die Wärmeleitfähigkeit. Bei PCMs umfassen die technischen Eigenschaften auch den Schmelzpunkt und die Schmelzwärme des PCMs. Einzelheiten zu diesen Eigenschaften sind in den folgenden Punkten erklärt.

- **Spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)].** Die Menge an Wärme, die erforderlich ist, um die Temperatur eines Stoffes um einen bestimmten Betrag pro Masseneinheit zu erhöhen. Materialien mit einer höheren spezifischen Wärmekapazität können mehr Wärmeenergie pro Masseneinheit speichern.
- **Dichte [kg/m³].** Masse pro Volumeneinheit eines Materials. Die Dichte beeinflusst die Menge der Wärmeenergie, die in einem Material gespeichert werden kann.
- **Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)].** Die Fähigkeit des betrachteten Materials, Wärme zu leiten. Im Zusammenhang mit thermischer Masse ist eine geringere Wärmeleitfähigkeit oft wünschenswert, da sie dazu beiträgt, die gespeicherte Wärme länger zu halten.

Zusätzliche technische Eigenschaften für PCMs

- **PCM-Schmelzpunkt [°C].** Die Temperatur, bei der das PCM seinen Zustand von fest zu flüssig ändert. Jedes PCM hat einen spezifischen Schmelzpunkt, der von seiner chemischen Zusammensetzung abhängt. Der Schmelzpunkt verschiedener PCMs kann stark variieren und reicht von Temperaturen unter dem Gefrierpunkt von Wasser bis weit über Raumtemperatur.
- **Schmelzwärme von PCM [J/g].** Die Änderung der Enthalpie eines PCM, die sich ergibt, wenn einer bestimmten Menge des Stoffes Energie, gewöhnlich in Form von Wärme, zugeführt wird, um seinen Zustand bei konstantem Druck von einem festen in einen flüssigen Zustand zu ändern.

2.8.6.3 Anwendung

Wirkung im Gebäude

Die thermischen Eigenschaften der thermischen Masse haben einen erheblichen Einfluss auf die komfort- und energiebezogene Leistung von Gebäuden, die sich in Energiebedarf, Emissionen und thermischer Leistung ausdrückt. Der Energiebedarf kann anhand des jährlichen Kältebedarfs, des jährlichen Energiebedarfs für Kühlung sowie der Spitzenheiz- und Kühllasten bewertet werden. Die Klimawirkung kann über die jährlichen Kohlenstoffemissionen und die thermische Leistung beispielsweise über die Hours of Exceedance (HE) oder der Standard-Effektivtemperatur (SET) bestimmt werden (detaillierte Definitionen der hier angegebenen Kennzahlen sind in (146) zu finden).

Thermische Masse bewirkt vor allem eine Verzögerung der Erwärmung der Innenoberflächen eines Gebäudes während der warmen Jahreszeit. Oft wird die Nutzung von thermischer Masse mit anderen Kühltechnologien kombiniert, wie z. B. Lüftungskühlung und Sonnenschutz. Besonders wirksam ist die Kombination mit Nachtlüftung, um die tagsüber eingespeicherte Wärme wieder über die Luft nach außen abzugeben und so die Pufferwirkung der massiven Gebäudeteile zu erhalten.

Anwendung und klimatische Bedingungen

In Regionen mit gemischtem Klima, in denen sowohl heiße Sommer als auch kalte Winter herrschen, kann eine Kombination mehrerer Strategien zur Nutzung thermischer Masse eingesetzt werden. Die Gestaltung der Gebäudehülle zur Optimierung der Isolierung, der Sonneneinstrahlung und der Wärmespeicherkapazität ist entscheidend. Dies kann die Verwendung verschiedener Materialien und Aufbauten auf Grundlage der spezifischen Anforderungen für jede jahresspezifische Gegebenheit beinhalten.

Es ist wichtig zu beachten, dass die erfolgreiche Nutzung von thermischer Masse auch von Faktoren wie dem Gebäudedesign, der Ausrichtung und den Nutzungsmustern abhängt. Bei der Umsetzung von Strategien zur Nutzung der thermischen Masse sollten die Ziele der Energieeffizienz sowie die verfügbaren Baumaterialien berücksichtigt werden. Wie bereits angedeutet, wird die Nutzung der thermischen Masse häufig mit anderen Kühltechnologien kombiniert, wie z. B. Sonnenschutz, Lüftungskühlung oder mechanischen Kühlsystemen.

Die Nutzung thermischer Masse kann sowohl bei Neubauten als auch bei der Nachrüstung bestehender Gebäude eingesetzt werden. Bei der Nachrüstung bestehender Gebäude, insbesondere solcher mit geringer thermischer Masse, wie z. B. leichte Holz- oder Stahlrahmenkonstruktionen, kann sich der Einbau von Materialien mit thermischer Masse als wirksam erweisen. In solchen Fällen ist eine gründliche Bewertung der Gebäudestruktur und Geometrie von entscheidender Bedeutung, um die optimalsten Stellen für den Einbau von zusätzlicher thermischer Masse zu ermitteln.

Vor- und Nachteile

- + dient als kurzzeitiger Wärmespeicher
- + mehrere unterschiedliche Systeme am Markt
- + im Massivbau automatisch vorhanden
- + kein Zugluftrisiko
- + keine Lärmemissionen im Innenraum
- + keine Verwendung ökologisch bedenklicher Substanzen oder Materialien am Einsatzort
- muss im Gebäudedesign mitberücksichtigt werden
- Nachrüstung nur bedingt möglich

2.8.6.4 Literaturhinweise

- Chapter 5-5, Heat storage and release, International Energy Agency, Resilient Cooling of Buildings State of the Art Review (EBC Annex 80)
- Zhang C. et al., (2021) Resilient cooling strategies—A critical review and qualitative assessment, Energy and Buildings 251, 111312, doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.
- D. Qi, G. Hofer, S. Schoisengeier, X. Zhang, et al. IEA-EBC Annex 80 - D3 Resilient Cooling case studies. 2023.
- Sengupta, A., Steeman, M., & Breesch, H, (2020) Analysis of Resilience of Ventilative Cooling Technologies in a Case Study Building, iCRBE Procedia. 1-10, 10.32438/iCRBE.202041.
- EBC Annex 62 Ventilative Cooling, Project Summary Report, https://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_SR_Annex62.pdf
- Section 4. Task 58/Annex 33 Subtask 2P Summary of Work. Subtask 2 PCM: On development and characterization of improved Materials. <https://task58.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/D2P-T58A33-Subtask-2P-Summary-of-work.pdf>
- IEA EBC Annex 67 Summary report - Energy in Buildings and Communities Programme Annex 67 Energy Flexible Buildings. <http://www.annex67.org/media/1920/summary-report-annex-67.pdf>

2.8.7 Strahlungskühlung und Bauteilaktivierung

Dieses Technologieprofil basiert auf dem einschlägigen Profil 3.8 *Radiant Cooling* des IEA EBC Annex 80 Resilient Cooling Projekts (1).

2.8.7.1 Beschreibung

Ein hydraulisches Strahlungskühlsystem ist ein System, in dem Wasser der Wärmeträger ist und mindestens die Hälfte des Wärmeaustauschs mit dem zu kühlenden Raum durch Strahlung erfolgt (147) (148). Die Wärmeübertragung aus Innenräumen erfolgt über gekühlte Oberflächen durch eine Kombination aus Strahlung und Konvektion. Diese Systeme arbeiten nach dem Prinzip der Hochtemperaturkühlung, bei der die Temperatur des Wärmeträgermediums nahe der Raumtemperatur liegt. Das System ist in großen Innenraumflächen – in der Regel Böden, Decken und Wänden – installiert. Diese großen konditionierten Bauteile ermöglichen es, Innenräume mit einem geringen Temperaturunterschied zwischen den konditionierten Oberflächen und dem Raum zu heizen oder zu kühlen.

Strahlungskühlsysteme können in modulare Strahlungskühlpaneele, Strahlungsflächensysteme und Bauteilaktivierungen (BTA, auch Betonkernaktivierung (BKA) oder thermally active building systems (TABS)) unterteilt werden (147). Strahlungskühlpaneele und Strahlungsflächensysteme beziehen sich (mit Ausnahme der BTA) üblicherweise eher auf oberflächennahe Kühlregister, die im ersten Fall in vorgefertigten Rahmen (modular) oder in zweiterem Fall maßgeschneidert flächig am entsprechenden Bauteil installiert werden. Bauteilaktivierungen bezeichnen hierbei Strahlungsflächensysteme mit tiefer liegenden Rohrregistern, die maximalen Anschluss an die thermische Masse des Bauteils haben. Ein klassisches Beispiel für ein gängiges Strahlungsflächensystem ist etwa die Fußbodenheizung, die theoretisch auch zur Kühlung verwendet werden kann. Abb. 24 und Abb. 25 zeigen die verschiedenen Arten von Strahlungsheiz- und -kühlsystemen.

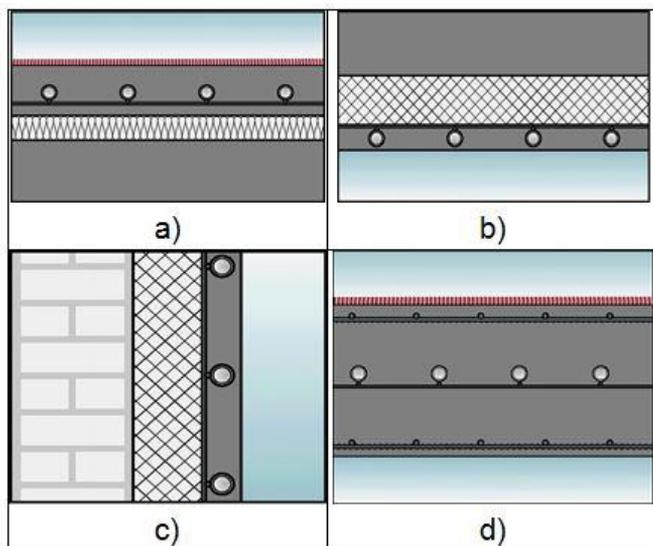
Unter den thermisch aktiven Räumflächen haben sich insbesondere Kühldecken durchgesetzt. Sie können direkt an der Decke angeputzt oder als abgehängte Decke ausgeführt sein und bestehen aus wasserdurchströmten Rohrregistern oder Kapillarrohmatten, die entweder eingeputzt oder an Trägerblechen/-profilen montiert sind. Je nachdem, ob eine Hinterlüftung der Kühldecke möglich ist, wird von geschlossenen Kühldecken und offenen Kühldecken gesprochen. Abgehängte Kühldecken nutzen aufgrund des fehlenden Kontakts mit der Geschoßdecke nicht deren thermische Speicherfähigkeit, sind dafür schneller regelbar und erlauben die Integration von Lüftungs- und Beleuchtungssystemen. Kleinere abgehängte Elemente bezeichnet man als Kühlsegel. (72)

Kühldecken eignen sich auch für Sanierungsprojekte und in Leichtbaugebäuden. In der Forschung werden vermehrt auch Phasenwechselmaterialien („Phase Change Materials“, PCM) in Deckenstrahlplatten erprobt (149) (150) (151) (152) (153).

Abb. 24: Beispiel für ein Kühlpaneel (147).



Abb. 25: Querschnitte durch Strahlungsflächensysteme: (a) Boden, (b) Decke, (c) Wand und (d) BTA (148) (154).



2.8.7.2 Technologiespezifische Eigenschaften

Die folgenden Indikatoren können zur Bewertung der Leistung von Strahlungskühlsystemen verwendet werden (155):

- **Wärmeübergangskoeffizient $[W/(m^2 \cdot K)]$.** Kombiniertes konvektives und Strahlungs-Wärmeübergangskoeffizient zwischen der beheizten oder gekühlten Oberfläche und dem Raum (operative Temperatur des zu nutzenden Raums).
- **Auslegungsheiz- und -kühlleistung $[W/m^2]$.** Wärmeleistung bei Auslegungsbedingungen.
- **Heiz- und Kühlleistung $[W/m^2]$.** Wärmeaustausch zwischen einem Rohrkreislauf und dem klimatisierten Raum.

- **Heiz-(Kühl-)fläche [m²]**. Ausmaß der Oberfläche (Boden, Wand, Decke), die von dem Flächenheizungssystem bedeckt wird. Sie wird von den Rohren an den äußeren Rändern des Systems eingegrenzt.

Die Vorlauftemperaturen in Strahlungsheizungen betragen in der Regel 16 – 23 °C für die Kühlung. Bei der Verwendung von BTA beträgt der Durchschnitt der Vor- und Rücklauftemperaturen normalerweise 19 – 24 °C zum Heizen und Kühlen, da normalerweise ein sehr enger Temperaturbereich sowohl für Heiz- als auch für Kühlzwecke ausreichend ist. Einige TAB-Systeme arbeiten mit konstanten durchschnittlichen Wassertemperaturen während des ganzen Jahres (156).

In der Regel wird ein Gesamtwärmeübergangskoeffizient verwendet, um die Heiz- und Kühlleistung eines Strahlungssystems in Abhängigkeit von der Betriebsart (Heizen oder Kühlen) und der konditionierten Oberfläche (Boden, Decke oder Wand) schnell zu bestimmen. Die Gesamtwärmeübergangskoeffizienten (kombinierte Konvektion und Strahlung) betragen 11, 8 bzw. 6 W/(m²·K) für Fußboden-, Wand- und Deckenheizung und 7, 8 bzw. 11 W/(m²·K) für Fußboden-, Wand- und Deckenkühlung (147) unter Auslegungsbedingungen, wenn die Temperaturdifferenz zwischen der Strahlungsfläche und der Raumtemperatur maximal ist. Auf der Grundlage der zulässigen Oberflächentemperaturen (die durch die Begrenzung der lokalen thermischen Unbehaglichkeit und die Vermeidung von Kondensation auf den Oberflächen bestimmt werden) und unter der Annahme einer (operativen) Raumtemperatur von 20 °C für die Heizung und 26 °C für die Kühlung unter Auslegungsbedingungen können die maximalen Heiz- und Kühlleistungen geschätzt werden.

Die maximalen Heiz- und Kühlleistungen von Strahlungskühlungen und Bauteilaktivierungen betragen im Allgemeinen 99 W/m² bzw. 42 W/m² am Boden des Aufenthaltsbereichs, 160 W/m² und 72 W/m² an der Wand und 42 W/m² und 99 W/m² an der Decke. Am Boden der Randzonen kann eine maximale Heizleistung von 165 W/m² (147) erreicht werden, und auch die Kühlleistung kann je nach den Randbedingungen, wie z. B. der direkten Sonneneinstrahlung auf den Boden, deutlich ansteigen. Geschlossene Kühldecken im Speziellen erreichen Kühlleistungen von bis zu 95 W/m² und offene Kühldecken und Kühlsegel bis zu 120 W/m², was schon der Behaglichkeitsgrenze entspricht (72).

2.8.7.3 Anwendung

Wirkung im Gebäude

Strahlungspaneelsysteme und Strahlungsflächensysteme können sowohl in neuen als auch in zu renovierenden Gebäuden eingesetzt werden. Bauteilaktivierungen, deren Rohrregister tiefer im Bauteil liegen, können nur im Neubau realisiert werden. Eines der Hauptmerkmale von Strahlungskühlssystemen und Bauteilaktivierungen ist, dass sie nur sensible Lasten (Temperatur) abdecken und nicht zur Entfeuchtung geeignet sind. Bei Entfeuchtungsbedarf sind sie daher mit einer Lüftungsanlage zu koppeln. Die Hauptfunktion von Lüftungsanlagen ist die Feuchteregulierung (d. h. Luftentfeuchtung) und Frischluftzufuhr. Im Vergleich zu konventionellen (z. B. reinen Luftheizungs- und -kühlungssystemen) haben Strahlungssysteme mehrere Vorteile (vgl. z. B. (148), siehe unten).

Grenzen

Beim Einsatz von Strahlungskühlssystemen sollte Kondensation vermieden werden. Zu diesem Zweck sollte die Vorlauftemperatur höher als die Taupunkttemperatur gehalten werden oder es sollten Entfeuchtungsstrategien angewendet werden (157). Daher erfordern Strahlungskühlungsanwendungen bei hoher Luftfeuchtigkeit sorgfältige Überlegungen zu Auslegung und Betrieb. Studien haben

gezeigt, dass Strahlungskühlsysteme bei feucht-heißem Klima problemlos eingesetzt werden können, wenn sie richtig ausgelegt und gesteuert werden und mit einem geeigneten Lüftungssystem gekoppelt sind (158) (159) (160) (161).

BTA können nur während der Bauphase eines Gebäudes installiert werden. Dies schränkt den Einsatz von BTA bei Sanierungsprojekten ein, jedoch hat sich gezeigt, dass Strahlungsdecken ähnliche Vorteile wie BTA bieten (149) (150) (151) (152) (153).

Anwendung und klimatische Bedingungen

Strahlungskühlsysteme können in Strahlungskühlpaneele, Strahlungsflächensysteme und Bauteilaktivierungen (BTA) unterteilt werden. Strahlungsheiz- und -kühlsysteme können in fast allen Klimazonen und Gebäudetypen eingesetzt werden (Büros, Wohngebäude, Werkstätten, Labors, Lebensmittelkeller, Konferenzräume, Schulen, Museen, Flughäfen, Sporthallen und Hangars).

Verfügbarkeit

Strahlungskühlpaneele, Strahlungsflächensysteme und Bauteilaktivierungen (BTA) sind auf dem Markt erhältlich, während sich PCM-Deckenstrahlplatten noch in der Entwicklung befinden.

Vor- und Nachteile

- + Ermöglichung von Niedertemperaturheizung und Hochtemperaturkühlung (148)
- + Fähigkeit zur Kopplung an natürliche Wärmequellen und -senken, wie z. B. den Boden, das Grund- oder Seewasser (148)
- + günstige Betriebsbedingungen für Heiz- und Kühlanlagen (vor allem aufgrund der Betriebstemperaturbereiche und Rücklauftemperaturen), wodurch sich die Wirkungsgrade von Wärmepumpen, Kältemaschinen und Heizkesseln erhöhen (148)
- + Möglichkeit der Verlagerung von Heiz- und Kühllastspitzen in die Schwachlastzeiten, wodurch der Spitzenstrombedarf reduziert wird (148)
- + kleinere Heiz- und Kühlanlagen und kleinere Lüftungsanlagen (d.h. Leistung der Lüftungsgeräte, Größe der Kanäle) (148)
- + Verringerung des jährlichen Energieverbrauchs von Heiz- und Kühlsystemen, einschließlich Hilfskomponenten wie Pumpen und Ventilatoren (148)
- + geringere Wärmeverluste und -gewinne bei der Verteilung von der Heiz- oder Kühlanlage zu den Innenräumen (148)
- + Flexibilität bei der Nutzung und Gestaltung von Innenräumen durch das Fehlen von Innenraumgeräten in Aufenthaltsbereichen und das Entfallen vom Reinigungsbedarf (148)
- + gleichmäßige Temperaturverteilung in Innenräumen, geringere Gefahr von Zugluft und geringere vertikale Lufttemperaturunterschiede (148)
- + geringere Baukosten durch (a) geringeren Platzbedarf (z. B. kleinere Schächte, kleinere Geräteräume), (b) geringere Bauhöhen für jedes Stockwerk aufgrund geringerer Plenumshöhen (hauptsächlich aufgrund geringerer Kanalgrößen) und (c) eingesparte Baumaterialien (148)
- + mögliche Einsparungen bei den Anschaffungs- und Betriebskosten (z. B. für Wartung und Energie) (148)
- + Widerstandsfähigkeit gegenüber Hitzewellen und Stromausfällen (148)
- + keine Lärmemissionen im Innenraum
- + keine Verwendung ökologisch bedenklicher Substanzen oder Materialien am Einsatzort
- thermische Trägheit insbesondere von Bauteilaktivierungen

- Bauteilaktivierung nur bei Neubauten umsetzbar
- gute Planung notwendig
- im Kühlbetrieb ist die Kondensationsproblematik zu beachten, weshalb minimale Vorlauf-temperaturen von etwa 18 °C einzuhalten sind

2.8.7.4 Literaturhinweise

- Demnächst veröffentlichter Ratgeber des BMK zu Kühlmaßnahmen mit Hinweisen zu Bauteilkühlungen (Bauteilaktivierung): Holzer, P.; Wimmer, F.; Hackl, L. M.; Peer, T. und Czarnecki, P., [unveröffentlicht]. Ratgeber klimaaktiv Kühlen. Empfehlungen für Wohnungen und Immobilien aller Art. Wien: BMK.
- J. Babiak, B. W. Olesen, D. Petras, (2009) Low temperature heating and high temperature cooling, Brussels: REHVA - Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations, [Online] Available: <https://www.rehva.eu/eshop/detail/no07-low-temperature-heating-and-high-temperature-cooling>
- Section 3.8, International Energy Agency, Resilient Cooling of Buildings State of the Art Review (EBC Annex 80)
- Section 4.2.7 in Zhang C. et al., (2021) Resilient cooling strategies–A critical review and qualitative assessment, Energy and Buildings 251, 111312, doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.
- K. Rhee, B. W. Olesen, K. Kwang Woo, (2017) Ten questions about radiant heating and cooling systems, Building and Environment, 112, pp. 367-381, doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.030.
- H. E. Feustel, C. Stetiu, (1995) Hydronic radiant cooling - preliminary assessment, Energy and Buildings, pp. 13, 10.1016/0378-7788(95)00922-K.
- B. Lehmann, V. Dorer, M. Koschencz, (2007) Application range of thermally activated building systems tabs, Energy and Buildings, vol. 39, no. 5, pp. 593–598, 10.1016/j.enbuild.2006.09.009.
- Olesen, B. W., (2000) Cooling and heating of buildings by activating the thermal mass with embedded hydronic pipe systems. Proceedings of CIBSE/ASHRAE Joint Conference.

2.9 Fernkälte

Fernkältenetze dienen zur zentralen Versorgung mehrerer räumlich nahe beieinanderliegender Verbraucher:innen mit Kälte. Mittlerweile gibt es in Österreich in mehreren Landeshauptstädten Fernkältenetze (z. B. in Wien, St. Pölten oder Linz). Zurzeit konzentriert sich der Markt auf große Abnehmer:innen mit kontinuierlichem Verbrauch wie Büros, Spitäler und Wirtschaftsgebäude. Die Versorgung einzelner privater Haushalte wird aufgrund der mangelnden technischen und wirtschaftlichen Effizienz nicht praktiziert, wohl aber ist die Versorgung ganzer größerer Wohnbauten möglich, so wie dies beispielsweise seit 2019 bei der Wien Energie möglich ist (162).

Die Kältebereitung für Fernkältenetze erfolgt hauptsächlich über große Absorptions- und Kompressionskältemaschinen, die Kaltwasser mit einer Vorlauftemperatur zwischen 5 und 7 °C erzeugen (78) (163) (164). Der Antrieb dieser Anlagen erfolgt also entweder elektrisch oder thermisch, wobei die thermische Antriebsenergie für Absorptionskälteanlagen aus Kraft-Wärmekopplung von Kraftwerken sowie thermischen Abfallverwertungsanlagen oder aus dem Fernwärmenetz kommen kann (78) (163) (165). Für die Rückkühlung werden beispielweise Kühltürme und Flusswasser eingesetzt (165) (163) (166). Die Rücklauftemperatur aus dem Kältenetz liegt üblicherweise bei 16 °C (164) (163).

Hauptanschlusskriterien für das Fernkältenetz sind üblicherweise die räumliche Nähe zu bestehenden Fernkälteleitungen sowie das ausreichende Vorhandensein von Leitungskapazitäten zur Versorgung eines neuen Objekts (167) (168). Die Kälteabnahmeleistung des/der Verbraucher:in sowie die von dem/der Verbraucher:in einzuhaltende Rücklauftemperatur werden vertraglich festgelegt.

Die Vorteile der Fernkälte bestehen vor allem in der Platzersparnis durch das Wegfallen von Kältebereitungssystemen inklusive deren Rückkühleinrichtungen. Da es vor allem in denkmalgeschützten bzw. in Schutzzonen befindlichen Gebäuden schwieriger ist, einen geeigneten Platz für Rückkühlssysteme zu finden, kann die Fernkälte auch hier eine Lösung sein. Allerdings bewegt sich die Fernkälte pauschal betrachtet auf einem etwas höheren Preisniveau als die Kälteerzeugung in eigenen Anlagen und auch die räumliche Nähe zum bestehenden Fernkältenetz ist nicht überall gegeben.

Der flächendeckende Einsatz von Fernkälte ist aufgrund des unterschiedlichen Kältebedarfs je Gebäude wenig sinnvoll. Anzudenken sind lokale Netze für Verbraucher:innen mit großen Kältelasten. Kleinere Kältelasten sollten immer soweit wie möglich mit passiven Technologien bewältigt werden. Ein weiterer Ansatz kann die Nutzung des Kältenetzes als Sammelschiene für Abwärme aus dezentraler Kältebereitung sein.

Eine andere Möglichkeit zur Wärmeabfuhr auf Siedlungsebene sind Anergienetze oder sogenannte kalte Nahwärmenetze. An diese Netze sind verschiedene Liegenschaften angeschlossen, die das Anergienetz als Wärmequelle oder Wärmesenke nutzen und so Wärme entweder für Warmwasserbereitung, Heizzwecke oder Prozesswärme entziehen sowie Abwärme aus der Raumkühlung oder Prozesswärme an das Netz abgeben. Zusätzlich werden Wärmespeicher (häufig Geothermie) als Puffer eingebunden. Das Temperaturniveau von Anergienetzen liegt üblicherweise zwischen 5 und 20 °C und die darin vorhandene Anergie wird in der Regel mittels Wärmepumpen oder Kältemaschinen nutzbar gemacht. Ist die im Anergienetz vorherrschende Vorlauftemperatur niedrig genug, können Kühlsysteme auch im Freecooling (also ohne Kältemaschine) betrieben werden. (169) (170) (171)

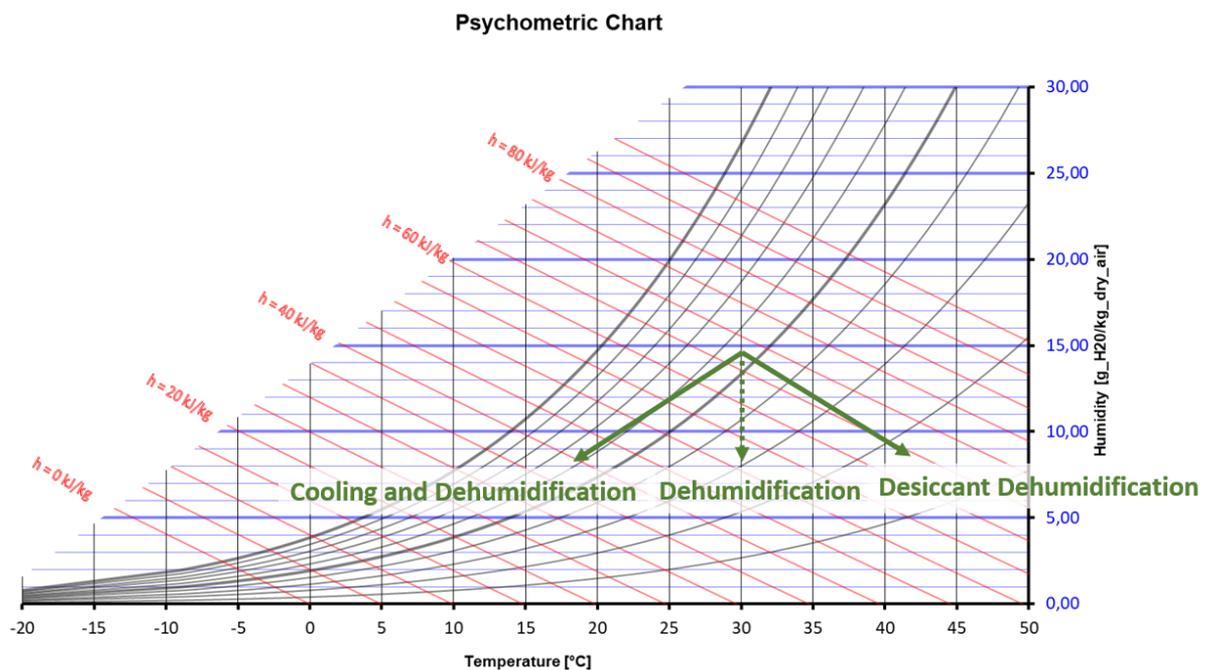
3 Entfeuchtung

Dieses Technologieprofil basiert auf dem einschlägigen Profil 5.1 *Dehumidification* des IEA EBC Annex 80 Resilient Cooling Projekts (1).

3.1.1 Beschreibung

Der Entzug latenter Wärme aus Innenräumen durch Entfeuchtung ist eine wesentliche und wichtige Methode, insbesondere in heißem und feuchtem Klima, um die Kühllast zu verringern und den Komfort zu erhöhen. Der Entfeuchtungsprozess findet statt, wenn der Luft Feuchtigkeit entzogen wird, wobei die Trockenkugeltemperatur konstant gehalten wird. Auf dem psychrometrischen Diagramm (Abb. 26) wird der Entfeuchtungsprozess durch eine gerade vertikale Linie dargestellt, die beim Anfangswert der relativen Luftfeuchtigkeit beginnt, sich nach unten erstreckt und beim Endwert der relativen Luftfeuchtigkeit endet.

Abb. 26: Psychrometrisches Diagramm der Entfeuchtungsprozesse (1).



Je nach Entfeuchtungsmethode gibt es mehrere wichtige physikalische Prinzipien für den Entzug latenter Wärme aus Innenräumen:

- Kondensationsentfeuchtung
- Adsorptive / absorptive Entfeuchtung
- Lüftungsentfeuchtung
- Thermoelektrische Entfeuchtung

Bei der **Kondensationsentfeuchtung** werden Kältemaschinen (meist Kompressionskältemaschinen) eingesetzt, um die Raumluft bis unterhalb der Taupunkttemperatur der feuchten Luft abzukühlen. Dadurch wird der in der Luft vorhandene Wasserdampf kondensiert und aus der Luft abgeschieden. Das kondensierte Wasser wird aufgefangen und die trockene Luft wird im Verflüssiger der Kältemaschine wieder erwärmt. Anschließend wird die temperierte Luft dem Raum zugeführt.

Bei der **adsorptiven bzw. absorptiven Entfeuchtung** wird die Luft entfeuchtet, indem die Wassermoleküle der zu trocknenden Luft an einem grenzflächenaktiven Trocknungsmittel adsorbiert bzw. absorbiert werden. Das Trocknungsmittel nimmt solange Feuchtigkeit auf, bis es gesättigt ist. Es gibt zwei Arten von Trockenmitteln: Feste Trockenmittel nutzen Adsorptionsprozesse, flüssige Trockenmittel chemische-physikalische Prozesse zur Absorption von Feuchtigkeit. Im Vergleich zu Systemen mit festen Trockenmitteln bieten flüssige Systeme eine größere Flexibilität und Kontrolle der Feuchtigkeitsabscheidung sowie einen geringeren Heiz- und Kühlbedarf für die Regeneration. Sowohl Adsorption als auch Absorption sind exotherme Prozesse, bei denen Wärme frei wird. Das Trockenmittel kann durch Zufuhr von Wärme regeneriert werden. So kann die ursprüngliche Aufnahmefähigkeit des Trockenmittels wieder hergestellt und eine kontinuierliche Luftentfeuchtung sichergestellt werden.

Sorptionsgestützte Klimatisierung bzw. DEC-Anlagen (Desiccant and Evaporative Cooling) sind offene Adsorptionsprozesse, die zur adsorptiven Entfeuchtung und adiabaten Befeuchtung (Kühlung durch Verdunstung) von Luft eingesetzt werden. Abb. 27 zeigt ein vereinfachtes Schema einer DEC-Anlage. Bei DEC-Anlagen wird zwischen Anlagen mit rotierendem Adsorptionsrad und stationärem Adsorptionsspeicher unterschieden. Die einströmende Außenluft wird im Sorptionsregenerator (Sorptionsrotor) adsorptiv / absorptiv entfeuchtet. Die Luft erwärmt sich durch das Freiwerden von Ad- bzw. Absorptionswärme. Die Luft verlässt den Sorptionsregenerator stark erwärmt und mit deutlich geringerer Luftfeuchtigkeit. In der folgenden Wärmerückgewinnung (Rotationswärmeübertrager - primärseitig) wird Wärme an die gegenströmende Abluft übertragen. Im Verdunstungskühler (Luftbefeuchter) wird die Luft durch Verdunstungsbefeuchtung wieder abgekühlt. Die eintretende Zuluft liegt mit ca. 21°C und 60% relativer Luftfeuchte im Komfortbereich. Im Abluftstrom wird die verbrauchte Luft durch einen weiteren Verdunstungskühler geführt und weiter abgekühlt, sodass sie mit Feuchtigkeit gesättigt ist. In der Wärmerückgewinnung (sekundärseitig) wird die Abluft mit der Ad-/Absorptionswärme der entfeuchteten Außenluft erwärmt. Gleichzeitig sinkt die relative Luftfeuchtigkeit deutlich ab. Die Abluft wird nun durch eine externe Wärmequelle im Erhitzer weiter erwärmt. Im Sorptionsregenerator wird durch die zugeführte Wärme das Wasser im Trockenmittel desorbiert, und damit das Trockenmittel regeneriert. Abb. 28 zeigt die Zustandsänderungen einer DEC-Anlage in einem Mollier-h-x-Diagramm.

Abb. 27: Vereinfachte schematische Darstellung einer DEC-Anlage.

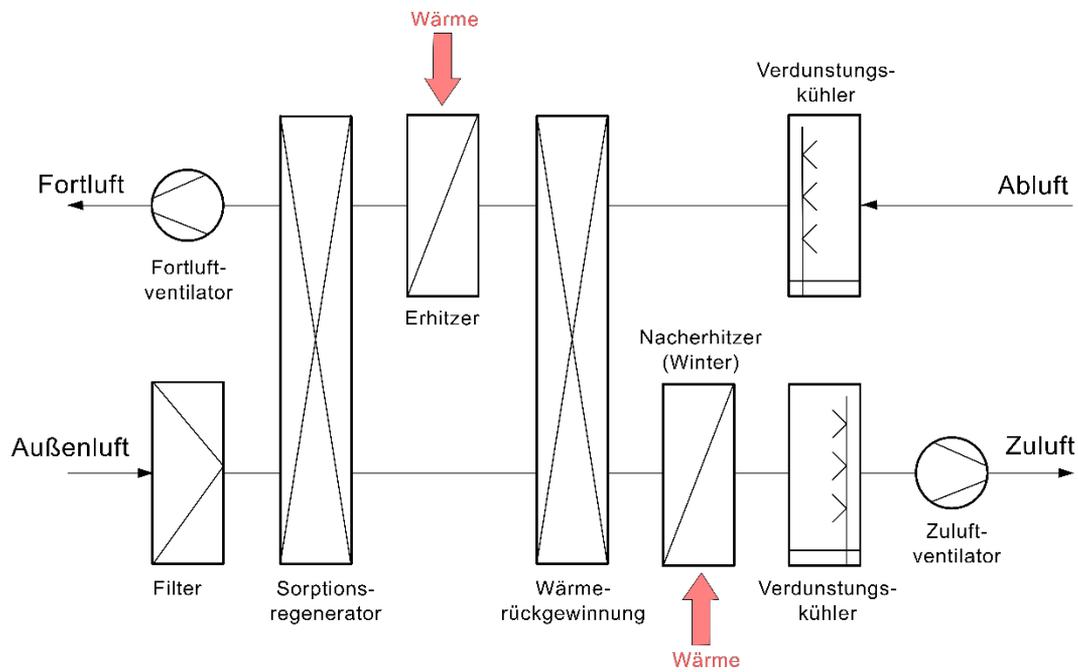
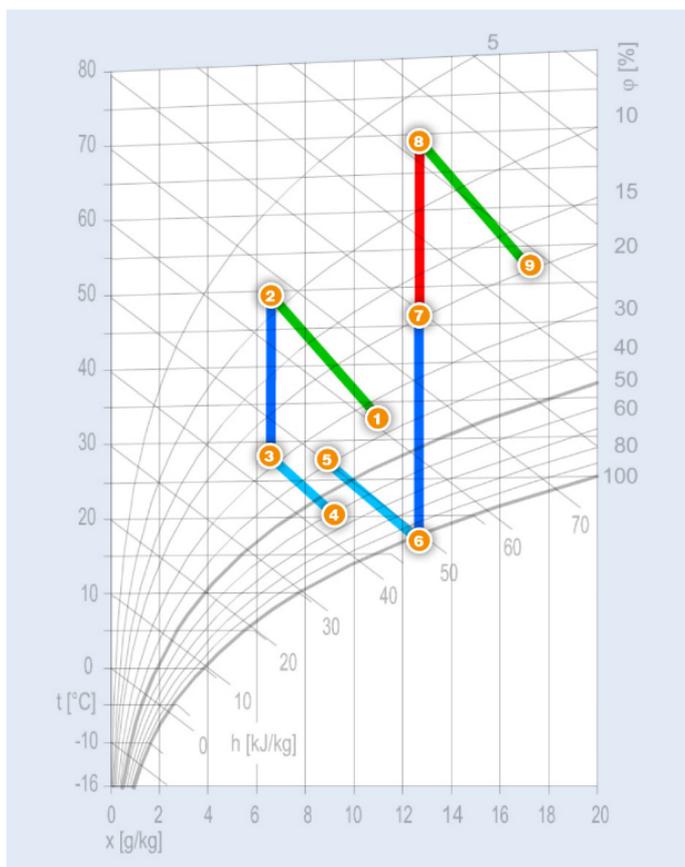


Abb. 28: Prozessschritte in einer DEC-Anlage als Darstellung im Mollier-h-x-Diagramm (172).



Bei der **Lüftungsentfeuchtung** wird trockene Außenluft verwendet, um die feuchte Innenluft zu ersetzen. Allerdings hängen die Entfeuchtungsleistung, die Regelgenauigkeit und die Entfeuchtungseffizienz stark von der relativen Feuchte der Außenluft ab. Diese Methode ist daher nur für Regionen mit relativ trockener Außenluft geeignet.

Die **thermoelektrische Entfeuchtung** nutzt den thermoelektrischen Effekt (Peltier-Effekt), um Strom in eine Temperaturdifferenz über ein Peltier-Modul umzuwandeln. Das Modul enthält zwei Kühlkörper, einen Kühlkörper auf der kalten und einen auf der warmen Seite. Feuchte Luft, die vom Ventilator angetrieben wird, strömt über den Kühlkörper auf der kalten Seite und wird durch Kondensation entfeuchtet. Die entfeuchtete Luft strömt dann durch die Wärmesenke auf der warmen Seite, um wieder erwärmt zu werden, bevor sie an die Innenräume abgegeben wird. Im Vergleich zur Kondensation mit Kältemaschinen wird bei der thermoelektrischen Entfeuchtung kein Kompressor und kein Kältemittel benötigt. Allerdings ist die Entfeuchtungskapazität begrenzt und die Kontrolle der relativen Luftfeuchtigkeit der Raumluft ist nicht so genau wie bei der adsorptiven Entfeuchtung oder der Kondensation mittels Kältemaschinen.

3.1.2 Technologiespezifische Eigenschaften

Für die adsorptive Entfeuchtung sind die Eigenschaften des eingesetzten Trockenmittels eine wichtige technische Eigenschaft. Gute Trockenmittel zeichnen sich durch ein großes Sättigungsabsorptionsvermögen, niedrige Viskosität sowie hohe Wärmeübertragung und Stabilität aus. Sie dürfen außerdem nicht korrosiv sein und müssen geruchlos, ungiftig, nicht brennbar und idealerweise kostengünstig sein.

Die wichtigsten technischen Eigenschaften, die für alle Entfeuchtungsprinzipien wichtig sind, sind:

- **Kälteleistung [W oder kW]**. Der wichtigste Aspekt bei der Auslegung einer Kältemaschine ist die erforderliche Kälteleistung, die von den jeweiligen Umständen und dem zu kühlenden Gebäude abhängt. Sie ist definiert als der gesamte (d. h. sensible und latente) Energieaustausch zwischen dem Luft- und dem Lösungsstrom.
- **Entfeuchtungsrate [$\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{s}$ oder Liter/Tag]**. Sie ist definiert als die Masse an Feuchtigkeit, die pro Zeiteinheit zwischen dem Luft- und dem Lösungsstrom ausgetauscht wird. Die Leistung des Entfeuchters wird auf der Grundlage der Entfeuchtungsrate und der Entfeuchtungseffizienz bewertet.
- **Entfeuchtungseffizienz [-]**. Dies ist das Verhältnis zwischen der tatsächlichen Änderung des Feuchteverhältnisses der Luft durch den Entfeuchter und der maximal möglichen Änderung des Feuchtegehalts der Luft (173).
- **Relative Feuchte [$\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^3_{\text{Luft}}$] der Eingangs- und Ausgangsluft und Temperatur [°C] der Eingangs- und Ausgangsluft**. Aus Gründen der menschlichen Gesundheit müssen Temperatur und Luftfeuchtigkeit jederzeit kontrolliert werden, um das Wachstum von Pilzen und Bakterien zu unterbinden. Die Lufttemperatur kann unter den Sollwert fallen, um die gewünschte Luftfeuchtigkeit zu erreichen, wobei dann ein Nachheizregister erforderlich ist, um die sensible Temperatur der Luft wieder auf den Sollwert zu erhöhen.
- **Sensibles Wärmeverhältnis [-]**. Dieses ist definiert als das Verhältnis zwischen der sensiblen Last und der Gesamtlast (sensible + latente Last). Vor allem in heißen und feuchten Klimazonen kann das ausgelegte sensible Wärmeverhältnis deutlich unter 0,75 liegen. In solchen Fällen können herkömmliche Klimaanlage oder Kondensationsentfeuchter nicht die

gewünschten thermischen Komfortbedingungen bieten. Kondensationsentfeuchter funktionieren besser, wenn das sensible Wärmeverhältnis über 0,75 liegt (174).

- Darüber hinaus gibt es Leistungsindikatoren wie die **Leistungszahl (Energy Efficiency Ratio oder Wärmeverhältnis) [-]** bei Einsatz einer Kältemaschine und die ihr untergeordneten Leistungszahlen der elektrischen (Kompressionskältemaschine) und der thermischen Leistungszahl (Ad- oder Absorptionskältemaschinen). Die Leistungszahl beschreibt das Verhältnis zwischen der Kühlleistung und der verbrauchten Gesamtenergie und kann je nach System auf die verbrauchte elektrische oder thermische Energie bezogen werden.

3.1.3 Anwendung

Kondensationsentfeuchtung, ad- bzw. absorptive Entfeuchtung und DEC-Anlagen sind technisch ausgereift und werden standardmäßig in Lüftungsanlagen integriert. Kommerzielle Produkte sind in Form von großen Entfeuchtungsanlagen oder kleinen Haushaltsentfeuchtern auf dem Markt erhältlich. Entfeuchtungstechnologien können sowohl bei Neubauten als auch bei Nachrüstungen eingesetzt werden. Absorptions- und Adsorptionsentfeuchtungsanlagen kommen häufig in der Baubranche zur Anwendung. Einige der wichtigsten Einsatzgebiete von Entfeuchtungstechnologien sind Wohngebäude, Bürogebäude, Supermärkte, Kinos, Krankenhäuser, Hotels, Schwimmhallen und pharmazeutische Produktionsanlagen (175). Die Kondensationsentfeuchtung ist weit verbreitet, vor allem in Wohngebäuden und kleinen Bürogebäuden. Da Feuchtigkeit sowohl aus Innenräumen, z. B. von Menschen und feuchten Oberflächen, als auch aus dem Freien, z. B. aus der feuchten Außenluft, stammen kann, besteht ein großer Bedarf an Luftentfeuchtung und damit ein hohes Anwendungspotential in Gebäuden mit hohem Feuchtigkeitsanfall und in Klimazonen mit hoher Außenluftfeuchtigkeit. In Österreich spielt Entfeuchtung vor allem in den Sommermonaten eine Rolle. Den Rest des Jahres ist daher der Bedarf an Luftentfeuchtung, abgesehen von industriellen Anwendungen, eher gering.

Grenzen

Die Entfeuchtung mit Trockenmitteln erfordert relativ hohe Regenerationstemperaturen (90 – 260 °C für feste Trockenmittel; 60 – 90 °C für flüssige Trockenmittel). Dies hat zur Folge, dass eine große Menge an Wärmeenergie benötigt wird. Die Bereitstellung der Regenerationswärme auf dem nötigen Temperaturniveau ist bei der Planung und Auslegung dieser Anlagen zu berücksichtigen. Der Betrieb von Entfeuchtungsanlagen verursacht Lärmemissionen. Werden Kältemaschinen eingesetzt, entstehen zudem Wärmeemissionen. Beim Einsatz von Entfeuchtungsanlagen sollte die Einbindung von Wärme aus erneuerbaren Quellen (z.B. Solarenergie) oder Abwärme überlegt werden, um den Einsatz von Primärenergie zu reduzieren (176).

Vor- und Nachteile

- + Erhaltung von Komfortparametern auch bei unkomfortablen Außentemperaturen („Hundstage“)
- erhöhter Energieeinsatz (Wärme, elektrische Energie)
- Lärm- und Wärmeemissionen

3.1.4 Literaturhinweise

- Achenbach K. Entfeuchtung. Planungsleitfaden für TGA und Fachplaner. Garching: Condair; 2016. <https://www.condair.de/m/0/planungskriterien-entfeuchtung-161202-email.pdf>
- Muhajid Rafique M, Gandhidasan P, Rehman S, Al-Hadhrami LM. A review on desiccant based evaporative cooling systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015; 45: 145-159. doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.051
- Camargo JR, Ebinuma CD, Silveira JL. Thermo-economic analysis of an evaporative desiccant air conditioning system. *Applied Thermal Engineering*. 2003; 23 (12): 1537-1549. [doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00105-4](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00105-4)
- Pietruschka D, Eicker U, Huber M, Schumacher J. Experimental performance analysis and modelling of liquid desiccant cooling systems for air conditioning in residential buildings. *International Journal of Refrigeration*. 2006; 29 (1): 110-124. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2005.05.012>

4 Sicherheitsaspekte und Kältemittel

Die Beforschung von Kältemitteln zur Reduktion des Ozonabbaupotentials (ODP = Ozone Depletion Potential), des Treibhausgaspotentials (GWP = Global Warming Potential) sowie der Brennbarkeit und Toxizität ist ein wichtiger Prozess, um die Klimafreundlichkeit und Sicherheit der Kompressionskältetechnik weiter zu steigern. Ein ideales Kältemittel sollte möglichst geringe Auswirkungen auf Umwelt, Klima und Mensch bei möglichst vorteilhaften thermodynamischen Eigenschaften haben.

In Österreich enthält die ÖNORM EN 378 (Kälteanlagen und Wärmepumpen – Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen) Vorgaben hinsichtlich verschiedener Gesichtspunkte, die während der Lebensdauer einer kältetechnischen Anlage relevant werden:

- Teil 1: Grundlegende Anforderungen, Begriffe, Klassifikationen und Auswahlkriterien
- Teil 2: Konstruktion, Herstellung, Prüfung, Kennzeichnung und Dokumentation
- Teil 3: Aufstellungsort und Schutz von Personen
- Teil 4: Betrieb, Instandhaltung und Instandsetzung von Kälteanlagen und Wärmepumpen sowie Rückgewinnung von Kältemitteln aus ausrangierten Anlagen

Die Sicherheitsvorkehrungen für Wärmepumpen und Kältemaschinen sind insbesondere aufgrund der Eigenschaften der verwendeten Kältemittel notwendig. Hier sind insbesondere folgende Gesichtspunkte hervorzuheben:

- Sicherheitstechnische Eigenschaften des Kältemittels:
 - Die Toxizität (177) (178) wird in Klassen nach Grenzen für berufsbedingte Exposition eingeteilt, wobei Substanzen mit niedrigerer Toxizität in die Kategorie A eingeteilt werden als jene in Kategorie B.
 - Die Brennbarkeit (177) (178) wird in Klassen nach Grenzen für Flammenausbreitung eingeteilt, wobei Substanzen mit höherem Zahlenwert brennbarer sind als solche mit niedrigerem.
- ökologische Eigenschaften des Kältemittels:
 - Der ODP (Ozone Depletion Potential) [CFC-11-eq.] ist ein Maß für den Ozonabbau bezogen auf das Ausmaß des Ozonabbaus der Substanz Trichlorfluormethan (CFC-11).
 - Der GWP (Global Warming Potential) [CO₂-eq.] gibt Aufschluss über die Menge an durch ein Treibhausgas absorbierte Wärmestrahlung bezogen auf die Strahlungsabsorption von CO₂. Mehrere internationale Abkommen, wie etwa das Montreal-Protokoll, das Kyoto-Protokoll oder die Kigali-Änderung sowie nationale Regelungen begrenzen die Produktion und Nutzung von Substanzen mit hohem ODP und GWP (179). Eine weiterführende Betrachtung ist der Total Equivalent Warming Impact (TEWI), der neben dem direkten durch Kältemittelaustritte verursachten Treibhauseffekt auch jenen durch die für den Betrieb der Anlage nötige Stromerzeugung hervorgerufenen Treibhauseffekt berücksichtigt, s. die wichtigen technischen Kennzahlen in Kapitel 2.4.2.

Die novellierte und im Jänner 2024 beschlossene EU F-Gas-Verordnung (180) sowie das zu erwartende PFAS-Verbot (für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen) (181) wird sehr wahrscheinlich zu einer strengeren Regulierung fluoriertes Kältemittel bis spätestens 2040 in der EU führen; wodurch an erlaubten Kältemitteln die sogenannten natürlichen Kältemittel, wie etwa Kohlenwasserstoffverbindungen (Propan, Butan, Ethan), Ammoniak, CO₂, Luft und Wasser übrigblieben. In der Technologiebewertung wird daher nur auf die Kältemittel Ammoniak (R717), Propan (R290), Isobutan (R600a) und R1234ze(E) eingegangen, wobei hervorgehoben werden muss, dass letzteres aller Voraussicht nach wahrscheinlich dennoch im Zuge der in Verhandlung befindlichen PFAS-Verordnung verboten wird. PFAS bzw. deren Abbauprodukte sind sehr langlebig, reichern sich in der Umwelt an und können von dort nur noch mit großem Aufwand oder gar nicht mehr entfernt werden (182). Die Weiterverwendung von PFAS auf lange Sicht würde also zu immer höheren Konzentrationen dieser Substanzen in Böden, Wasserkörpern, Pflanzen, Tieren und Menschen führen und eine Abwendung jeglicher negativer Wirkungen auf Umwelt und Gesundheit nahezu oder gänzlich unmöglich machen (182). Die Miteinbeziehung von R1234ze(E) in diesen Bericht ist der Tatsache geschuldet, dass dieses Kältemittel momentan noch in der Anwendung weit verbreitet ist.

Das Kältemittel Ammoniak fällt in die Sicherheitsklasse B2L, Propan und Isobutan in die Klasse A3 und R1234ze(E) in die Klasse A2L (183). Der GWP von Ammoniak liegt bei 0 (184), jener von Propan bei 0,02 (185), der von Isobutan wird auf << 1 geschätzt (183) und jener von R1234ze(e) liegt bei 1,37 (185). Alle vier betrachteten Kältemittel haben einen ODP von 0 (183). Man sieht also, dass Ammoniak zwar weder brennbar ist, noch zum Treibhauseffekt beiträgt, aber dafür toxisch ist. Propan und Isobutan sind zwar nicht toxisch und haben kaum einen Treibhauseffekt, sind aber dafür brennbar. R1234ze(E) ist zwar weder toxisch, noch brennbar und hat einen geringen Treibhauseffekt, zählt aber als HFO (Hydrofluorolefin) zu den umwelt- und gesundheitsbedenklichen PFAS.

5 Übersichtstabellen zu den Kühltechnologien

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Eigenschaften der verschiedenen Kühltechnologien zusammengefasst dargestellt. Genauere und differenzierte Angaben sowie ggf. Literaturverweise zu den angegebenen Werten finden sich in den jeweiligen Technologieprofilen. Ergebnisse aus eigenen Berechnungen des Projektteams zur Veranschaulichung insbesondere verschiedener passiver Kühltechnologien sind per Fußnote gekennzeichnet.

Tab. 4: Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften von Technologien zur Verminderung von Wärmeeinträgen in den Innenraum.

Technologie	Verschattung	Kühle Hüllmaterialien	Sonnenschutzverglasung	Hinterlüftete Fassaden	Gebäudebegrünung
Kapitel	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
Relevanz in Österreich	hoch	niedrig	mittel	niedrig bis mittel	niedrig für Gebäudekühlung, hoch für Mikroklima
vermiedener spezifischer Wärmeeintrag [kWh/(m²·a)]	Rollläden mit F _C -Wert 0,26: 4,6 kWh/(m ² _{WNF} ·a) ^a	kühle Wand mit Albedo 0,6: 1,5 kWh/(m ² _{WNF} ·a) ^{a,b} kühle Wand mit Albedo 0,7: 3,0 kWh/(m ² _{WNF} ·a) ^{a,b}	Sonnenschutzglas mit g-Wert 0,42: 2,7 kWh/(m ² _{WNF} ·a) Sonnenschutzglas mit g-Wert 0,33: 3,8 kWh/(m ² _{WNF} ·a) ^a	-	-
Platzbedarf	gering	nein	nein	dickere Außenwandstärken	meist hoher Flächenbedarf für Gründächer, Fassadenbegrünung ragt in den Straßenraum hinein

Technologie	Verschattung	Kühle Hüllmaterialien	Sonnenschutzverglasung	Hinterlüftete Fassaden	Gebäudebegrünung
Feuchterisiko	nein	nein	nein	senkt das Feuchterisiko sogar	Bewässerung und Pflanzen-substrat stellt potentielle Feuchtequelle dar, gute Planung und Ausführung notwendig
Investitionskosten netto [€/Bezugsgröße]	Außenliegend: 660 €/m ² Innenliegend: 250 €/m ²	Fassadenanstrich neu inkl. Gerüst: 35-50 €/m ²	750 €/m ² inkl. Demontage und Montage	300-400 €/m ²	Dachbegrünung: 30-50 €/m ² (extensiv), 150-200 €/m ² (intensiv), bodengebundene Fassadenbegrünung: 15-35 €/m ² (Selbstkletterer), 80-250 €/m ² (Systeme mit Gerüstkletternpflanzen), wandgebundene Fassadenbegrünung: 300-2000 €/m ²
Wartung/ Betriebskosten netto [€/Bezugsgröße]	-	-	-	-	Pflege Fassadenbegrünung 10-40 €/m ² ·a)
Energiekosten [€/kWh Kälte]	keine bis sehr gering	nein	keine bis sehr gering	nein	gering

^a Ergebnis aus IDA ICE-Simulationen des Projektteams für eine beispielhafte Wohnung mit 140 m² Wohnnutzfläche (WNF) im Regelgeschoß eines mehrstöckigen Gebäudes unter Einsatz von Nachtlüftung. Die Annahmen hinsichtlich der Eigenschaften des Gebäudes sind dem Methodikteil dieses Berichts (Kapitel 6.1.2) zu entnehmen. Die Ergebnisse besitzen keine Allgemeingültigkeit und dienen allein dem Vergleich verschiedener passiver Kühltechnologien an einem beispielhaften Gebäude.

^b Die Wirksamkeit der kühlen Wand hängt stark vom U-Wert der Bestandwand sowie dem Fensterflächenanteil an der Fassade ab, wie eine Sensitivitätsanalyse für eine kühle Außenwand mit einer Albedo von 0,7 gezeigt hat: so bewirkt diese kühlende Oberfläche der Wand bei einem U-Wert der Außenwand von

0,2 W/(m²·K) anstatt von 1,5 W/(m²·K) lediglich einen vermiedenen spezifischen Wärmeeintrag von 0,5 kWh/(m²_{WNF}·a) bzw. bei einem Fensterflächenanteil von 50 % anstatt von 17 % einen vermiedenen spezifischen Wärmeeintrag von 2,6 kWh/(m²_{WNF}·a). Ein ähnliches Verhalten ist auch für den Fall mit einer Albedo von 0,6 zu erwarten.

Tab. 5: Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften von Technologien zur Komfortverbesserung jenseits des physikalischen Wärmeentzugs.

Technologie	Komfortlüftung und erhöhte Luftbewegung	Mikrokühlung und individuelle Komfortregelung
Kapitel	1.6	1.7
Relevanz in Österreich	mittel	niedrig bis mittel
empfundene Temperaturreduktion [°C]	bei einer Luftgeschwindigkeit von 0,6 m/s: 1,2 °C, bei 0,9 m/s: 1,8 °C, bei 1,2 m/s: 2,2 °C	bis zu 5 °C je nach System
Zugluftrisiko	ja	ja
Lärmbelästigung Innenraum	abhängig vom Ventilator	bei Einsatz von Ventilatoren: abhängig vom Ventilator
Platzbedarf	Komfortlüftungsanlagen: hoch; andere: gering	gering
Feuchterisiko	nein	Kondensationsrisiko bei Flächenkühlungen beachten
Investitionskosten netto [€/kW installierte Leistung]	3000 €/Komfortlüftungsgerät	sehr divers
Energiekosten [€/kWh Kälte]	gering	gering
ökologisch/gesundheitlich bedenkliche Substanzen & Materialien am Einsatzort	nein	bei Verwendung von PCM: PCM (toxisch, brennbar)

Tab. 6: Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften von Technologien zum physikalischen Wärmeentzug aus Innenräumen, Teil 1.

Technologie	Lüftungskühlung	Verdunstungskühlung	Sky Radiative Cooling
Kapitel	2.1	2.2	2.3
Relevanz in Österreich	Nachtlüftung: hoch, Tageslüftung: niedrig	niedrig, indirekte Verdunstungskühlung bei Abluft-Wärmerückgewinnung: mittel	niedrig
spezifischer Wärmeentzug [kWh/(m²·a)]	Nachtlüftung: 8,6 kWh/(m ² _{WNE} ·a) ^c	-	-
spezifische maximale Kühlleistung [kW/Bezugsgröße]	-	-	23-120 W/m ² Kollektorfläche für PV/T und Solarkollektoren mit Wasser als Wärmeträgermedium, 20-30 W/m ² Kollektorfläche für Radiatoren mit Luft als Wärmeträgermedium
Zugluftrisiko	ja	nein	nein
Lärmbelästigung Innenraum	nein	bei direkter Verdunstungskühlung im Raum mittels Ventilatoren oder Düsen möglich	nein
Platzbedarf	Fensterlüftung: keiner, mechanische Lüftung: Platzbedarf für Außenluftaufbereitung und Zuluft- sowie Abluftkanäle	Platzbedarf für direkte, indirekte und zweistufige Verdunstungskühlung mittel, für PDEC-Anlagen eher hoch	Flächenbedarf am Dach, Platz für Kälteverteilnetz und evtl. Pufferspeicher
Lärmbelästigung Außenraum	bei mechanischer Lüftung gering	bei Integration in mechanische Lüftung gering	nein
Hitzeemissionen Außenraum	nein	nein	ja
Feuchterisiko	senkt das Feuchterisiko sogar	Verdunstungswasser stellt Feuchtequelle dar	nein

Technologie	Lüftungskühlung	Verdunstungskühlung	Sky Radiative Cooling
Wartung/Betriebskosten netto [% der Investitionskosten/a]	mechanische Wohnraumlüftung ohne aktive Kühlung oder Befeuchtung: 1,5-2 % der Investitionskosten pro Jahr	-	-
Energiekosten [€/kWh Kälte]	keine bis gering	gering	gering
ökologisch/gesundheitlich bedenkliche Substanzen & Materialien am Einsatzort	nein	Keimbildung im Verdunstungswasser möglich	nein
ökologische Folgen am Einsatzort	nein	Wasserverbrauch	nein

^c Ergebnis aus IDA ICE-Simulationen des Projektteams für eine beispielhafte Wohnung mit 140 m² Wohnnutzfläche (WNF) im Regelgeschoß eines mehrstöckigen Gebäudes. Die Annahmen hinsichtlich der Eigenschaften des Gebäudes sind dem Methodikteil dieses Berichts (Kapitel 6.1.2) zu entnehmen. Die Ergebnisse besitzen keine Allgemeingültigkeit und dienen allein dem Vergleich verschiedener passiver Kühltechnologien an einem beispielhaften Gebäude.

Tab. 7: Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften von Technologien zum physikalischen Wärmeentzug aus Innenräumen, Teil 2.

Technologie	Kompressionskältemaschinen	Adsorptionskältemaschinen	Absorptionskältemaschinen	Natürliche Wärmesenken
Kapitel	2.4	2.5	2.6	2.7
Relevanz in Österreich	hoch	niedrig	Einzelanlagen für Gebäude: niedrig, Fernkälteerzeugung: mittel	(Sole-)Erdwärmeübertrager und Grundwasser: hoch, Oberflächengewässer/Deep Lake Cooling: mittel, Erdreich- Luftregister und Dachteiche: niedrig
spezifischer Wärmeentzug [kWh/m²]	beliebig	beliebig	beliebig	-
spezifische maximale Kühlleistung [kW/Bezugsgröße]	max. 8 MW pro Maschine	max. 350 kW pro Maschine	max. 6 MW pro Maschine	Erdsonden: 22-63 W/m Sondenlänge, horizontale Erdwärmeübertrager: 17-35 W/m Rohrlänge, Erdreich-Luftregister: 45 W/m ² Kollektorfläche
Leistungszahl	EER: 1,7-6,5 SEER: 3-9	Wärmeverhältnis: 0,5-0,9	Wärmeverhältnis: 1,8-2,5	-
Platzbedarf	mittel	mittel	mittel	hoch
Lärmbelästigung Außenraum	bei luftgekühlten Anlagen ja	bei luftgekühlten Anlagen ja	bei luftgekühlten Anlagen ja	nein
Hitzeemissionen Außenraum	bei luftgekühlten Anlagen ja	bei luftgekühlten Anlagen ja	bei luftgekühlten Anlagen ja	nein

Technologie	Kompressionskältemaschinen	Adsorptionskältemaschinen	Absorptionskältemaschinen	Natürliche Wärmesenken
Investitionskosten netto [€/kW installierte Leistung]	800 €/kW	bis 1.750 €/kW	bis 2.250 €/kW	Erdsonden: 75-90 €/lfm inkl. Zusammenführung und Glykolfüllung, Flächenkollektoren: 30-45 €/m ²
Wartung/Betriebskosten netto [€/kW installierte Leistung]	3-5 % der Investitionskosten pro kW Kälteleistung und Jahr für wartungsintensivere Maschinen	1 % der Investitionskosten pro kW Kälteleistung und Jahr	-	-
Energiekosten [€/kWh Kälte]	bei Strompreis 0,20 €/kWh und SEER 4 – 2: 0,05 – 0,10 €/kWh brutto, bei Strompreis 0,40 €/kWh und SEER 4 – 2: 0,10 – 0,20 €/kWh brutto ^d	bei Nutzung von Wärme aus Solarthermie oder Abwärme gering	bei Nutzung von Wärme aus Solarthermie oder Abwärme gering	gering
TEWI	bei einer SEER von 2: 2.284 kg CO ₂ -eq. ^e bei einer SEER von 4: 1.142 kg CO ₂ -eq. ^e	hauptsächlich abhängig von der Wärmequelle für den thermischen Verdichter	hauptsächlich abhängig von der Wärmequelle für den thermischen Verdichter	-
ökologisch/ gesundheitlich bedenkliche Substanzen & Materialien am Einsatzort	Kältemittel, Schmiermittel	nein	Lösungsmittel (Lithiumbromid) oder Kältemittel (Ammoniak)	nein
ökologische Folgen am Einsatzort	Erwärmung der Wärmesenke (Grund-, Oberflächengewässer)	Erwärmung der Wärmesenke (Grund-, Oberflächengewässer)	Erwärmung der Wärmesenke (Grund-, Oberflächengewässer)	Erwärmung der Wärmesenke (Grund-, Oberflächengewässer)

^d s. Kapitel 6.2.3 für die Berechnung der spezifischen Stromkosten (in diesem Fall der sog. Kältegestehungskosten).

^e für eine Kältemaschine mit R717, R290, R600A oder R1234ze(E) als Kältemittel, die den mittels IDA ICE Simulationen berechneten Kältebedarf der beispielhaften Wohnung mit 140 m² Wohnnutzfläche (WNF) im

Regelgeschoß eines mehrstöckigen Gebäudes unter Einsatz von Nachtlüftung deckt. Für eine genaue Beschreibung aller Annahmen in der Berechnung siehe den Methodikteil (Kapitel 6.3.1) des vorliegenden Berichts. Die Ergebnisse besitzen keine Allgemeingültigkeit und dienen allein dem Vergleich von Maschinen mit unterschiedlicher Effizienz und Kältemitteleigenschaften anhand des Kältebedarfs einer beispielhaften Wohnung.

Tab. 8: Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften von Kälteabgabesystemen, Teil 1.

Technologie	Direktverdampfer	Kühlkonvektoren	Gebläsekonvektoren	Heizkörper
Kapitel	2.8.2	2.8.3	2.8.4	2.8.5
spezifische maximale Kühlleistung [kW/Bezugsgröße]	Splitgeräte: 1-5 kW/Inneneinheit, VRF-Systeme: 11-180 kW/Außeneinheit	passiv: 70 W/m ² , aktiv: 200 W/m ²	90 W/m ²	Gebläseunterstützte Niedertemperaturheizkörper: 250 W/Heizkörper
Zugluftrisiko	ja	ja	ja	nein
Lärmbelästigung Innenraum	ja	passiv: nein aktiv: ja	ja	Heizkörper mit Gebläse: ja
Platzbedarf	mittel	mittel	mittel	mittel
Feuchterisiko	je nach Vorlauf-temperatur ist Kondensatbildung möglich; falls Entfeuchtung gewünscht ist, muss eine geeignete Kondensatableitung vorgesehen werden	je nach Vorlauf-temperatur ist Kondensatbildung möglich; falls Entfeuchtung gewünscht ist, muss eine geeignete Kondensatableitung vorgesehen werden	je nach Vorlauf-temperatur ist Kondensatbildung möglich; falls Entfeuchtung gewünscht ist, muss eine geeignete Kondensatableitung vorgesehen werden	je nach Vorlauf-temperatur ist Kondensatbildung möglich; falls Entfeuchtung gewünscht ist, muss eine geeignete Kondensatableitung vorgesehen werden
ökologisch/ gesundheitlich bedenkliche Substanzen & Materialien am Einsatzort	Kältemittel	nein	nein	nein

Tab. 9: Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften von Kälteabgabesystemen, Teil 2.

Technologie	Passive Nutzung thermischer Masse	Strahlungskühlung und Bauteilaktivierung
Kapitel	2.8.6	2.8.7
spezifische maximale Kühlleistung [kW/m²]	-	Boden: 42 W/m ² , Wand: 72 W/m ² , Decke: 99 W/m ²
Platzbedarf	nein	kein zusätzlicher bis gering
Feuchterisiko	Vorlauftemperatur sollte über dem Taupunkt liegen zur Vermeidung von Kondensation	Vorlauftemperatur sollte über dem Taupunkt liegen zur Vermeidung von Kondensation

6 Methoden zur Kennzahlberechnung

In diesem Kapitel werden die für die Kennzahlberechnungen angewendeten Methoden behandelt.

6.1 Technische Bewertung

Für die technische Bewertung werden einerseits vorhandene Angaben aus den IEA EBC Annex 80-Technologieprofilen (1) übernommen und wo nötig, für Österreich anwendbare Werte entweder in der wissenschaftlichen Literatur oder im Internet recherchiert oder mittels Simulationen ermittelt. Für eine differenzierte Beurteilung des Verhaltens von Kompressionskältemaschinen abhängig von den Temperaturniveaus auf der Seite der Wärmequelle (hydraulisches HLK-System oder Innenraumluft) und jener der Wärmesenke (Rückkühlung) wurden Berechnungen in IPSEpro zur Bestimmung der Kältemaschineneffizienz (EER) vorgenommen. Die Wirkung verschiedener passiver Kühltechnologien in einem Beispielgebäude in Österreich wurde mittels IDA ICE- Simulationen bestimmt.

6.1.1 IPSEpro Simulationen

Ziel der Berechnung der Kältemaschineneffizienz in IPSEpro ist die Ermittlung des Gütegrades mehrerer exemplarischer luftgekühlter Kompressionskältemaschinen zur Abschätzung der EER unter höheren Kondensationstemperaturen im Rückkühler. Hierbei war einerseits das Verhalten des Gütegrades der verschiedenen Kältemaschinenmodelle von Interesse und andererseits der Effizienzabfall bei höheren Außentemperaturen. Diese Information soll dazu dienen, eine realistische Abschätzung der Effizienz von Kompressionskältemaschinen abzugeben, die sich auf den Stromverbrauch der Maschine auswirkt und so die Emissionen aus Stromverbrauch, den TEWI und die Stromkosten der Anlage bestimmt. Die ausgewählten Maschinen sind allesamt reversibel betreibbar; da hier jedoch nur der Kühlbetrieb betrachtet wird, werden die Maschinen daher im Folgenden als Kältemaschinen bezeichnet. Die ausgewählten Modelle sind in Tab. 10 angeführt.

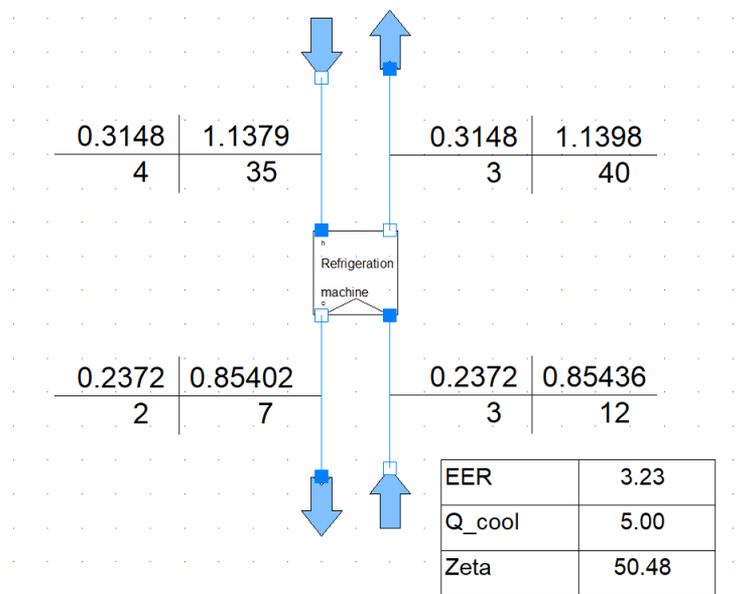
Tab. 10: Die für die Errechnung der Gütegrade und EERs herangezogenen Kompressionskältemaschinen.

Typ	Hersteller	Modell	Kälteleistung [kW]	Quelle Datenblatt
Luft-Wasser-Kältemaschine mit R290	Panasonic	Aquarea L KIT-ADC05L6E5AN	5,0	(186)
Luft-Wasser-Kältemaschine mit R290	Panasonic	Aquarea L KIT-ADC07L6E5AN	7,0	(186)

Typ	Hersteller	Modell	Kälteleistung [kW]	Quelle Datenblatt
Luft-Wasser-Kältemaschine mit R290	Panasonic	Aquarea L KIT-ADC09L6E5AN	9,0	(186)
Luft-Wasser-Kältemaschine mit R410A	Heliotherm	Comfort Compact S08L-M-CC	8,2	(187)
Luft-Wasser-Kältemaschine mit R410A	Heliotherm	Comfort Compact S12L-M-CC	11,0	(187)
Luft-Wasser-Kältemaschine mit R410A	Heliotherm	Comfort Compact S18L-M-CC	13,8	(187)
Luft-Luft-Splitanlage mit R32	Daikin	Ururu Sarara FTXZ 25N+25N	2,5	(188)
Luft-Luft-Splitanlage mit R32	Daikin	Ururu Sarara FTXZ 35N+35N	3,5	(188)
Luft-Luft-Splitanlage mit R32	Daikin	Ururu Sarara FTXZ 50N+50N	5,0	(188)

Hierbei wurden die für verschiedene Prüfpunkte angegebenen EERs aus den Datenblättern der Maschinen entnommen und der zugehörige Gütegrad (oder Zeta-Wert ζ) mithilfe eines in IPSEpro implementierten Kältemaschinenmodells ermittelt (s. Abb. 29). Der so errechnete Gütegrad je Kälteabgabetemperatur (also z. B. 7 oder 18 °C für die Luft-Wasser-Kältemaschinen oder 22 °C für die Luft-Luft-Kältemaschine) wurde dann verwendet, um die *EER* der betreffenden Maschine bei höherer Kondensationstemperatur im Rückkühler zu ermitteln (also unter höheren Außentemperaturen). Die relevanten Ausschnitte aus den Datenblättern der betrachteten Maschinen sind im Anhang im Abschnitt 10.1 beigefügt.

Abb. 29: Das Kältemaschinenmodell im Simulationsprogramm IPSEpro, hier mit den Einstellungen für den Prüfpunkt A35/W7 der Panasonic 5 kW Aquarea L KIT-ADC05L6E5AN.



Das Gleichungssystem des Kompressionskältemaschinen-Simulationsmodells besteht im Kern aus drei Gleichungen, über die die Effizienz und Leistung der Maschine abhängig von den Verdampfungs- und Kondensationstemperaturniveaus errechnet wird. Einerseits wird die Carnot-Effizienz η_c der Maschine abhängig von den Temperaturniveaus im Verdampfer und Kondensator ermittelt:

$$\eta_c = \frac{T_u + 273,15}{T_o - T_u} \quad [-] \quad (1)$$

wobei T_u die Verdampfungstemperatur und T_o die Kondensationstemperatur beschreibt. Die Verdampfungstemperatur T_u ergibt sich aus der Austrittstemperatur des zu kühlenden Mediums (Raumluft, Kühlwasser im Kälteverteilungssystem des Gebäudes) aus dem Verdampfer abzüglich des Pinch (5 K) und die Kondensationstemperatur T_o aus der Eintrittstemperatur des Rückkühlmediums (Außenluft) in den Kondensator zuzüglich der Temperaturspreizung des Rückkühlmediums im Kondensator (5 K) und des Pinch (5 K). Die Annahmen für Verdampferein- und -austrittstemperaturen des zu kühlenden Mediums sowie für Kondensatoreintrittstemperaturen des Rückkühlmediums basieren auf den Angaben bezüglich der Prüfbedingungen für Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen für die Raumbeheizung und -kühlung und Prozess-Kühler mit elektrisch angetriebenen Verdichtern - Teil 2 der EN 14511. Zum Beispiel gibt die Prüfpunktkennung A35/W7 im Datenblatt einer Luft-Wasser-Kältemaschine an, dass die Eintrittstemperatur des Rückkühlmediums (Außenluft) in den Kondensator 35 °C beträgt und sich die Austrittstemperatur des gebäudeseitigen Kühlwassers aus dem Verdampfer auf 7 °C beläuft. Somit ergibt sich eine Verdampfungstemperatur T_u von 2 °C und eine Kondensationstemperatur von 45 °C.

Andererseits wird die Leistungszahl oder EER über die Kälteleistung $\dot{Q}_{Kälte}$ und die aufgenommene elektrische Leistung P_{el} bestimmt:

$$EER = \frac{\dot{Q}_{Kälte}}{P_{el}} \quad [-] \quad (2)$$

wobei die Angaben für die Leistungszahl EER und die Kühlleistung $\dot{Q}_{Kälte}$ den Datenblättern entnommen wurden. Schließlich wird der Gütegrad (Zeta-Wert ζ) aus dem Verhältnis der EER und der Carnot-Effizienz η_c bestimmt:

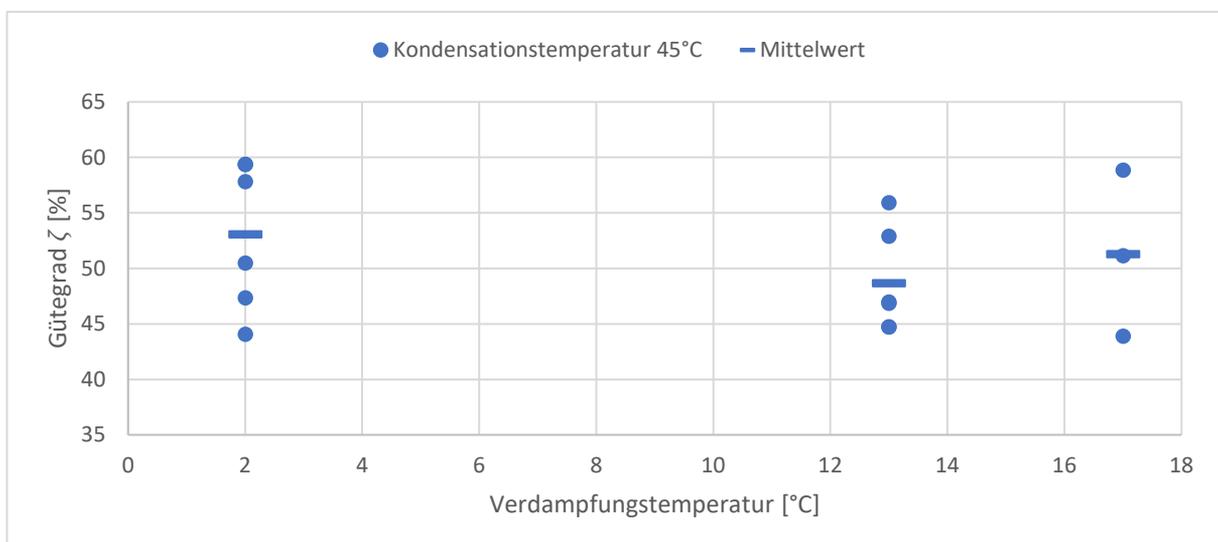
$$\zeta = \frac{EER}{\eta_c} \quad [-] \quad (3)$$

Das gesamte im Kältemaschinenmodell implementierte Gleichungssystem ist im Anhang in Abschnitt 10.2 beigefügt.

Dieses Gleichungssystem kann nach Ermittlung des Gütegrades ζ nun auch verwendet werden, um mithilfe des nun bekannten Gütegrades ζ eine EER bei höheren Außentemperaturen zu ermitteln. Die in den Datenblättern angegebenen Prüfpunkte für die Luft-Wasser-Kältemaschinen sind A35/W7 und A35/W18 und für die Luft-Luft-Splitanlage 35/27. Mithilfe der errechneten Gütegrade (die als konstant angenommen wurden) wurde nun die zugehörige EER für die Betriebspunkte A40/W7, A40/W18 und 40/27 berechnet.

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Abb. 30 bis Abb. 34 ersichtlich: In Abb. 30 sind die aus den in den Datenblättern angegebenen EER s errechneten Gütegrade dargestellt. Es zeigen sich Werte zwischen 44 und 60 %, deren Mittelwert je Verdampfungstemperatur zwischen 48,7 und 53,1 % liegt. Dies entspricht auch in etwa dem zu erwartendem Gütegrad für Kompressionskältemaschinen, der meist zwischen 50 und 60 % liegt (189). Es zeigt sich auch, dass der Gütegrad der betrachteten Maschinen unabhängig von der Verdampfungstemperatur in einem ähnlichen Wertebereich liegt, auch wenn sich Streuung und Mittelwert leicht unterscheiden. Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass die Stichprobengröße für diese Analyse sehr klein ist ($n = 9$) und sich in einer umfassenderen Betrachtung mit größerer Stichprobe ein anderes Bild zeigen könnte.

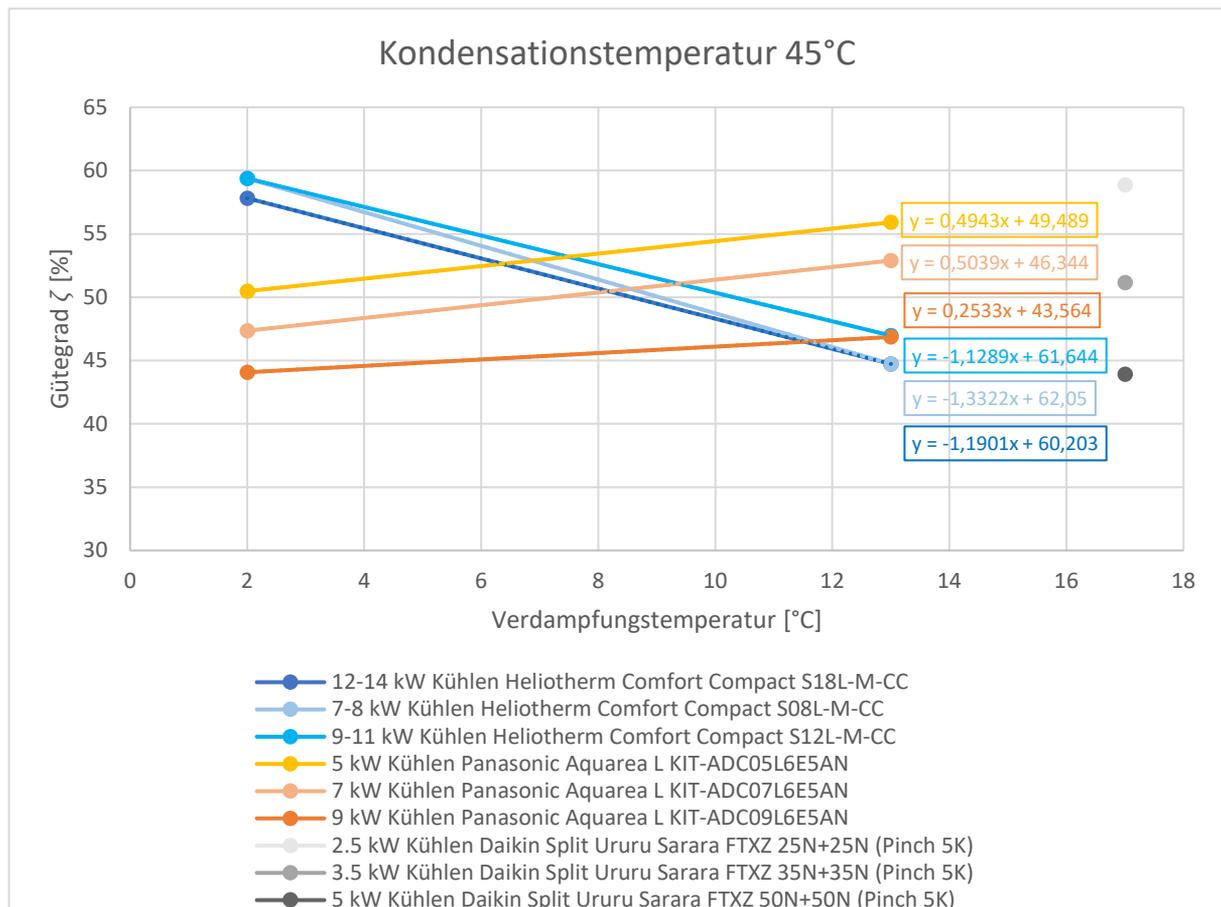
Abb. 30: Die errechneten Gütegrade für die in den Datenblättern angegebenen Prüfpunkte abhängig von der Verdampfungstemperatur.



Für die Luft-Wasser-Maschinen sind jeweils die Prüfpunkte A35/W7 und A35/W18 angegeben, wofür sich ein Trend für das Verhalten des Gütegrades abhängig von der Verdampfungstemperatur errechnen lässt. Aus Abb. 31 lassen sich die Ergebnisse der Trendberechnung entnehmen. Wie zu sehen ist, zeigt sich für die in blauen Farbtönen gehaltenen Heliotherm-Kältemaschinen immer ein sinkender

Gütegrad mit steigender Verdampfungstemperatur, während die Gütegrade der in orange und gelb gehaltenen Panasonic-Kältemaschinen bei steigender Verdampfungstemperatur einen steigenden Trend zeigen. Die Gütegrade der Daikin-Splitgeräte sind in Graustufen eingezeichnet. Es lässt sich also für die vorliegende Stichprobe keine Aussage zum Verhalten des Gütegrades abhängig von der Verdampfungstemperatur machen.

Abb. 31: Die Veränderung des Gütegrads je Maschine abhängig von der Verdampfungstemperatur (falls mehrere Prüfpunkte angegeben sind – wie ersichtlich, gibt es bei den Daikin-Splitgeräten nur einen Prüfpunkt).



Um nun zu ermitteln, wie sich die EER der betrachteten Kältemaschinen verhält, wenn sie bei höheren Außentemperaturen betrieben werden, wurden die Ergebnisse aus den Gütegradberechnungen verwendet. Hierbei wurde die EER je Maschine und Verdampfungstemperatur über den für die Maschine bei derselben Verdampfungstemperatur errechneten Gütegrad berechnet; d. h. beispielsweise, dass der für den Prüfpunkt A35/W7 errechnete Gütegrad der Heliotherm Comfort Compact S18L-M-CC für diese Verdampfungstemperatur (W7 = Verdampfungstemperatur 2 °C) als konstant angenommen wird und für die Errechnung der EER für den Betriebspunkt A40/W7 (Außentemperatur 40 °C, Kondensationstemperatur 50 °C, Verdampfungstemperatur 2 °C) derselben Maschine verwendet wird.

Abb. 32 zeigt die in den Datenblättern angegebenen (blau) sowie die über die Gütegrade errechneten EERs (weiß) der betrachteten Maschinen. Man sieht, dass die EER mit steigender Verdampfungstemperatur und niedrigerer Kondensationstemperatur ansteigt. Dies deckt sich mit der Erwartung,

dass die Kältemaschineneffizienz bei näher zusammenliegenden Verdampfungs- und Kondensations-
 temperaturniveaus steigt (184). Die EERs liegen bei einer Kondensationstemperatur von 45 °C und
 einer Verdampfungstemperatur von 2 °C zwischen 2,8 und 3,8, bei einer Verdampfungstemperatur
 von 13 °C zwischen 4 und 5 und bei einer Verdampfungstemperatur von 17 °C zwischen 4,6 und 6,1.
 Bei einer Kondensationstemperatur von 50 °C liegen die Werte für die zwischen 2,5 und 3,5, 3,5 und
 4,4 und 3,9 und 5,2.

Abb. 32: Die EERs aus den Datenblättern der betrachteten Maschinen (mit Kondensationstemperatur
 45 °C in blau) und die mithilfe der zuvor errechneten Gütegrade bestimmten EERs (mit Kondensations-
 temperatur 50 °C in weiß) sowie der sich daraus ergebende Trend der EERs je Kondensationstempere-
 tur.

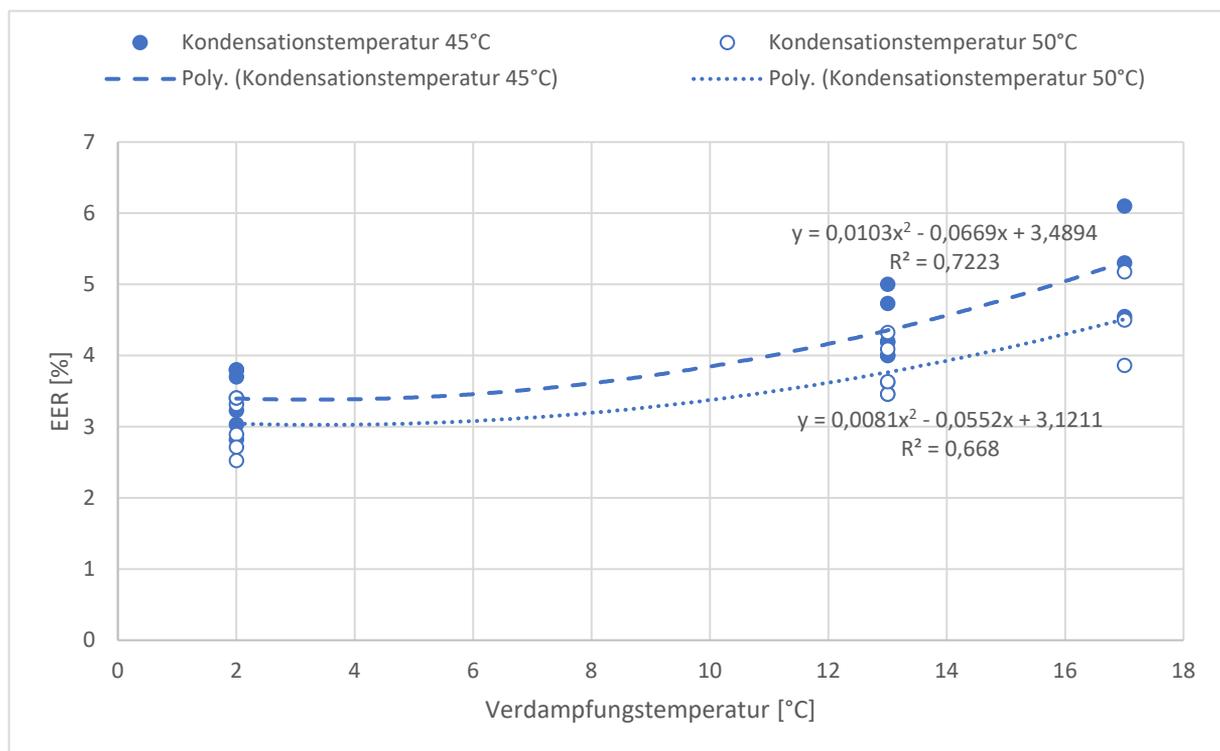


Abb. 33 und Abb. 34 zeigen die Veränderung der EER je Maschine abhängig von der Verdampfungs-
 temperatur bei den Kondensationstemperaturen 45 und 50 °C. Man sieht, dass sich die EERs der He-
 liotherm-Kältemaschinen nur leicht verändern, während die EERs der Panasonic-Kältemaschinen bei
 steigenden Verdampfungstemperaturen deutlicher ansteigt. Daraus ergeben sich auch die in Abb. 31
 gezeigten sinkenden Gütegrade der Heliotherm-Kältemaschinen. In allen Fällen ist der Trend jedoch
 steigend, wenn auch nur sehr leicht.

Abb. 33: Die Veränderung der EER je Maschine abhängig von der Verdampfungstemperatur für eine Kondensationstemperatur von 45 °C (aus Datenblättern entnommen).

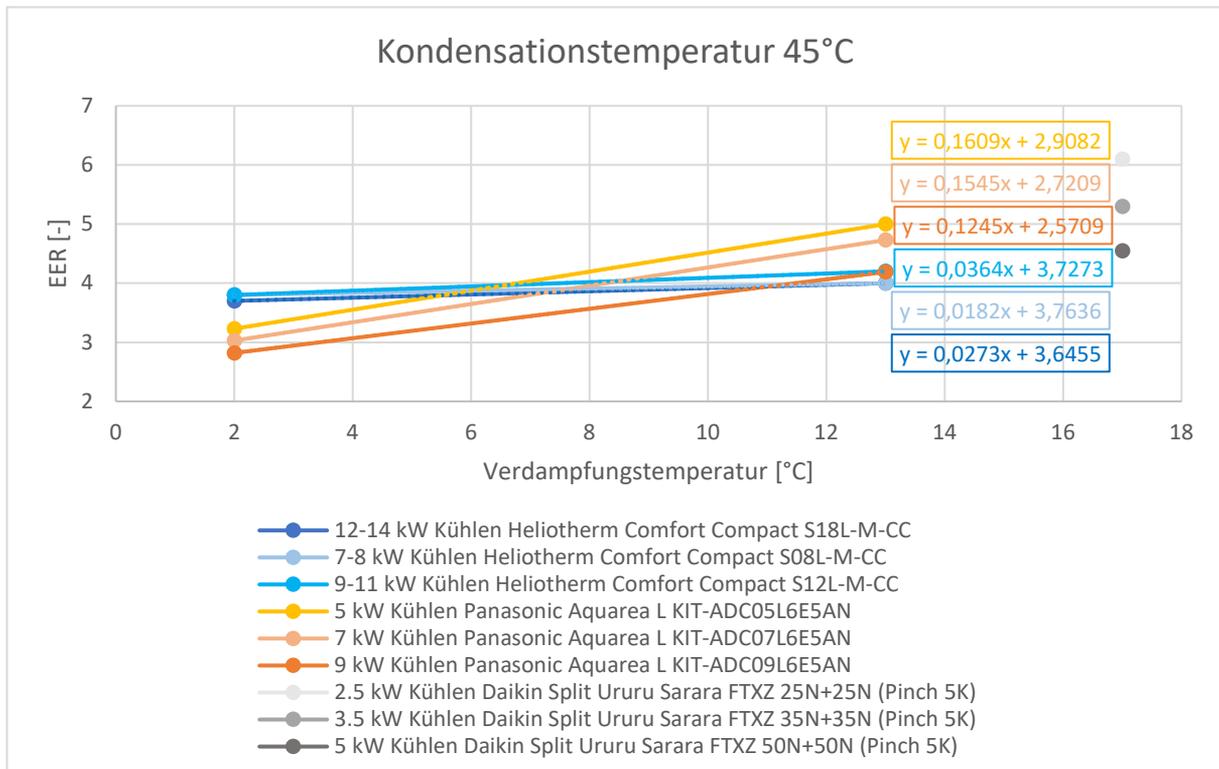
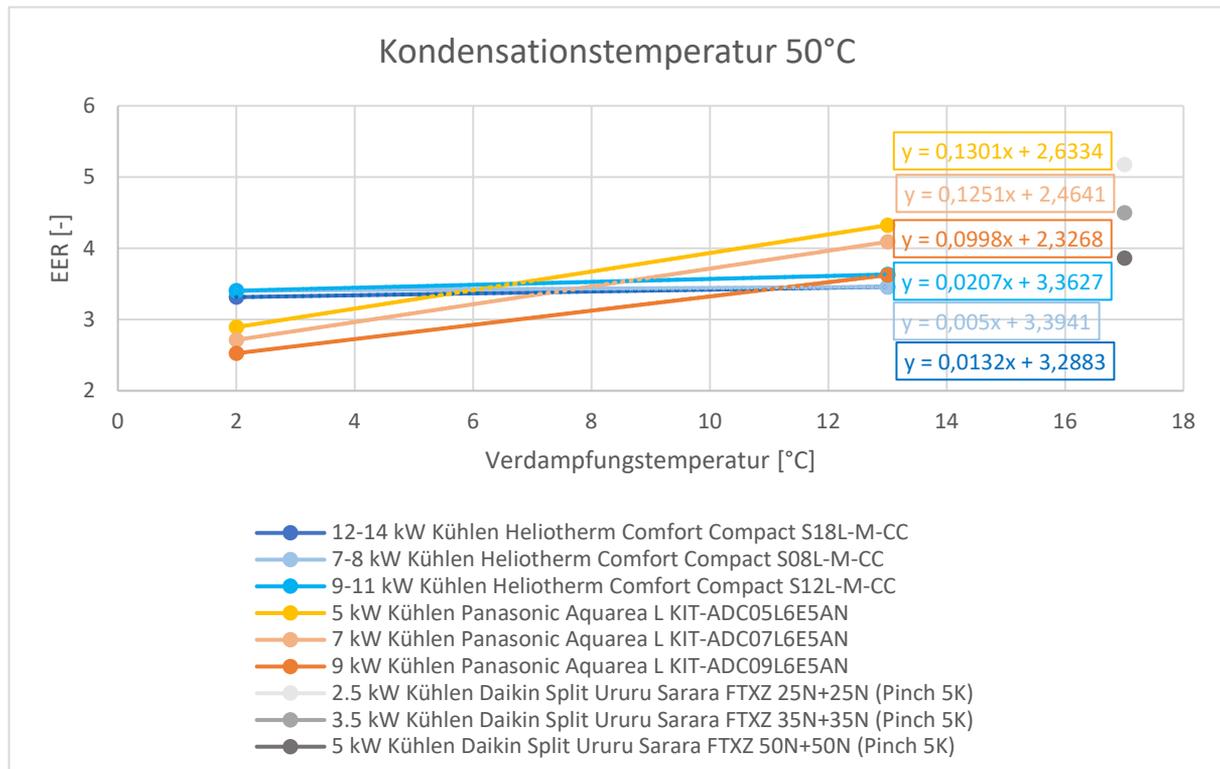


Abb. 34: Die Veränderung der EER je Maschine abhängig von der Verdampfungstemperatur für eine Kondensationstemperatur von 50 °C (aus Gütegraden errechnet).



Die Gütegrad- und EER-Berechnungen haben gezeigt, dass sich die errechneten Gütegrade in einem erwartbaren Bereich um 50 % und ohne Zusammenhang mit der Verdampfungstemperatur bewegen und auch die EERs (sowohl jene aus den Datenblättern als auch die über den Gütegrad errechneten) erwartungsgemäß zwischen 2,5 und 6,1 schwanken. Vgl. hierzu die Angaben zu den EERs von Splitanlagen und Luft/Wasser-Kaltwassersätzen im Technologieprofil Kompressionskältemaschinen (Kapitel 2.4.2).

6.1.2 IDA ICE Simulationen

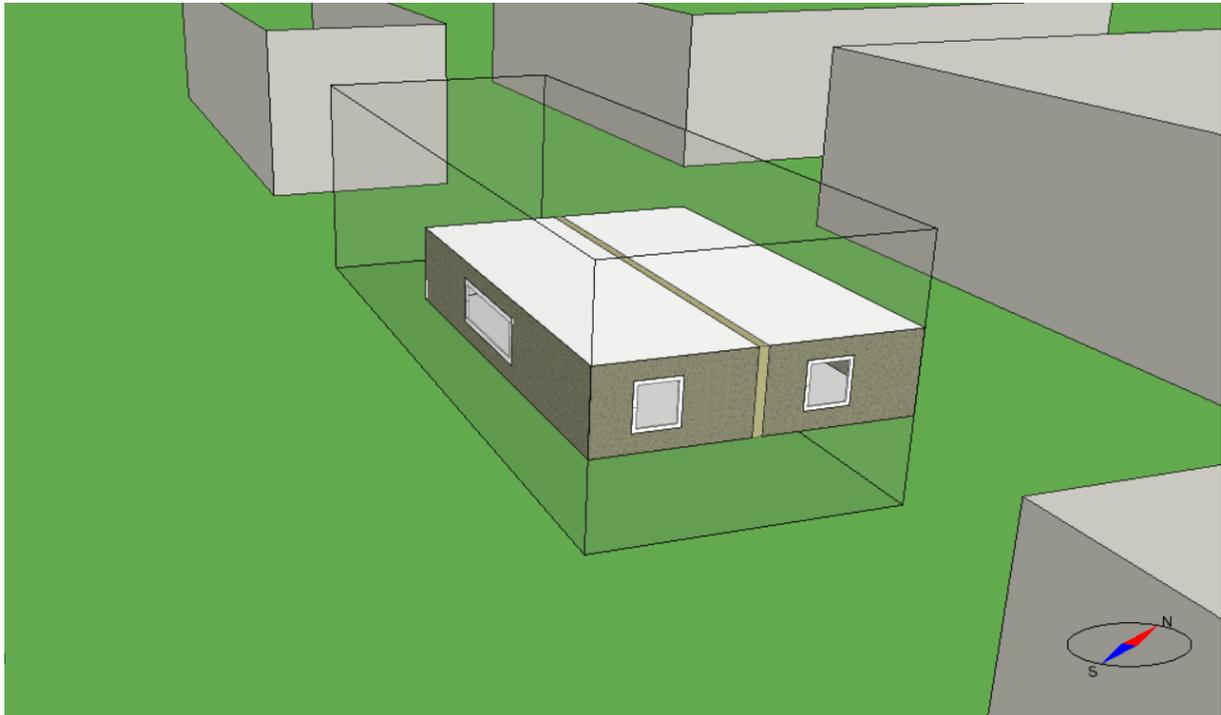
Da die Angabe von Kühlleistungen passiver Kühlmethode eine komplexe Angelegenheit ist, die sich nicht alleine durch Literaturrecherche bewältigen lässt, wurden Kühlbedarfsberechnungen im Simulationsprogramm IDA ICE angestellt. Ziel ist es, Werte zu liefern, die miteinander vergleichbar sind. Der Kühlbedarf eines Gebäudes ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, die etwa die thermischen Eigenschaften der Gebäudehülle, der Gebäudegeometrie und -ausrichtung sowie geografische Lage, Klima und Eigenschaften der verglasten Flächen (zusammengefasst im $g_{\text{tot, Fassade}}$ des Gebäudes, siehe Kapitel 4.1 im Bericht E2.1 Bildungsfaktoren des Kältebedarfs) sowie die Gebäudenutzung umfasst. Die Simulation des Kältebedarfs anhand eines konkreten Beispielgebäudes erlaubt so die Gegenüberstellung der Leistungsfähigkeit verschiedener Kühltechnologien.

Um eine möglichst plausible Annahme hinsichtlich der Eigenschaften des verwendeten Beispielgebäudes zu machen, wurde auf die Simulationsergebnisse aus dem Arbeitspaket 2 (Simulation des Kältebedarfs 2030/2050) und insbesondere auf das dort verwendete Gebäudemodell Nummer 4 zurückgegriffen (s. 4. Zeile in Tabelle 4 des Kapitel 4.1 im Bericht E2.1 Bildungsfaktoren des Kältebedarfs). Die Berechnungen des zukünftigen Kältebedarfs in Österreich zeigen, dass der Kältebedarf eines

Gebäudes gut anhand des $g_{\text{tot, Fassade}}$ vorhergesagt werden kann. Es wurde daher entschieden, ein Gebäudemodell aus dem betreffenden Arbeitspaket zu verwenden, das einen mittleren $g_{\text{tot, Fassade}}$ von 10 % aufweist und in dem noch keine passiven Kühltechnologien außer einer Nachtlüftung eingesetzt werden. Hierfür eignet sich das eben erwähnte Gebäudemodell in Zeile 4 der Tabelle 4 im Bericht E2.1 Bildungsfaktoren des Kältebedarfs, in dem dann immer eine andere passive Kühltechnologie implementiert und der Kältebedarf für diese Konfiguration simuliert wurde. In Abb. 35 ist das Gebäudemodell in IDA ICE abgebildet. Zur Veranschaulichung der Wirkung der Nachtlüftung wurde auch ein Fall ohne Nachtlüftung simuliert. Die verwendeten Klimadaten beziehen sich auf das Klima in Wien im Jahr 2030 und wurden deshalb gewählt, weil die Simulationsergebnisse des Arbeitspakets 2 (Simulation des Kältebedarfs 2030/2050) zeigen, dass der Kältebedarf für dieses Szenario in den Ergebnissen aller simulierter Klimaszenarien im Mittelfeld liegt. Es wurden folgende Simulationsfälle berechnet:

- *Baseline Wien 2030 inklusive Nachtlüftung.* In diesem Fall entspricht die Gebäudekonfiguration genau jener des für die Kältebedarfsermittlung verwendeten Gebäudemodells in Zeile 4 der Tabelle 4 des Berichts E2.1 Bildungsfaktoren des Kältebedarfs. In Tab. 11 sind die wichtigsten Parameter für diesen Fall nochmals zusammengefasst.
- *Wien 2030 Verschattung inklusive Nachtlüftung.* Hier wurden gegenüber dem Baselineszenario an allen Fenstern Rollläden mit einem F_c -Wert von 0,26 implementiert. Der Steuermechanismus der Verschattung ist ebenfalls im Bericht E 2.1 Bildungsfaktoren des Kältebedarfs beschrieben.
- *Wien 2030 kühle Wand (Albedo 0,6) inklusive Nachtlüftung.* Hier wurde eine helle Außenwandoberfläche mit einer Albedo von 0,6 und einem Emissionsgrad von 0,9 eingestellt.
- *Wien 2030 kühle Wand (Albedo 0,7) inklusive Nachtlüftung.* Hier wurde eine weiße Außenwandoberfläche mit einer Albedo von 0,7 und einem Emissionsgrad von 0,9 eingestellt.
- *Wien 2030 Verglasung (Sonnenschutzverglasung $g = 0,42$) inklusive Nachtlüftung.* Hier wurde ein Sonnenschutzglas mit einem g -Wert von 0,42 und einem U -Wert von 1,3 $W/(m^2 \cdot K)$ eingestellt.
- *Wien 2030 Verglasung (Sonnenschutzverglasung $g = 0,33$) inklusive Nachtlüftung.* Hier wurde ein Sonnenschutzglas mit einem g -Wert von 0,33 und einem U -Wert von 1 $W/(m^2 \cdot K)$ eingestellt.
- *Baseline Wien 2030 ohne Nachtlüftung.* Hier wurde die Nachtlüftung deaktiviert.

Abb. 35: Das für die Simulationen verwendete Gebäudemodell in IDA ICE.



Tab. 11: Eckdaten des für die Simulationen verwendeten Beispielgebäudes im Baselineszenario Wien 2030 inklusive Nachtlüftung.

Parameter	Annahme
Klimaszenario	Wien 2030
Standort	Wien
Ausrichtung Breitseite der Wohnung	Südost
Nutzfläche	140 m ²
U-Wert Außenwand	1,5 W/(m ² ·K)
U-Wert Fenster	1,2 W/(m ² ·K)
Fensterflächenanteil an der Fassadenfläche	17 %
Anteil öffentbare Fensterfläche	44,1 %
g-Wert Fenster	0,59
F _c -Wert Verschattung	1

Parameter	Annahme
g_{tot} Fenster	0,59
g_{tot} , Fassade	0,1
Verschattung	keine
Albedo Außenwand	0,5
Emissionsgrad Außenwand	0,9

Da sich in den Ergebnissen eine wider Erwarten relativ hohe Wirkung der kühlen Hüllmaterialien gezeigt hat, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die starke Reduktion der Kühllast durch die Realisierung einer höheren Albedo wurde darauf zurückgeführt, dass sich eine helle Außenwandoberfläche umso stärker auswirken wird, je schlechter die thermischen Eigenschaften der Wand sind (also je höher der U-Wert der Außenwand ist) und je kleiner der Verglasungsanteil der Fassade ist. Es wurden daher vier weitere Simulationsfälle durchgerechnet:

- *SENSITIVITÄTSANALYSE Baseline Wien 2030 inklusive Nachtlüftung U-Wert 0,20 W/(m²·K).* Dieser Fall unterscheidet sich gegenüber dem Baselinemodell in Tab. 11 nur im U-Wert der Außenwand, der durch das Hinzufügen einer 16 cm starken EPS-Dämmung auf 0,2 W/(m²·K) reduziert wurde.
- *SENSITIVITÄTSANALYSE Wien 2030 kühle Wand (Albedo 0,7) inklusive Nachtlüftung U-Wert 0,20 W/(m²·K).* Hier wurde nun aufbauend auf den obigen Simulationsfall wieder eine weiße Außenwandoberfläche mit einer Albedo von 0,7 und einem Emissionsgrad von 0,9 eingestellt.
- *SENSITIVITÄTSANALYSE Baseline Wien 2030 inklusive Nachtlüftung Fensteranteil 50 %.* Dieser Fall unterscheidet sich gegenüber dem Baselinemodell in Tab. 11 nur im Verglasungsanteil der Fassade, der durch Vergrößern der Fensterflächen auf 50 % erhöht wurde. Um die offenbare Fensterfläche konstant auf 2,95 m² zu halten, wurde der offenbare Fensterflächenanteil auf 15,08 % erhöht.
- *SENSITIVITÄTSANALYSE Wien 2030 kühle Wand (Albedo 0,7) inklusive Nachtlüftung Fensteranteil 50 %.* Hier wurde nun in weiterer Folge wieder eine weiße Außenwandoberfläche mit einer Albedo von 0,7 und einem Emissionsgrad von 0,9 eingestellt.

Die Erwartung war, dass die Anwendung einer kühlen Wand in beiden Fällen (niedrigerer U-Wert der Außenwand und höherer Verglasungsanteil) einen viel geringeren Effekt haben wird. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse werden im Technologieprofil zu den kühlen Hüllmaterialien (Kapitel 1.2.3) erläutert und zeigen, dass eine kühle Wand bei besserem U-Wert oder höherem Verglasungsanteil tatsächlich einen deutlich geringeren Kühleffekt hat.

6.2 Ökonomische Bewertung

6.2.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten wurden, wenn nicht anders angegeben, projektintern ermittelt.

6.2.2 Wartung und Betrieb

Diese Kosten wurden, wo verfügbar, über Literaturrecherche ermittelt.

6.2.3 Stromkosten

Für die Ermittlung der Kosten aus dem Stromverbrauch von Kompressionskältemaschinen wurden die durchschnittlichen Strompreise der letzten Jahre für Haushalte in Österreich recherchiert. Die Daten stammen von der E-Control, der Statistik Austria sowie der EU Eurostat. Die genauen Quellen für die Daten sind in Tab. 12 angegeben.

Tab. 12: Datenquellen für Strompreisrecherche.

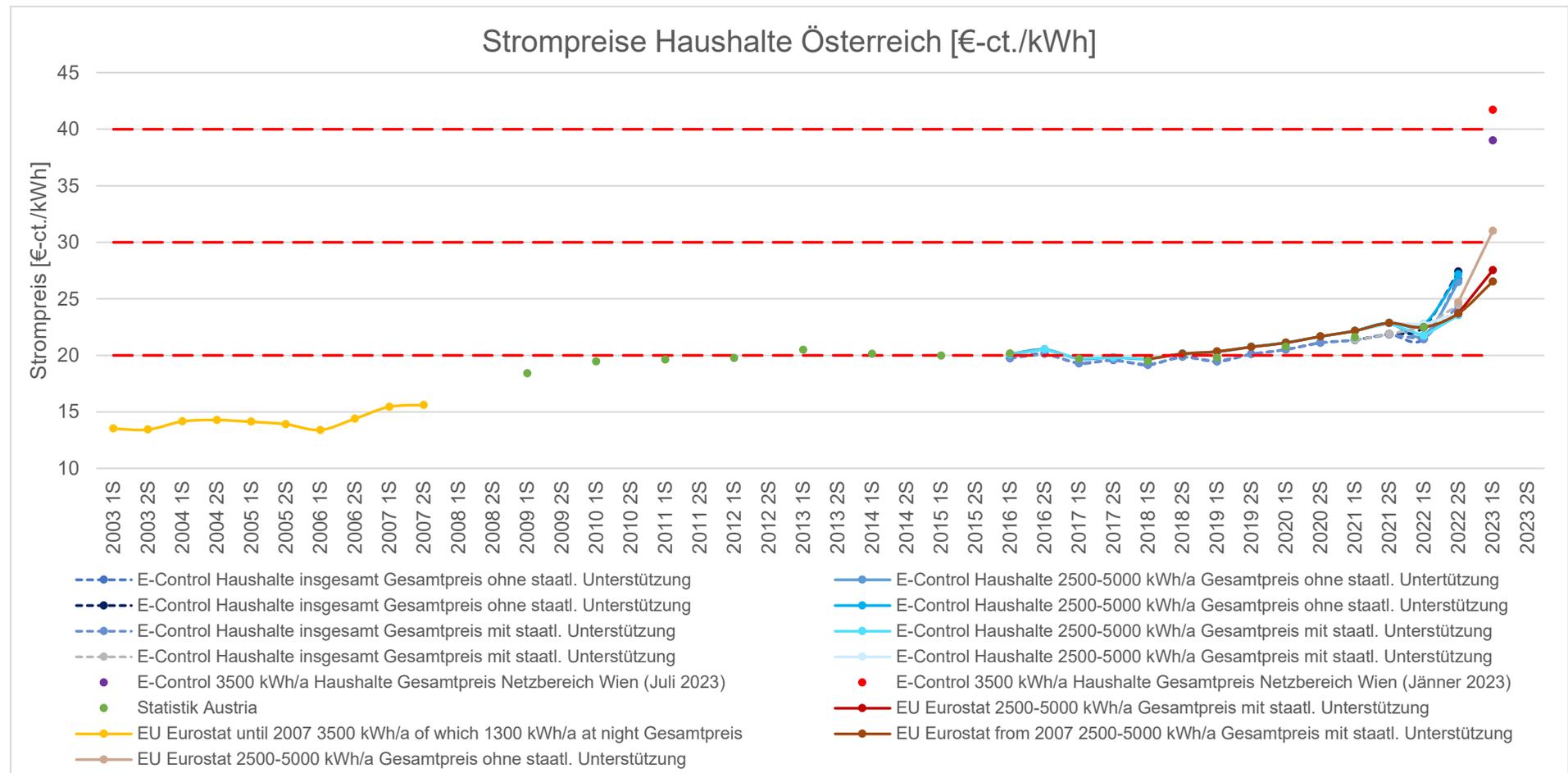
Bezeichnung	Stand	Institution	Quellenverweis
E-Control Haushalte insgesamt Gesamtpreis ohne staatl. Unterstützung	Juni 2023	E-Control	(190)
E-Control Haushalte 2500-5000 kWh/a Gesamtpreis ohne staatl. Unterstützung	Juni 2023	E-Control	(190)
E-Control Haushalte insgesamt Gesamtpreis mit staatl. Unterstützung	Juni 2023	E-Control	(190)
E-Control Haushalte 2500-5000 kWh/a Gesamtpreis mit staatl. Unterstützung	Juni 2023	E-Control	(190)
E-Control Haushalte insgesamt Gesamtpreis ohne staatl. Unterstützung	März 2023	E-Control	(191)
E-Control Haushalte 2500-5000 kWh/a Gesamtpreis ohne staatl. Unterstützung	März 2023	E-Control	(191)
E-Control Haushalte insgesamt Gesamtpreis mit staatl. Unterstützung	März 2023	E-Control	(191)
E-Control Haushalte 2500-5000 kWh/a Gesamtpreis mit staatl. Unterstützung	März 2023	E-Control	(191)

Bezeichnung	Stand	Institution	Quellenverweis
Statistik Austria	März 2023	Statistik Austria	(192)
EU Eurostat 2500-5000 kWh/a Gesamtpreis mit staatl. Unterstützung	Oktober 2023	EU Eurostat	(193)
EU Eurostat 2500-5000 kWh/a Gesamtpreis ohne staatl. Unterstützung	Oktober 2023	EU Eurostat	(194)
EU Eurostat until 2007 3500 kWh/a of which 1300 kWh/a at night Gesamtpreis	Mai 2021	EU Eurostat	(195)
EU Eurostat from 2007 2500-5000 kWh/a Gesamtpreis mit staatl. Unterstützung	Oktober 2023	EU Eurostat	(196)
E-Control 3500 kWh/a Haushalte Gesamtpreis Netzbereich Wien (Jänner 2023)	Jänner 2023	EU Eurostat	(197)
E-Control 3500 kWh/a Haushalte Gesamtpreis Netzbereich Wien (Juli 2023)	Juli 2023	EU Eurostat	(198)

Es wurde immer der Gesamtpreis entweder für alle Haushalte oder für Haushalte mit einem mittleren Stromverbrauch von zwischen 2.500 und 5.000 kWh/Jahr, wo möglich immer mit und ohne staatliche Unterstützung, abgerufen. Die Ergebnisse sind aus Abb. 36 ersichtlich. Da die Strompreise insbesondere innerhalb der letzten zwei Jahre deutlich zugenommen haben und eine Aussage über die künftige Marktentwicklung nur sehr schwer zu machen ist, würde sich das Mitteln über die recherchierten Preise genauso wie das Errechnen eines Trends als wenig aussagekräftig erweisen. Daher wird bei der Berechnung der Stromkosten mit drei Annahmen gerechnet, um ein breiteres Spektrum an Entwicklungen am Strommarkt abzudecken:

- **niedriger Strompreis: 20 ct./kWh Strom**
- **mittlerer Strompreis: 30 ct./kWh Strom**
- **hoher Strompreis: 40 ct./kWh Strom**

Abb. 36: Die Stromkosten in Österreich von 2003 bis 2023 für Haushalte, laut verschiedener Quellen (s. Tab. 12 für genaue Quellenangaben zu jeder Datenreihe). Die rot strichlierten horizontalen Linien geben die Annahmen für die Strompreisberechnungen an (niedrig 20 ct./kWh, mittel 30 ct./kWh und hoch 40 ct./kWh).



Für die Quantifizierung der Stromkosten zur Kältebereitung durch Kompressionskältemaschinen werden die sogenannten Kältegestehungskosten herangezogen, die sich aus der Seasonal Energy Efficiency Ratio (SEER) berechnen lassen:

$$SEER = \frac{Q_{Kälte}}{W_{el}} \quad [-] \quad (5)$$

Die SEER beschreibt den über eine Kühlsaison gerechneten Wirkungsgrad einer Kältemaschine, wobei die während dieses Zeitraums aufgenommene Wärmemenge $Q_{Kälte}$ auf die in demselben Zeitraum verbrauchte elektrische Energiemenge W_{el} bezogen wird. Die SEER gibt also an, wieviele Einheiten Wärme pro investierte Einheit elektrischer Energie entzogen werden, wodurch sich die Kosten pro kWh Strom auf die korrespondierenden Einheiten entzogener Wärme (Wert der SEER) aufteilen. Die Kältegestehungskosten können dann aus dem Verhältnis von Strompreis und SEER berechnet werden:

$$Kältegestehungskosten = \frac{\text{Strompreis}}{SEER} \quad [€/kWh] \quad (6)$$

Für die SEER wurden fünf Werte angenommen, um einen Ergebnisbereich abzudecken, der Maschinen mit verschiedenen Betriebspunkten hinsichtlich Verdampfungs- und Kondensationstemperaturniveaus umfasst:

- **niedrige SEER: 2,0**
- **eher niedrige SEER: 2,5**
- **mittlere SEER: 3,0**
- **eher hohe SEER: 3,5**
- **hohe SEER: 4,0**

Die sich dadurch ergebenden Kältegestehungskosten sind aus Tab. 13 ersichtlich.

Tab. 13: Kältegestehungskosten für verschiedene Strompreis-SEER-Kombinationen.

Strompreis [€/kWh Strom]	SEER [-]	Kältegestehungskosten [€/kWh Kälte]
0,2	2,0	0,10
0,2	2,5	0,08
0,2	3,0	0,07
0,2	3,5	0,06
0,2	4,0	0,05
0,3	2,0	0,15
0,3	2,5	0,12
0,3	3,0	0,10
0,3	3,5	0,09
0,3	4,0	0,08
0,4	2,0	0,20
0,4	2,5	0,16
0,4	3,0	0,13
0,4	3,5	0,11
0,4	4,0	0,10

Die jährlichen Stromkosten durch Kältebereitung mittels Kompressionskältemaschine werden schließlich durch Multiplikation der Kältegestehungskosten mit dem jährlichen Kältebedarf berechnet:

$$\begin{aligned} \text{jährliche Kältegestehungskosten} \\ = \text{Kältegestehungskosten} \cdot Q_{\text{Kälte,jährlich}} \quad [\text{€/a}] \quad (7) \end{aligned}$$

wobei $Q_{\text{Kälte,jährlich}}$ den jährlichen Kältebedarf beschreibt. Hierbei stammt der Wert für den jährlichen Kältebedarf aus dem IDA ICE Baselineszenario für Wien 2030 inklusive Nachtlüftung ohne weitere Kühltechnologien, s. Kapitel 6.1.2. Die Ergebnisse sind in Abb. 37 dargestellt.

Abb. 37: Die jährlichen Kältegestehungskosten der Beispielanlage abhängig vom Strompreis und der SEER.

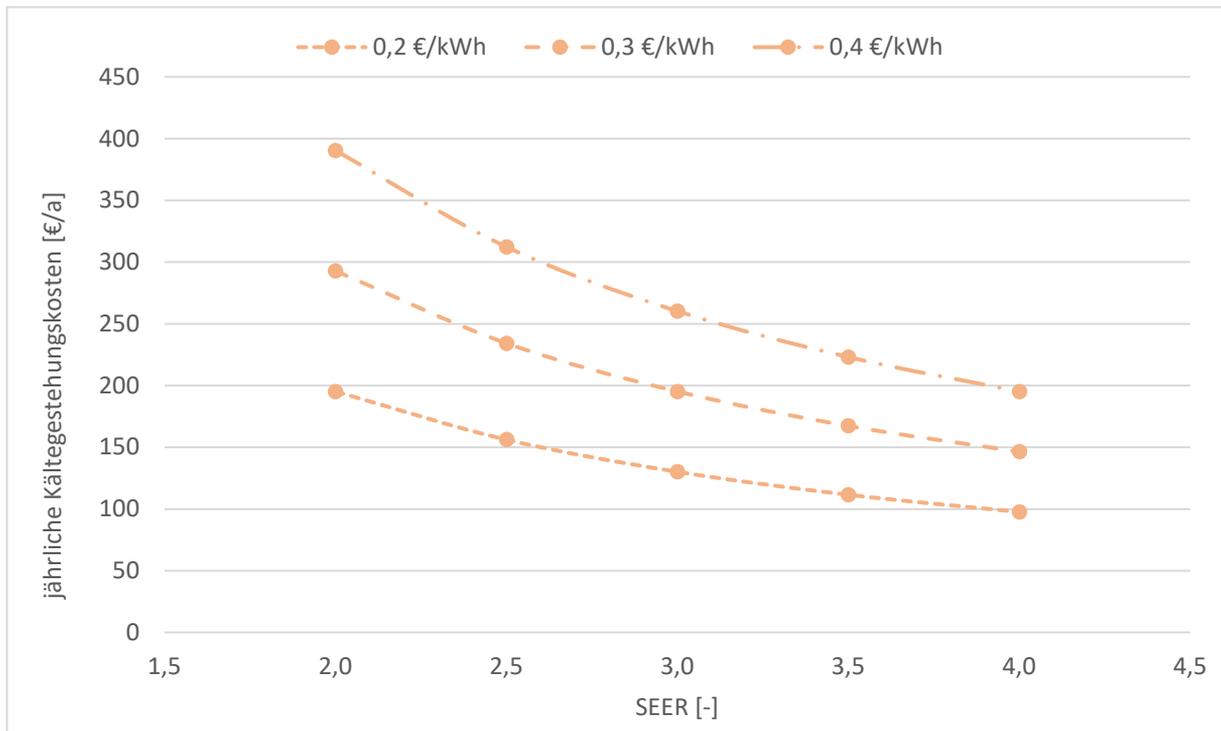
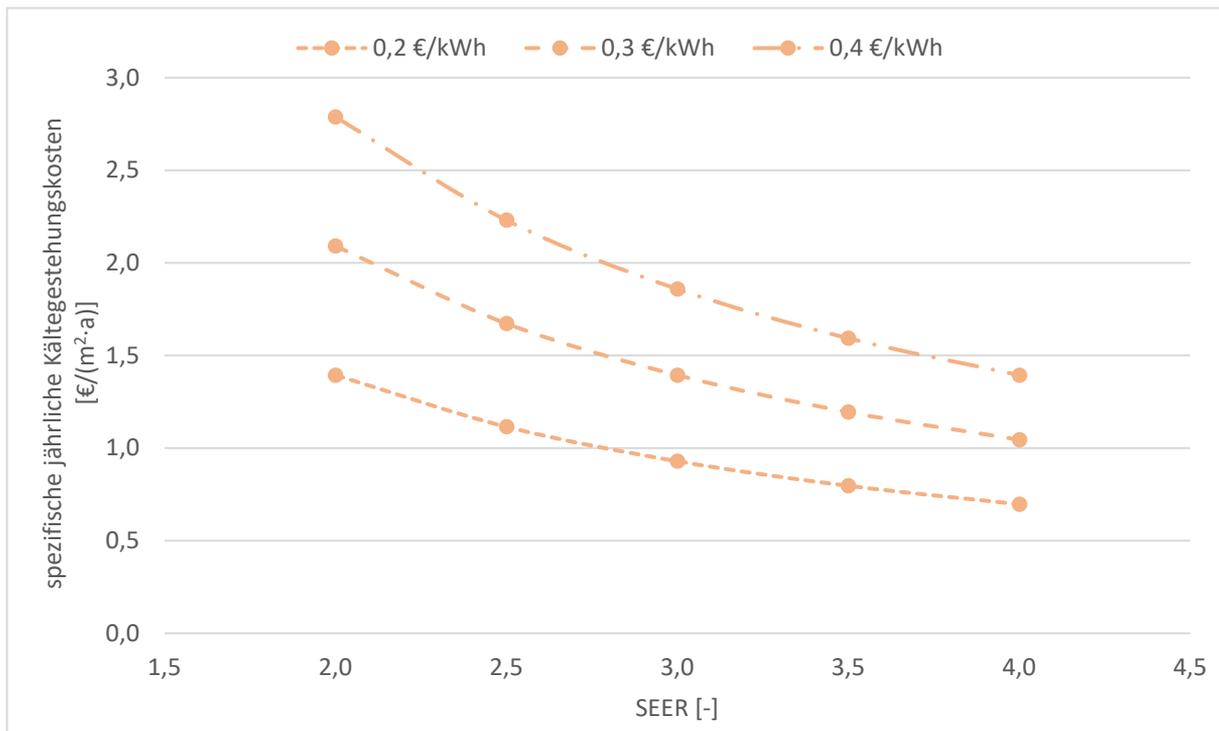


Abb. 38 zeigt die jährlichen Kältegestehungskosten bezogen auf die Wohnfläche des Beispielobjekts.

Abb. 38: Die spezifischen Kältegestehungskosten der Beispielanlage abhängig vom Strompreis und der SEER.



6.3 Ökologische Bewertung

6.3.1 Emissionsfaktoren

Die Emissionsfaktoren werden zur Berechnung des TEWI für eine beispielhafte Kompressionskältemaschine verwendet. Für die Ermittlung des Emissionsfaktors für Strom wurde eine Internetrecherche angestellt, siehe Tab. 14 für die verwendeten Quellen.

Tab. 14: Datenquellen für Stromemissionsfaktorenrecherche.

Bezeichnung	Stand	Institution	Quellenverweis
Umweltbundesamt THG Elektrizität Rechner (GEMIS, OLI) Österreichischer Liefermix	Dezember 2023	Umweltbundesamt	(199) (200)
Umweltbundesamt THG Elektrizität Rechner (GEMIS, OLI) Umweltzeichen UZ-46 "Grüner Strom"	Dezember 2023	Umweltbundesamt	(199)
E-Control Stromkennzeichnungsbericht (CO2 only) Österreichischer Liefermix	2010-2023	E-Control	(201–214)
Electricity Maps (ENTSO-E, IPCC etc.) Österreichischer Liefermix	2023	Electricity Maps	(215)
Our World in Data (EMBER, Energy Institute) Österreichischer Liefermix	2023	Our World in Data	(216)
Statista and EMBER Österreichischer Liefermix	Juni 2023	Statista, EMBER	(217)
Carbon Footprint.com (AIB) (CO2 only) Österreichischer Erzeugungsmix	Februar 2023	Carbon Footprint.com	(218)
OIB (Erläuterungen) OIB-RL 6 (ENTSO-E) Österreichischer Liefermix	2023	OIB	(219–221) ⁶

⁶ Das OIB gibt Emissionsfaktoren als Mittelwert über mehrjährige Zeitspannen an, wodurch sich ein stufenförmiger Graph ergibt. Jahre mit Überschneidungen der Emissionsfaktorenberechnungen wurden in der Grafik ausgespart.

Bezeichnung	Stand	Institution	Quellenverweis
EEA Österreichischer Erzeugungsmix (2023)	Oktober 2023	EEA	(222)

Ziel der Recherche war die Ermittlung der durch den Verbrauch des inländischen Strommixes verursachten Treibhausgasemissionen. Dies sollte alle wichtigen Treibhausgase umfassen und auch vorgelegte Emissionen des österreichischen Strommixes auf der Verbraucherseite abbilden. Die Recherche hat gezeigt, dass die Bilanzgrenzen für Emissionsfaktoren von den verschiedenen betrachteten Institutionen sehr unterschiedlich gewählt werden. So umfassen einige Angaben lediglich CO₂-Emissionen anstatt von in CO₂-Äquivalenten angegebenen gesamten Treibhausgasemissionen, den inländischen Erzeugungsmix anstatt jenen des auch Stromimporte umfassenden verbraucherseitigen Liefermixes oder nur die im letzten Umwandlungsschritt der Stromgestehungskette entstehenden Emissionen anstatt aller während der gesamten Umwandlungskette anfallenden Emissionen. Für die weiteren Berechnungen kommen daher nur Daten infrage, die möglichst viele dieser Aspekte erfüllen.

Informationen zur Berechnung der Emissionsfaktoren je nach Quelle sind in Tab. 15 zusammengefasst.

Tab. 15: Informationen zur Berechnung der Emissionsfaktoren der verschiedenen betrachteten Institutionen.

Quelle	Datengrundlage und Bilanzgrenzen
Umweltbundesamt	Daten aus GEMIS 5.1 für indirekte (vorgelagerte) Emissionen und Daten aus Österreichischer Luftschadstoffinventur (OLI) für direkte Emissionen im letzten Umwandlungsschritt in Endenergie. Die Ergebnisse beziehen sich auf die Treibhausgasemissionen der österreichischen Stromaufbringung (also unter Berücksichtigung des Stromhandels) inkl. Vorketten. Die indirekten Emissionen von UZ 46-zertifiziertem grünem Strom werden daher mit 0,014 kg CO ₂ -Äq./kWh Strom bewertet (200).
E-Control	Herkunftsnachweise (HKN) für Strom aus der Strom- und Gasnachweisdatenbank der E-Control (z. B. (213)). Die Ergebnisse beziehen sich auf die reinen CO ₂ -Emissionen des österreichischen Versorgungsmix ohne vorgelagerte (indirekte) Emissionen. Da Herkunftsnachweise unabhängig von Strommengen gehandelt werden, entspricht die Menge der in Österreich eingesetzten Herkunftsnachweise für Ökostrom nicht jener der in Österreich erzeugten oder zugekauften Ökostrommenge (223).
Electricity Maps	Direkte Emissionen aus EU-Emission Trading System (ETS) sowie ENTSO-E und Lebenszyklusemissionen (vorgelagerte Emissionen) von IPCC, EU-ETS, ENTSO-E, UN-ECE, INCER-ACV und WindEurope (224). Der Emissionsfaktor wird in Echtzeit basierend auf Daten der ENTSO-E berechnet. Er kann für den Erzeugungsmix oder Liefermix berechnet werden und berücksichtigt daher auch Stromim- und -exporte sowie Pumpspeicherkraftwerke und Batteriespeicher (225) (226).

Quelle	Datengrundlage und Bilanzgrenzen
Our World in Data	EMBER (Yearly Electricity Data Datensatz und European Electricity Review) und Energy Institute (Statistical Review of World Energy). Die Ergebnisse beziehen sich auf die Treibhausgasemissionen des österreichischen Liefermix. (216) (227)
Statista & EMBER	Der Wert bezieht sich auf die Treibhausgasemissionen der österreichischen Energie inkl. Vorketten und entspricht jenem von Our World in Data (216) für das Jahr 2022 angegebenen Wert für den Liefermix. Als Datengrundlage dienen auch hier die Erhebungen der EMBER. (217)
Carbon Footprint.com	Association of Issuing Bodies (AIB) für den Faktor für direkte CO ₂ -Emissionen des österreichischen Produktionsmix. (218) (228)
OIB	ENTSO-E für österreichische Produktionsdaten und Importströme (z. B. (219)), E-Control für Darstellung von Eigenbedarf und Netzverlusten sowie EU-Durchführungsbeschluss 2011/877/EU bzw. Verordnung (EU) 2015/2402 für Wirkungsgrad-Referenzwerte (219) (221). Die Umwandlungsausstoß-Daten im aktuellen Bericht stammen aus der Energiebilanz Österreich 1970-2021 der Statistik Austria (221). Die Ergebnisse beziehen sich auf die Treibhausgasemissionen des Liefermix in Österreich inklusive jener aus Vorketten, die in der Bundesländer-Luftschadstoffinventur 1990-2020 bzw. im Austria's National Inventory Report 2022 und in der Energiebilanz Österreich 1970-2021 ausgewiesen sind (229). Der Umwandlungsausstoß für Erneuerbare wie Wasserkraft, Windkraft, Photovoltaik, Geothermie und Reaktionswärme wurde jedoch mit 0 kg CO ₂ -Äq./kWh Strom bewertet (221).
EEA	An die UNFCCC und den EU GHG Monitoring Mechanism gemeldete nationale Emissionen sowie Energiebilanzen der Eurostat. Die Ergebnisse beziehen sich auf die Treibhausgasemissionen des Erzeugungsmix in Österreich. (230)

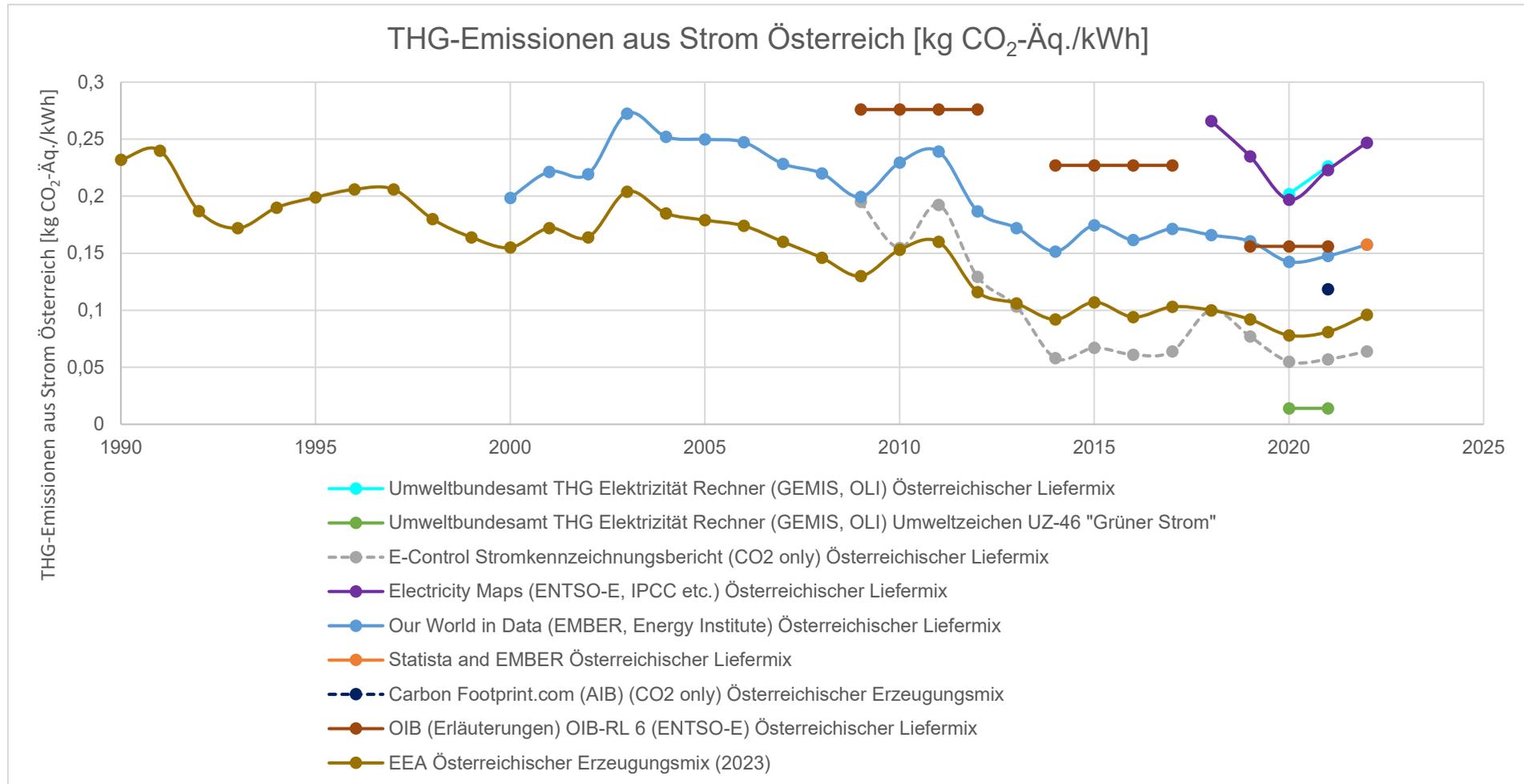
Die Ergebnisse der Recherche sind in Abb. 39 graphisch aufbereitet. Wie ersichtlich, sind die Ergebnisse sehr heterogen, weshalb sich beispielsweise für das Jahr 2021 aufgrund der unterschiedlichen Berechnungsmethoden Werte in einem Bereich von 0,057 bis 0,226 kg CO₂-Äq./kWh Strom zeigen (abgesehen vom UZ 46- Grünstrom). Die relativ niedrigen Werte von Carbon Footprint.com, der EEA und der E-Control ergeben sich daraus, dass lediglich CO₂-Emissionen, direkte Emissionen, Herkunftsnachweise oder der Erzeugungsmix berücksichtigt werden. Alle anderen Quellen verwenden weitere Bilanzgrenzen, die also den Liefermix und alle wichtigen Treibhausgase sowie auch indirekte Emissionen berücksichtigen. Trotzdem ergibt sich hier noch ein relativ großer Ergebnisbereich von Werten zwischen 0,148 und 0,226 kg CO₂-Äq./kWh, was einer maximalen Abweichung von 0,078 kg CO₂-Äq./kWh entspricht. Die genaue Erhebung aller Annahmen und Berechnungsmethoden der verschiedenen hier betrachteten Quellen zur Erklärung der Unterschiede zwischen Werten mit vermeintlich gleichen Bilanzgrenzen würde jedoch den zeitlichen Rahmen des Projekts sprengen.

Für die Berechnungen wird in weiterer Folge der aktuelle vom OIB publizierte Emissionsfaktor für Strom verwendet. Den Informationen des OIB als Herausgeber der OIB-Richtlinien sowie als Koordinationsplattform der Bundesländer für Bauprodukte und Bautechnik ist grundsätzlich zu vertrauen. Da das OIB über mehrere Jahre hinweg immer wieder aktualisierte Zahlen publiziert und zu erwarten ist, dass dies auch mit gleichbleibender Berechnungsmethode fortgeführt wird, bieten sich diese

Angaben auch im Sinne der zukünftigen Vergleichbarkeit an. Der Wert des OIB liegt zwar im unteren Bereich aller jener für die Berechnungen in Frage kommender Werte, ist aber als über mehrere Jahre gerechneter Mittelwert robuster gegenüber jährlichen Ausreißern. Daher ergibt sich als Annahme für die Emissionsberechnungen aus Stromverbrauch:

- **Emissionsfaktor österreichischer Liefermix: 0,156 kg CO₂-Äq./kWh Strom**

Abb. 39: Recherchierte Emissionsfaktoren für Strom in Österreich (s. Tab. 14 für genaue Quellenangaben zu den einzelnen Datenreihen).



Die Berechnung des TEWI erfolgt anhand folgender Formel (231):

$$TEWI = M \cdot (L \cdot ALR + EOL) \cdot GWP_{100} + L \cdot AEC \cdot EM \quad [kg \text{ CO}_2 - \text{Äq.}] \quad (8)$$

wobei M die Kältemittelfüllmenge, L die Nutzungsdauer der Anlage, ALR die jährliche Leckagerate, EOL die Leckagemenge am Ende der Nutzungsdauer der Anlage, GWP_{100} das 100-jährige Global Warming Potential, AEC der jährliche Stromverbrauch und EM der Emissionsfaktor für Strom ist.

Die Annahmen für die Berechnung sind in Tab. 16 zusammengefasst. Wie ersichtlich, werden vier verschiedene Kältemittel betrachtet und fünf verschiedene Werte für den jährlichen Stromverbrauch herangezogen, die sich aus den fünf SEERs im Kapitel 6.2.3 ergeben. Basis für den jährlichen Kältebedarf bilden auch hier die IDA ICE-Simulationen, von denen das Baselineszenario für Wien 2030 inklusive Nachtlüftung ohne weitere Kühltechnologien (s. Kapitel 6.1.2) verwendet wird. Die Rückrechnung auf den jährlichen Stromverbrauch über den jährlichen Kältebedarf und die fünf SEERs erfolgt anhand:

$$AEC = \frac{Q_{\text{Kälte,jährlich}}}{SEER} \quad [kWh/a] \quad (9)$$

wobei $Q_{\text{Kälte,jährlich}}$ der jährliche Kältebedarf ist, und ergibt so die hier herangezogenen Werte für den jährlichen Stromverbrauch.

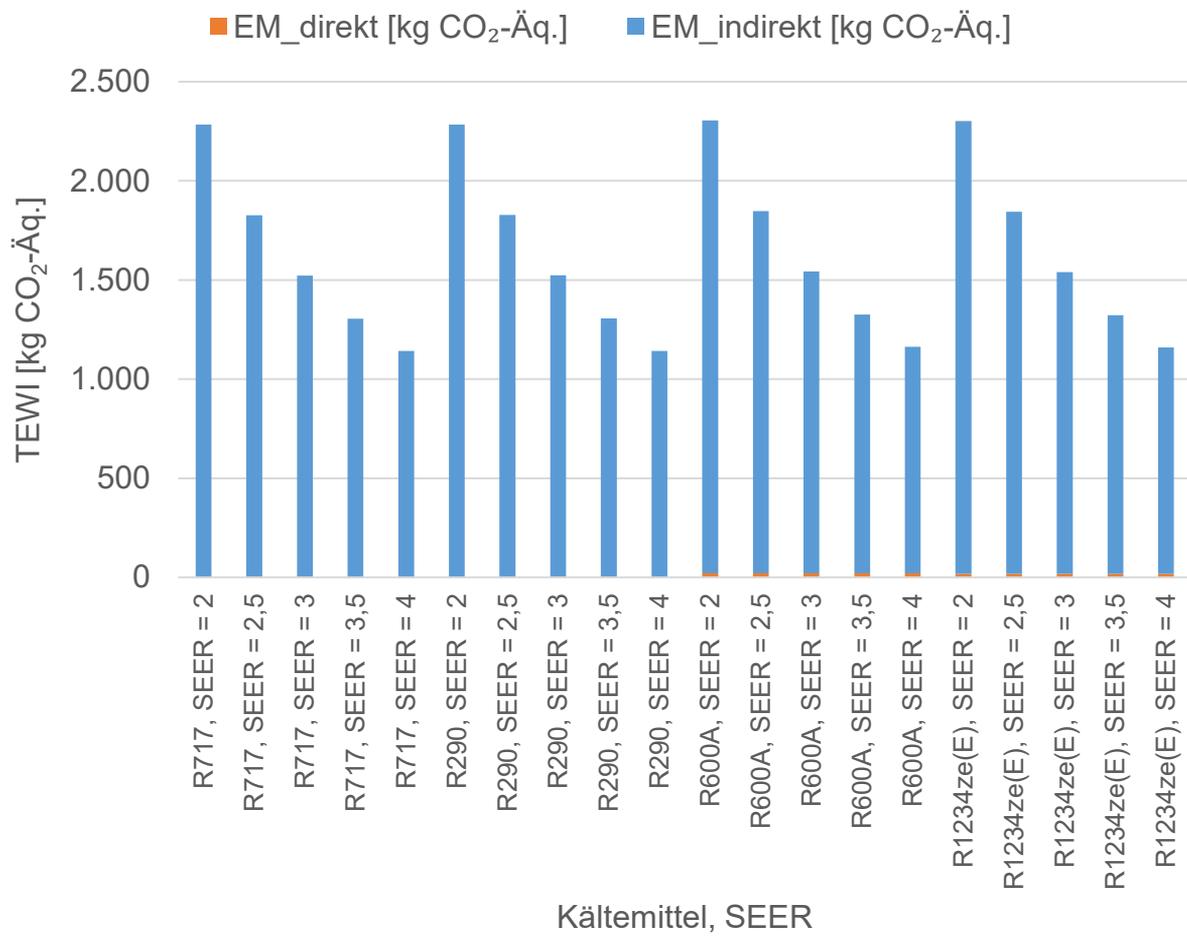
Tab. 16: Die Annahmen für die Berechnung des TEWI einer beispielhaften Kompressionskältemaschine mit 50 kW Kälteleistung.

Variable	Wert	Einheit	Quelle
M_{R717}	50,0	kg	absichtlich beliebig hoch gewählter Wert, da GWP des Kältemittels gleich Null
M_{R290}	50,0	kg	absichtlich beliebig hoch gewählter Wert, da GWP des Kältemittels verschwindend klein
M_{R600A}	20,0	kg	grobe Schätzung seitens des Konsortiums auf Basis einer Internetrecherche nach R600A-Anlagen
$M_{R1234ze(E)}$	12,5	kg	(232)
L	15	a	Annahme basierend auf der in (233) analysierten Literatur
ALR	5	%	eher konservative Schätzung basierend auf (233)
EOL	30	%	Annahme basierend auf der in (233) analysierten Literatur
$GWP_{100,R717}$	0,00	-	(184)

Variable	Wert	Einheit	Quelle
$GWP_{100,R290}$	0,02	-	(185)
$GWP_{100,R600A}$	1,00	-	(183) gibt einen $GWP_{100} \ll 1$ an; da der Effekt bei derart kleinen GWP's relativ gering ist, wird er für die Zwecke dieser Berechnungen mit 1 angenommen
$GWP_{100,R1234ze(E)}$	1,37	-	(185)
AEC_{SEER2}	976,00	kWh/a	s. Kapitel 6.2.3 bzgl. Annahmen zur SEER sowie Gleichung (9)
$AEC_{SEER2,5}$	780,80	kWh/a	s. Kapitel 6.2.3 bzgl. Annahmen zur SEER sowie Gleichung (9)
AEC_{SEER3}	650,67	kWh/a	s. Kapitel 6.2.3 bzgl. Annahmen zur SEER sowie Gleichung (9)
$AEC_{SEER3,5}$	557,71	kWh/a	s. Kapitel 6.2.3 bzgl. Annahmen zur SEER sowie Gleichung (9)
AEC_{SEER4}	488,00	kWh/a	s. Kapitel 6.2.3 bzgl. Annahmen zur SEER sowie Gleichung (9)
EM	0,156	kg CO ₂ -Äq./kWh	(221)

Die Ergebnisse der TEWI-Berechnung sind in Abb. 40 dargestellt. Wie ersichtlich, sind bei Verwendung von R717, R290, R600A und R1234ze(E) die indirekten Emissionen aus dem Stromverbrauch der Anlage der maßgebliche Faktor der Klimawirkung der Kompressionskältemaschine. Der Emissionsfaktor der Stromquelle und die Effizienz der Anlage entscheiden über die über die Nutzungsdauer der Anlage emittierten Treibhausgasemissionen.

Abb. 40: Der TEWI der Beispielanlage abhängig vom Kältemittel und der SEER der Anlage.



7 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Korrektur der operativen Innentemperatur ($\Delta\Theta_o$) durch den Einsatz von Ventilatoren zur persönlichen Kontrolle der Luftgeschwindigkeit durch die Nutzer:innen. (40)	40
Tab. 2: Luftgeschwindigkeit und thermischer Komfort. (41)	40
Tab. 3: Die wichtigsten Merkmale verschiedener Verdichtertypen aus Brunner et al. (74).....	72
Tab. 4: Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften von Technologien zur Verminderung von Wärmeeinträgen in den Innenraum.	120
Tab. 5: Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften von Technologien zur Komfortverbesserung jenseits des physikalischen Wärmeentzugs.	123
Tab. 6: Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften von Technologien zum physikalischen Wärmeentzug aus Innenräumen, Teil 1.....	124
Tab. 7: Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften von Technologien zum physikalischen Wärmeentzug aus Innenräumen, Teil 2.	126
Tab. 8: Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften von Kälteabgabesystemen, Teil 1.	129
Tab. 9: Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften von Kälteabgabesystemen, Teil 2.	130
Tab. 10: Die für die Errechnung der Gütegrade und EERs herangezogenen Kompressionskältemaschinen.....	131
Tab. 11: Eckdaten des für die Simulationen verwendeten Beispielgebäudes im Baselineszenario Wien 2030 inklusive Nachtlüftung.	140
Tab. 12: Datenquellen für Strompreisrecherche.	142
Tab. 13: Kältegestehungskosten für verschiedene Strompreis-SEER-Kombinationen.....	146
Tab. 14: Datenquellen für Stromemissionsfaktorenrecherche.....	149
Tab. 15: Informationen zur Berechnung der Emissionsfaktoren der verschiedenen betrachteten Institutionen.....	150
Tab. 16: Die Annahmen für die Berechnung des TEWI einer beispielhaften Kompressionskältemaschine mit 50 kW Kälteleistung.	154

8 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Die Holzlamellen auf der linken Abbildung können gekippt, aber nicht hochgezogen werden. Das Beschattungssystem prägt das Erscheinungsbild der Fassade; auf der rechten Abbildung sind voll bewegliche Beschattungssysteme in der Fensterebene integriert und können von den Nutzer:innen nach Bedarf verstellt werden. (2)	9
Abb. 2: Einzelne kostengünstige Außenjalousien in einem Gebäude des sozialen Wohnbaus in Rom, Italien (links) und die vollautomatische Beschattungsfassade am Hauptsitz einer Zeitung in Mailand, Italien (rechts). (2).....	13
Abb. 3: Beispiele für gängige Dacheindeckungsmaterialien (obere Reihe, von links nach rechts: Glasfaser-Bitumenschindel (14), Tonziegel (15), Schiefer (16), Stehfalzmetall (1), untere Reihe, von links nach rechts: vor Ort aufgebrauchte Beschichtung (17), Holzschindeln (1), einlagige Membran (18), Bitumenbahn (19)).	20
Abb. 4: Beispiele für gängige Außenwandmaterialien (von links nach rechts: gestrichene Wand (20), verputzte Wand (21), PVC-Verkleidung (22), Metallverkleidung (1)).	20
Abb. 5: Die Glaskuppel am österreichischen Parlament ist aus witterungsabhängig abdunkelndem Sonnenschutzglas gefertigt. (25).....	22
Abb. 6: Komfortlüftungsstrategie in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen (42) (modifiziert). Die rot markierte Zone beschreibt die Umgebungsbedingungen, bei denen sich der Mensch wohl fühlt und keine Maßnahmen zur Konditionierung notwendig sind. Der orange markierte Bereich beschreibt jene Umgebungsbedingungen, bei denen eine Komfortlüftung gut einsetzbar ist. Die anderen Bereiche beziehen sich auf weitere Konditionierungsmaßnahmen.	42
Abb. 7: Beispiele für PCS mit Heiz- und/oder Kühlfunktion: beheizbarer/kühlbarer Stuhl, Fußwärmer, Tischventilator (44).	45
Abb. 8: Psychrometrisches Diagramm der direkten Verdunstungskühlung (oben) und des zweistufigen indirekten/direkten Verdunstungskühlers (unten) (1).....	55
Abb. 9: Schematische Darstellung der drei gängigsten Verdunstungskühlprozesse (1).	56
Abb. 10: Indirekte Verdunstungskühlung in der Wärmerückgewinnung.....	57
Abb. 11: Hauptkomponenten einer Kompressionskältemaschine.....	66
Abb. 12: Beispiel für einen am Dach installierten luftgekühlten Kaltwassersatz, der mehrere Fan Coil Units mit Kälte versorgt.	67
Abb. 13: Spezifische Investitionskosten am Markt verfügbarer Kältemaschinen (94).....	74
Abb. 14: Funktionsprinzip einer Adsorptionskältemaschine (1) (modifiziert).	79

Abb. 15: Beispiel für eine Adsorptionskältemaschine zur Kühlung der Oberflächentemperatur von PV-Paneelen (1).	81
Abb. 16: Nutzung des von PV/T-Paneelen erzeugten Warmwassers durch Adsorptionskältemaschinen (102).	81
Abb. 17: Schematische Darstellung einer einstufigen Absorptionskältemaschine.	84
Abb. 18: Horizontaler geschlossener, in Schleifenform verlegter Sole-Erdwärmeübertrager, der mit einer Kältemaschine gekoppelt ist (104) (modifiziert).	87
Abb. 19: Schema einer Single-Split-Anlage (126).	97
Abb. 20: Links: Funktionsprinzip eines passiven Kühlkonvektors (126) (modifiziert). Rechts: Funktionsprinzip eines aktiven Kühlkonvektors (Induktionsgeräts) (126) (modifiziert). VL = Kaltwasservorlauf, RL = Kaltwasserrücklauf, V = Ventil, D = Düse, PRI = Primärluft, SEK = Sekundärluft, ZUL = Zuluft, WÜ = Wärmeübertrager.	98
Abb. 21: Schema für eine Fan Coil Anlage mit Zuluft- und Rücklufteinlass als Teil eines Lüftungssystems (138) (modifiziert).	99
Abb. 22: Beispiel für einen gebläseunterstützten Niedertemperaturheizkörper (142). Auf mittlerer Höhe sind unterhalb der freigelegten Konvektorbleche die integrierten Lüfter zu erkennen.	101
Abb. 23: Ein mit Heizkörpergebläse nachgerüsteter Plattenheizkörper im Versuchsaufbau von Vösa et al. (145).	102
Abb. 24: Beispiel für ein Kühlpaneel (147).	107
Abb. 25: Querschnitte durch Strahlungsflächensysteme: (a) Boden, (b) Decke, (c) Wand und (d) BTA (148) (154).	107
Abb. 26: Psychrometrisches Diagramm der Entfeuchtungsprozesse (1).	112
Abb. 27: Vereinfachte schematische Darstellung einer DEC-Anlage.	114
Abb. 28: Prozessschritte in einer DEC-Anlage als Darstellung im Mollier-h-x-Diagramm (172).	114
Abb. 29: Das Kältemaschinenmodell im Simulationsprogramm IPSEpro, hier mit den Einstellungen für den Prüfpunkt A35/W7 der Panasonic 5 kW Aquarea L KIT-ADC05L6E5AN.	133
Abb. 30: Die errechneten Gütegrade für die in den Datenblättern angegebenen Prüfpunkte abhängig von der Verdampfungstemperatur.	134
Abb. 31: Die Veränderung des Gütegrads je Maschine abhängig von der Verdampfungstemperatur (falls mehrere Prüfpunkte angegeben sind – wie ersichtlich, gibt es bei den Daikin-Splitgeräten nur einen Prüfpunkt).	135
Abb. 32: Die EERs aus den Datenblättern der betrachteten Maschinen (mit Kondensationstemperatur 45 °C in blau) und die mithilfe der zuvor errechneten Gütegrade bestimmten EERs (mit Kondensationstemperatur 50 °C in weiß) sowie der sich daraus ergebende Trend der EERs je Kondensationstemperatur.	136

Abb. 33: Die Veränderung der EER je Maschine abhängig von der Verdampfungstemperatur für eine Kondensationstemperatur von 45 °C (aus Datenblättern entnommen).....	137
Abb. 34: Die Veränderung der EER je Maschine abhängig von der Verdampfungstemperatur für eine Kondensationstemperatur von 50 °C (aus Gütegraden errechnet).	138
Abb. 35: Das für die Simulationen verwendete Gebäudemodell in IDA ICE.	140
Abb. 36: Die Stromkosten in Österreich von 2003 bis 2023 für Haushalte, laut verschiedener Quellen (s. Tab. 12 für genaue Quellenangaben zu jeder Datenreihe). Die rot strichlierten horizontalen Linien geben die Annahmen für die Strompreisberechnungen an (niedrig 20 ct./kWh, mittel 30 ct./kWh und hoch 40 ct./kWh).....	144
Abb. 37: Die jährlichen Kältegestehungskosten der Beispielanlage abhängig vom Strompreis und der SEER.....	147
Abb. 38: Die spezifischen Kältegestehungskosten der Beispielanlage abhängig vom Strompreis und der SEER.	148
Abb. 39: Recherchierte Emissionsfaktoren für Strom in Österreich (s. Tab. 14 für genaue Quellenangaben zu den einzelnen Datenreihen).....	153
Abb. 40: Der TEWI der Beispielanlage abhängig vom Kältemittel und der SEER der Anlage.....	156

9 Literaturverzeichnis

- (1) Psomas T, Jaboyedoff P, Zinzi M, Krelling A, Gediz Ilis G, Czarnecki P, Holzer P, Stern P, Breesch H, Bozonnet E, Levinson R, Lee SH, Tootkaboni M, Corrado V, Bogatu D-I, Kazanci OB, Qi D, Kling B, Rzhacek C, Wolf M, Keller T. International Energy Agency EBC Annex 80. Resilient Cooling of Buildings. Technology Profiles Report. Energy in Buildings and Communities Collaboration Programme. Holzer P, Stern P, Czarnecki P, eds. Wien: Institute of Building Research & Innovation, Version September 2023 [unveröffentlicht].
- (2) Zinzi M. ENEA; 2023.
- (3) Austrian Standards International. ÖNORM EN 14501:2021 - Abschlüsse - Thermischer und visueller Komfort - Leistungsanforderungen und Klassifizierung. 2021.
- (4) Hoffmann S, Kheybari AG. Untersuchungen zum sommerlichen Wärmeschutz – Teil 2: Vergleich zwischen Modellierung mit Abminderungsfaktor (F_C -Faktor) und bidirektionalem Ansatz (BSDF-Methode). Bauphysik. 2021; 43: 87–99. doi:10.1002/bapi.202100005
- (5) Bundesverband Sonnenschutztechnik. Den Sonnenschutz richtig planen. Eine Information der Sonnenschutzindustrie zum Gesamtenergieeintrag von Fenstern in Kombination mit aussen- oder innenliegendem Sonnenschutz. 2020.
- (6) Duzia T. Vergleich der Abminderungsfaktoren des Sonnenschutzes nach DIN 4108-2. Baunetz Wissen. Sommerlicher Wärmeschutz: Nachweis und Berechnung. <https://www.baunetzwissen.de/bauphysik/fachwissen/waermeschutz/sommerlicher-waermeschutz-nachweis-und-berechnung-4406355/gallery-1/1> [24 January 2024]
- (7) Austrian Standards International. ÖNORM EN ISO 52022-3:2018 - Energieeffizienz von Gebäuden - Wärmetechnische, solare und tageslichttechnische Eigenschaften von Bauteilen und Bauelementen - Teil 3: Detailliertes Berechnungsverfahren zur Ermittlung der solaren und lichttechnischen Eigenschaften von Sonnenschutz in Kombination mit Verglasungen (ISO 52022-3:2017). 2018.
- (8) International Organization for Standardization. ISO 16818:2008 - Building environment design — Energy efficiency — Terminology. 2008.
- (9) Austrian Standards. ÖNORM H 6040: Berechnung der sensiblen und latenten Kühllast sowie der sommerlichen Temperaturgänge von Räumen und Gebäuden - (Nationale Ergänzungen zu ÖNORM EN 15255 und ÖNORM EN ISO 13791). 2012.
- (10) Mayrhofer L, Müller A, Bügelmayer-Blaschek M, Malla A, Kranzl L. Modelling the effect of passive cooling measures on future energy needs for the Austrian building stock. Energy and Buildings. 2023; 296: 113333.
- (11) Holzer P, Stern P, Akander J, Ai Z, Arens E, Arghand T, Attia S, Bogatu D-I, Breesch H, Cehlin M, Chiesa G, Chtioui F, Elnagar E, Hayati A, Heiselberg P, Javed S, Kazanci O, Kolokotroni M, Lemort V, Levinson R, Zinzi M. International Energy Agency EBC Annex 80 - Resilient Cooling of Buildings - State of the Art Review. 2022.
- (12) CRRC. Cool Roof Rating Council. 2023. <http://coolroofs.org/> [20 September 2023]

- (13) Wu Y, Zhao H, Sun H, Duan M, Lin B, Wu S. A review of the application of radiative sky cooling in buildings: Challenges and optimization. *Energy Conversion and Management*. 2022; 265: 115768. doi:10.1016/j.enconman.2022.115768
- (14) FASTILY. Shingle Roof. 2017.
- (15) Loadmaster. 'Spanish style' red ceramic roof tiles in Texas. 2008.
- (16) Monsyn. Slate roof at St Beuno's Church, Trefdraeth, nr Bodorgan, Ynys Mon, Wales. 2018.
- (17) Pxfuel. Roof Coating. 2023. <https://www.pxfuel.com/en/free-photo-ohrse> [20 September 2023]
- (18) Walmart. White roof and skylights on Las Vegas, Nev. Walmart. 2008.
- (19) Wald1siedel. Bitumen SchweißbahnenFlämmenAufbringen. 2016.
- (20) Pxfuel. building, facade, windows, wall, exterior, yellow, painted, pattern, home, house | Pxfuel. 2023. <https://www.pxfuel.com/en/free-photo-xchza> [20 September 2023]
- (21) Pxfuel. window, wall, whitewashed, flowers, barrel, exterior, house, residence, stucco, building. 2023. <https://www.pxfuel.com/en/free-photo-jjmuf> [20 September 2023]
- (22) Rockwood P. Vinyl Siding. 2011.
- (23) Austrian Standards International. ÖNORM EN ISO 52016-3:2022 - Energieeffizienz von Gebäuden - Energiebedarf für Heizung und Kühlung, Innentemperaturen sowie fühlbare und latente Heizlasten - Teil 3: Berechnungsverfahren für adaptive Elemente der Gebäudehülle (ISO/DIS 52016-3:2022). 2022.
- (24) Liu X, Wu Y. A review of advanced architectural glazing technologies for solar energy conversion and intelligent daylighting control. *ARIN*. 2022; 1: 10. doi:10.1007/s44223-022-00009-6
- (25) oekastatic.orf.at. 664595_bigpicture_229103_glaskuppel.jpg.
- (26) British Fenestration Rating Council. <https://www.bfrc.org/> [29 September 2023]
- (27) International Organization for Standardization. ISO 10292:1994, Glass in building — Calculation of steady-state U values (thermal transmittance) of multiple glazing. 1994.
- (28) Matzanetz P. Dimmbare Glaskuppel fürs Parlament. *Journal Architektur/Wettbewerbe*. : 9.
- (29) Zeoli AS, Lemort V. Passive cooling techniques to improve resilience of nZEBs in Belgium. CLIMA 2022 conference. 2022; . doi:10.34641/clima.2022.372
- (30) Loncour X, Deneyer A, Blasco M, Flamant G, Wouters P. Energy conservation in buildings and community systems programme. Contributed Report 03: Ventilated Double Skin Façades: Classification & illustration of facade concepts. Brussels: AIVC, IEA; 2005.
- (31) Srisamranrungruang T, Hiyama K. Balancing of natural ventilation, daylight, thermal effect for a building with double-skin perforated facade (DSPF). *Energy and Buildings*. 2020; 210: 109765. doi:10.1016/j.enbuild.2020.109765

- (32) Barbosa S, Ip K. Perspectives of double skin façades for naturally ventilated buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014; 40: 1019–29. doi:10.1016/j.rser.2014.07.192
- (33) Radić M, Brković Dodig M, Auer T. Green Facades and Living Walls—A Review Establishing the Classification of Construction Types and Mapping the Benefits. *Sustainability*. 2019; 11: 4579. doi:10.3390/su11174579
- (34) Kraus F, Fritthum R, Robausch E, Scharf B, Preiss J, Enzi V, Steinbauer G, Oberbichler C, Lichtblau A, Haas S, Dyk G, Korjenic A, Tudiwer D, Jenser L. *Leitfaden Fassadenbegrünung*. Stadt Wien; 2019.
- (35) Kazemi M, Courard L, Attia S. Water permeability, water retention capacity, and thermal resistance of green roof layers made with recycled and artificial aggregates. *Building and Environment*. 2023; 227: 109776. doi:10.1016/j.buildenv.2022.109776
- (36) Berliner Regenwasseragentur. Fassadenbegrünung. <https://regenwasseragentur.berlin/massnahmen/fassadenbegruenung/#section-kosten> [12 March 2024]
- (37) Mann G, Mollenhauer F. GRÜNSTATTGRAU-Fachinformation "Positive Wirkungen von Gebäudebegrünungen (Dach-, Fassaden- und Innenraumbegrünung)". Wien, Berlin: BuGG, GRÜNSTATTGRAU; 2021.
- (38) Raji B, Tenpierik MJ, van den Dobbelsteen A. The impact of greening systems on building energy performance: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015; 45: 610–23.
- (39) Clementschitsch L, Belazzi T, Scharf B, Berger A, Kogler M, Hammer R, Holzer P, Türk A, Formayer H, König B, Haluza D, Schaffernicht S. New Options for Resilient Measures for human health and well-being in the construction industry under climate change in Austria. *Publizierbarer Endbericht*. bauXund forschung und beratung gmbh, Green4Cities GmbH, Institute of Building Research & Innovation ZT-GmbH, Universität für Bodenkultur Wien, Medizinische Universität Wien; 2022.
- (40) Austrian Standards International. ÖNORM EN 16798-1:2019 - Energetische Bewertung von Gebäuden - Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik - Modul M1-6. 01.11.20219.
- (41) Lechner N. *Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects*. John Wiley & Sons; 2014.
- (42) Givoni B. *Climate considerations in building and urban design*. New York: Van Nostrand Reinhold; 1998.
- (43) ANSI/ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 216-2020 - Methods of Test for Determining Application Data of Overhead Circulator Fans. 2020. <https://webstore.ansi.org/standards/ashrae/ansiashraestandard2162020> [29 September 2023]
- (44) Ghahramani A, Galicia P, Lehrer D, Varghese Z, Wang Z, Pandit Y. Artificial Intelligence for Efficient Thermal Comfort Systems: Requirements, Current Applications and Future Directions. *Frontiers in Built Environment*. 2020; 6: 49.

- (45) Shinoda J, Bogatu D, Watanabe F, Kaneko Y, Olesen BW, Kacanzi B. Resiliency and Performance Evaluation Indicators of Personalized Environmental Control Systems (PECS). In. 2023.
- (46) Schwab R, Grün G. Ableitung eines messbaren Klimasummenmaßes für den Vergleich des Fahrzeugklimas konventioneller und elektrischer Fahrzeuge. Berlin: FAT; 2013.
- (47) Watanabe S, Melikov AK, Knudsen GL. Design of an individually controlled system for an optimal thermal microenvironment. *Building and Environment*. 2010; 45: 549–58. doi:10.1016/j.buildenv.2009.07.009
- (48) Zhang H, Arens E, Zhai Y. A review of the corrective power of personal comfort systems in non-neutral ambient environments. *Building and Environment*. 2015; 91: 15–41. doi:10.1016/j.buildenv.2015.03.013
- (49) He Y, Li N, Linxuan Z, Wang K, Zhang W. Thermal comfort and energy consumption in cold environment with retrofitted Huotong (warm-barrel). *Building and Environment*. 2016; 112. doi:10.1016/j.buildenv.2016.11.044
- (50) Luo M, Arens E, Zhang H, Ghahramani A, Wang Z. Thermal comfort evaluated for combinations of energy-efficient personal heating and cooling devices. *Building and Environment*. 2018; 143: 206–16. doi:10.1016/j.buildenv.2018.07.008
- (51) Melikov AK, Cermak R, Majer M. Personalized ventilation: evaluation of different air terminal devices. *Energy and Buildings*. 2002; 34: 829–36. doi:10.1016/S0378-7788(02)00102-0
- (52) Melikov AK. COVID-19: Reduction of airborne transmission needs paradigm shift in ventilation. *Build Environ*. 2020; 186: 107336. doi:10.1016/j.buildenv.2020.107336
- (53) Hoyt T, Arens E, Zhang H. Extending air temperature setpoints: Simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings. *Building and Environment*. 2015; 88: 89–96. doi:10.1016/j.buildenv.2014.09.010
- (54) Madsen TL, Saxhof B. Unconventional Method for Reduction of the Energy Consumption for Heating of Buildings. vol 4 pp 623–633. 1980; .
- (55) Austrian Standards International. ÖNORM EN ISO 52016-1:2018 - Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung, Innentemperaturen sowie der Heiz- und Kühllast in einem Gebäude oder einer Gebäudezone - Teil 1: Berechnungsverfahren (ISO 52016-1:2017). 01.02.20218.
- (56) International Organization for Standardization. ISO 13612-2:2014, Heating and cooling systems in buildings — Method for calculation of the system performance and system design for heat pump systems — Part 2: Energy calculation. 2014.
- (57) Davis Energy Group. Development of an improved two-stage evaporative cooling system, California Energy Commission. 2004.
- (58) Amer O, Boukhanouf R, Ibrahim H. A Review of Evaporative Cooling Technologies. *International Journal of Environmental Science and Development*. 2015; 6: 111. doi:10.7763/IJESD.2015.V6.571
- (59) Cuce PM, Riffat S. A state of the art review of evaporative cooling systems for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016; 54: 1240–9. doi:10.1016/j.rser.2015.10.066

- (60) Alshenaifi MA, Sharples S, Abuhussain MA, Alotaibi BS, Aldersoni AA, Abdelhafez MHH. Integrating a passive draught evaporative cooling tower into a Saudi house - The impact of climatic conditions on PDEC performance. *Building and Environment*. 2023; 242: 110497.
- (61) Anisimov S, Pandelidis D, Jedlikowski A. Performance study of the indirect evaporative air cooler and heat recovery exchanger in air conditioning system during the summer and winter operation. *Energy*. 2015; 89: 205–25. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.070>
- (62) ANSI/ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 169-2013 - Climatic Data for Building Design Standards. 2020; .
- (63) Zhao D, Aili A, Zhai Y, Xu S, Tan G, Yin X, Yang R. Radiative sky cooling: Fundamental principles, materials, and applications. *Applied Physics Reviews*. 2019; 6: 021306. doi:10.1063/1.5087281
- (64) Bourdakis E, Olesen BW, Grossule F. Night time cooling by ventilation or night sky radiation combined with in-room radiant cooling panels including Phase Change Materials. In. Madrid; 2015.
- (65) Hu M, Zhao B, Suhendri, Ao X, Cao J, Wang Q, Riffat S, Su Y, Pei G. Applications of radiative sky cooling in solar energy systems: Progress, challenges, and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 160: 112304. doi:10.1016/j.rser.2022.112304
- (66) Eicker U, Dalibard A. Photovoltaic–thermal collectors for night radiative cooling of buildings. *Solar Energy*. 2011; 85: 1322–35. doi:10.1016/j.solener.2011.03.015
- (67) Hu M, Pei G, Wang Q, Li J, Wang Y, Ji J. Field test and preliminary analysis of a combined diurnal solar heating and nocturnal radiative cooling system. *Applied Energy*. 2016; 179: 899–908. doi:10.1016/j.apenergy.2016.07.066
- (68) Bogatu D-I, Kazanci OB, Olesen BW. A Preliminary Analysis on the Night Cooling Potential of Photovoltaic/thermal (PV/T) Panels for European Cities. *E3S Web Conf*. 2019; 111: 01055. doi:10.1051/e3sconf/201911101055
- (69) Zhang S, Niu J. Cooling performance of nocturnal radiative cooling combined with microencapsulated phase change material (MPCM) slurry storage. *Energy and Buildings*. 2012; 54: 122–30. doi:10.1016/j.enbuild.2012.07.041
- (70) Joubert GD, Dobson RT. Modelling and testing a passive night-sky radiation system. *Journal of Energy in Southern Africa*. 2017; 28: 76–90. doi:10.17159/2413-3051/2017/v28i1a1550
- (71) Pezzutto S, Novelli A, Zambito A, Quaglini G, Miraglio P, Belleri A, Bottecchia L, Gantioler S, Moser D, Riviere P, Etienne A, Stabat P, Berthou T, Kranzl L, Mascherbauer P, Fallahnejad M, Viegand J, Jensen C, Hummel M, Müller A. Cooling Technologies Overview and Market Shares. Part 1 of the study “Renewable Cooling under the Revised Renewable Energy Directive EN-ERC/C1/2018-493”. Brussels: European Commission; 2022.
- (72) Glück B, Busweiler U, Trogisch A. Thermisch aktive Raumflächen. In: Albers K-J, ed. *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte* 81st ed. Kleinaitingen: ITM InnoTech Medien GmbH; 2022; 1742–65.
- (73) Zhang C, Kazanci OB, Levinson R, Heiselberg P, Olesen BW, Chiesa G, Sodagar B, Ai Z, Selkowitz S, Zinzi M, Mahdavi A, Teufel H, Kolokotroni M, Salvati A, Bozonnet E, Chtioui F, Salagnac P, Rahif R, Attia S, Lemort V, Elnagar E, Breesch H, Sengupta A, Wang LL, Qi D, Stern P, Yoon N, Bogatu D-I, Rupp RF, Arghand T, Javed S, Akander J, Hayati A, Cehlin M, Sayadi S, Forghani S,

- Zhang H, Arens E, Zhang G. Resilient cooling strategies – A critical review and qualitative assessment. *Energy and Buildings*. 2021; 251: 111312. doi:10.1016/j.enbuild.2021.111312
- (74) Brunner A, Kriegers M, Prochaska V, Tillenkamp F. Klimakälte heute. Kluge Lösungen für ein angenehmes Raumklima. Urtenen-Schönbühl: Die Planer - SWKI; 2021.
- (75) Freiherr M, Summerer F. Adiabate Luftabkühlung im Vergleich zu befeuchteten Wärmetauschern. Teil 1 - Grundlagen und Vergleich. Teil 2 - Praktische Umsetzung und Regelung. *IHK FACHJOURNAL*. 2015; .
- (76) Nickolay M. Rückkühlsysteme im Vergleich. Wirtschaftlichkeit und CO2-Bilanz. *KKA Kälte Klima Aktuell*. 2012; .
- (77) Hainbach C. Kältetechnik. In: Grote K-H, Bender B, Gröhlich D, eds. *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 25th ed*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg; 2018; 872–97.
- (78) Reinhart A, Arnemann M. Kältetechnik. In: Albers K-J, ed. *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte 81st ed*. Kleinaitingen: ITM InnoTech Medien GmbH; 2022; 2397–556.
- (79) IKZ. Eine Wärmepumpe, vier Wärmequellen. *IKZ Sanitär Heizung Klima. Planung, Bau und Betrieb*. 2023. <https://www.ikz.de/detail/news/detail/eine-waermepumpe-vier-waermequellen/> [6 February 2024]
- (80) Weber G. Kälte- und Klimasystemtechnik. Lehrbuch zur Industriekälte. Berlin, Offenbach: VDE Verlag; 2014.
- (81) Engelhorn HR. Kälteanlagen. In: Hörner B, Casties M, eds. *Handbuch der Klimatechnik 7th ed*. Berlin, Offenbach: VDE Verlag; 2018.
- (82) Schmidt D, Goetschkes C, Pollerberg C. Kältetechnik in Deutschland. Steckbriefe zu Kältetechnologien. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, ed. Oberhausen: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT; 2020.
- (83) Austrian Standards International. ÖNORM EN 14511:2023 - Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen für die Raumbeheizung und -kühlung und Prozess-Kühler mit elektrisch angetriebenen Verdichtern. 2023.
- (84) International Organization for Standardization. ISO 5151:2017 - Non-ducted air conditioners and heat pumps. Testing and rating for performance. 2017.
- (85) International Organization for Standardization. ISO 13253:2017 - Ducted air-conditioners and air-to-air heat pumps. Testing and rating for performance. 2017.
- (86) International Organization for Standardization. ISO 15042:2017 - Multiple split-system air conditioners and air-to-air heat pumps. Testing and rating for performance. 2017.
- (87) International Organization for Standardization. ISO 13256:2021 - Water-source heat pumps. Testing and rating for performance. 2021.
- (88) Austrian Standards International. ÖNORM EN 14825:2023 - Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Raumbeheizung

und -kühlung - Prüfung und Leistungsbemessung unter Teillastbedingungen und Berechnung der jahreszeitbedingten Leistungszahl. 2023.

- (89) International Organization for Standardization. ISO 16358-1:2013 - Air-cooled air conditioners and air-to-air heat pumps. Testing and calculating methods for seasonal performance factors. Part 1: Cooling seasonal performance factor. 2013.
- (90) Holuj B, Park WY, Shah N, Horowitz N, Hillbrand A. Model Regulation Guidelines September 2019. Energy-Efficient and Climate-Friendly Air Conditioners. United Nations Environment Programme - United for Efficiency Initiative; 2019.
- (91) Mavandad S, Malinowski M. World's Best MEPS: Assessing Top Energy Efficiency Standards for Priority Appliances. Washington: CLASP; 2023.
- (92) Austrian Standards International. ÖNORM EN 378-1:2021 - Kälteanlagen und Wärmepumpen - Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen - Teil 1: Grundlegende Anforderungen, Begriffe, Klassifikationen und Auswahlkriterien. 2021.
- (93) Simader G, Rakos C. Klimatisierung, Kühlung und Klimaschutz: Technologien, Wirtschaftlichkeit und CO₂- Reduktionspotenziale. Materialband. Stand der Technologie, Wirtschaftlichkeit, Potenziale, Emissionen und Fallstudien. Wien: Austrian Energy Agency; 2005.
- (94) Krottil R. Klimakälteerzeugung aus Wärme. Sorptionstechnik. In. Energy for future - Wege zur Klimaneutralität. Graz: TU Graz; 2020.
- (95) BMK. Lärmregelungen zu Luftwärmepumpen. Lärminfo.at. Lärmschutz für Österreich. 2021. <https://www.laerminfo.at/ueberlaerm/laermquellen/luftwaermepumpen.html> [5 February 2024]
- (96) Müller T. Klimaanlage Lautstärke: Das ist für Ihr Außengerät erlaubt. FOCUS online. 2023. https://praxistipps.focus.de/klimaanlage-lautstaerke-das-ist-fuer-ihr-aussengeraet-erlaubt_129769 [6 February 2024]
- (97) KLIVATEC GmbH. Wie hoch ist die Klimaanlage-Lautstärke wirklich? <https://klivatec.de/wie-hoch-ist-die-klimaanlagen-lautstarke-wirklich/> [6 February 2024]
- (98) KELAG-Kärntner Elektrizitäts-Aktiengesellschaft. Wie laut sind Luft-Wärmepumpen wirklich? kelag ENERGIE BLOG. 2022. <https://blog.kelag.at/waermepumpe-lautstaerke> [6 February 2024]
- (99) Austrian Standards International. ÖNORM EN 12309:2022 - Gasbefeuerte Sorptions-Geräte für Heizung und/oder Kühlung mit einer Nennwärmebelastung nicht über 70 kW. 2023.
- (100) Gediz Ilis G. Influence of new adsorbents with isotherm Type V on performance of an adsorption heat pump. Energy. 2017; 119: 86–93. doi:10.1016/j.energy.2016.12.053
- (101) Schindler W. Adsorptionskältemaschinen auf dem Vormarsch. Standardanwendungen beweisen ihre Praxistauglichkeit. KKA Kälte Klima Aktuell. 2012; .
- (102) Aneli S, Gagliano A, Tina GM, Gediz Ilis G, Demir H. Effectiveness and constraints of using PV/Thermal collectors for heat-driven chillers. Applied Thermal Engineering. 2022; 210: 118330. doi:10.1016/j.applthermaleng.2022.118330

- (103) Baehr HD, Kabelac S. Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen. 15th ed. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg; 2012.
- (104) U.S. Department of Energy. Geothermal Heat Pumps. Energy.gov. 2023. <https://www.energy.gov/energysaver/geothermal-heat-pumps> [29 September 2023]
- (105) Kaiserstrand Tourismus GmbH & Co KG. Heizen und kühlen mit Seewasser. Seehotel am Kaiserstrand. <https://www.kaiserstrand.at/de/blog/heizen-und-kuehlen-mit-seewasser/> [13 March 2024]
- (106) TGA. Nachhaltiges Heizen und Kühlen mit Donauwasser. 2022. <https://tga.at/errichten/nachhaltiges-heizen-und-kuehlen-mit-donauwasser/> [13 March 2024]
- (107) Austrian Standards International. ÖNORM EN ISO 17628 - Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Geothermische Versuche - Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Boden und Fels unter Anwendung von Erdwärmesonden (ISO 17628:2015). 2015.
- (108) Wessolek G, Bohne K, Trinks S. Validation of Soil Thermal Conductivity Models. International Journal of Thermophysics. 2023; 44: 20. doi:<https://doi.org/10.1007/s10765-022-03119-5>
- (109) ASTM. ASTM D5334-22a - Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Rock by Thermal Needle Probe Procedure. 2022. <https://www.astm.org/d5334-22a.html> [29 September 2023]
- (110) VDI. VDI 4640 Blatt 1 - Thermische Nutzung des Untergrunds - Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. 2010.
- (111) SIA. SIA 384/6 / 2021 D - Erdwärmesonden. 2021. https://shop.sia.ch/normenwerk/architekt/384-6_2021_d/D/Product [29 September 2023]
- (112) Stylianou II, Florides G, Tassou S, Tsiolakis E, Christodoulides P. Methodology for estimating the ground heat absorption rate of Ground Heat Exchangers. Energy. 2017; 127: 258–70. doi:10.1016/j.energy.2017.03.070
- (113) Soltani M, M. Kashkooli F, Dehghani-Sanij AR, Kazemi AR, Bordbar N, Farshchi MJ, Elmi M, Gharali K, B. Dusseault M. A comprehensive study of geothermal heating and cooling systems. Sustainable Cities and Society. 2019; 44: 793–818. doi:10.1016/j.scs.2018.09.036
- (114) Santamouris M, Kolokotsa D. Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art. Energy and Buildings. 2013; 57: 74–94. doi:10.1016/j.enbuild.2012.11.002
- (115) Eicker U, Thumm F. Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit oberflächennaher Geothermie für das Heizen und Kühlen von Nichtwohngebäuden. Bauphysik. 2012; 34: 11–8. doi:10.1002/bapi.201200003
- (116) Huber H, Schöfmann P, Zottl A. Wärme!pumpen zur energieeffizienten Wärmeversorgung. Technologieleitfaden Wärmepumpen. Wien: Magistrat der Stadt Wien. Magistratsabteilung 20 - Energieplanung; 2014.
- (117) Dietmar A, Markiewicz R, Pammer M. Thermische Grundwassernutzung zur Heizung und Kühlung des neuen Campus WU Wien – Ein innovatives und nachhaltiges "Green Building"-Projekt. Baukongress 2016; 2016 29.04 [27 March 2024]; Wien.

- (118) Chtioui F, Baroux J-P, Bozonnet E, Salagnac P. Étude expérimentale à échelle réduite d'un bassin de toit -Performance de rafraîchissement en climat océanique. Congrès Français de Thermique, May 2022, Valenciennes, France. 2022; . doi:10.25855/SFT2022-013
- (119) Sharifi A, Yamagata Y. Roof ponds as passive heating and cooling systems: A systematic review. *Applied Energy*. 2015; 160: 336–57. doi:10.1016/j.apenergy.2015.09.061
- (120) Stadt Wien. Erforderliche Einreichunterlagen zur Erlangung der wasserrechtlichen Bewilligung für Anlagen zur thermischen Nutzung des Grundwassers (Wasser-Wasser-Wärmepumpenanlagen und -Kältemaschinen). *Wiener Gewässer*. 2023.
- (121) Niederbrucker R, Haslinger E. Erdwärme! voraus. Technologieleitfaden Erdwärme. Wien: Magistrat der Stadt Wien. Magistratsabteilung 20 - Energieplanung; 2016.
- (122) Aschauer J. Merkblatt Heizen und Kühlen mit Grundwasser. Amt der Oö. Landesregierung; 2021.
- (123) Amt der Kärntner Landesregierung. Merkblatt Grundwasserwärmepumpe. 2018.
- (124) Gewässerschutz, Land Salzburg. Leitfaden Grundwasser-Wärmepumpen (Reihe Grundwasserschutz, Band 21, 2. Aufl.). 2017.
- (125) Trogisch A. Grundlagen der Lufttechnik. In: Albers K-J, ed. Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte 81st ed. Kleinaitingen: ITM InnoTech Medien GmbH; 2022; 1491–515.
- (126) Trogisch A, Thiel P. Systeme. In: Albers K-J, ed. Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte 81st ed. Kleinaitingen: ITM InnoTech Medien GmbH; 2022; 1531–59.
- (127) Hartmann T. Wohngebäude. In: Albers K-J, ed. Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte 81st ed. Kleinaitingen: ITM InnoTech Medien GmbH; 2022; 1949–58.
- (128) Austrian Standards. ÖNORM B 8110-5:2019 03 15: Wärmeschutz im Hochbau - Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile. 2019.
- (129) Austrian Standards. Normenentwurf ÖNORM B 8110-5:2023 10 01: Wärmeschutz im Hochbau - Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile. 2023.
- (130) Austrian Standards International. ÖNORM H 6038:2020 02 15: Lüftungstechnische Anlagen - Kontrollierte mechanische Be- und Entlüftung von Wohnungen mit Wärmerückgewinnung - Planung, Ausführung, Inbetriebnahme, Betrieb und Wartung. 2020.
- (131) Trogisch A. Freie Lüftung. In: Albers K-J, ed. Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte 81st ed. Kleinaitingen: ITM InnoTech Medien GmbH; 2022; 1516–30.
- (132) Trogisch A, Thiel P, Mörwald A, Kaup C, Heidenreich R, Bremer C, Achenbach K, Makulla D, Schiller H, Mai R, Seifert J, Kandzia C. Maschinelle Lüftung (RLT-Anlagen). In: Albers K-J, ed. Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte 81st ed. Kleinaitingen: ITM InnoTech Medien GmbH; 2022; 1531–741.

- (133) Kaup C. Luftherhitzer und Luftkühler. In: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte 81st ed. Kleinaitingen: ITM InnoTech Medien GmbH; 2022; 1574–89.
- (134) Bestandteile von Lüftungsanlagen. Baunetz Wissen. <https://www.baunetzwissen.de/gebaeu-detechnik/fachwissen/lueftung/bestandteile-von-lueftungsanlagen-2473103>
- (135) Kapferer R, Greml A, Höfler K, Leitzinger W, Suschek-Berger J. ENERGIE DER ZUKUNFT. Endbericht. Evaluierung von zentralen bzw. semizentralen Wohnraumlüftungen im Mehrfamilienhausbereich und Erstellung von Qualitätskriterien bzw. eines Planungsleitfadens. 2010.
- (136) Lilling T. BTU-Rechner: Welche Klimaanlage für welche Raumgröße? BLITZRECHNER.de. 2023. <https://www.blitzrechner.de/klimaanlage-dimensionierung/> [24 January 2024]
- (137) Latif H, Hultmark G, Rahnama S, Maccarini A, Afshari A. Performance evaluation of active chilled beam systems for office buildings – A literature review. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022; 52: 101999.
- (138) Azad AS, Rakshit D, Wan MP, Babu S, Sarvaiya JN, Kumar DEVSK, Zhang Z, Lamano AS, Krishnasayee K, Gao CP, Valliappan S, Goh A, Seoh A. Evaluation of thermal comfort criteria of an active chilled beam system in tropical climate: A comparative study. Building and Environment. 2018; 145: 196–212.
- (139) Thiel P. Büro- und Verwaltungsgebäude. In: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte 81st ed. Kleinaitingen: ITM InnoTech Medien GmbH; 2022; 1958–85.
- (140) Vogel&Noot. E2-Wärmepumpenheizkörper. <https://www.vogelundnoot.com/at/produkte/e2-waermepumpenheizkoerper.htm> [22 January 2024]
- (141) Kermi. Leistungsrechner & Ventilvoreinstellung. <https://www.kermi.com/de/de/raum-klima/fuer-fachpartner/leistungsrechner-ventilvoreinstellung/#/calculator/start> [22 January 2024]
- (142) Vogel&Noot. ULOW-E2 Intelligent low-temperatur radiator. https://www.vogelundnoot.com/int/products/ulow_e2.htm [11 March 2024]
- (143) Hirayama Y. Heat and mass transfer regimes for cooling and dehumidification using chilled water radiators. Cranfield University; 1998.
- (144) Arendt M, Haupt L, Kremonke A, Perschk A, Felsmann C. EnOB: KUEHA - Erprobung und Demonstration einer neuartigen Systemlösung zur sommerlichen Raumkühlung unter besonderer Berücksichtigung von Energieeffizienz und Praxistauglichkeit. Schlussbericht. Dresden: TU Dresden; 2021.
- (145) Vösa K-V, Ferrantelli A, Kurnitski J. Cooling Thermal Comfort and Efficiency Parameters of Ceiling Panels, Underfloor Cooling, Fan-Assisted Radiators, and Fan Coil. Energies. 2022; 15: 4156. doi:<https://doi.org/10.3390/en15114156>
- (146) Zhang C, Kazanci O, Attia S, Levinson R, Lee SH, Holzer P, Salvati A, Machard A, Tootkaboni M, Gaur A, Olesen BW, Heiselberg P. IEA EBC Annex 80 - Dynamic simulation guideline for the performance testing of resilient cooling strategies. 2021.

- (147) Babiak J, Olesen BW, Petráš D. Low Temperature Heating And High Temperature Cooling. Brussels: REHVA; 2009.
- (148) Kazanci O. Low Temperature Heating and High Temperature Cooling in Buildings. 2016.
- (149) Bergia Boccardo L, Kazanci OB, Quesada Allerhand J, Olesen BW. Economic comparison of TABS, PCM ceiling panels and all-air systems for cooling offices. Energy and Buildings. 2019; 205. doi:10.1016/j.enbuild.2019.109527
- (150) Bogatu D-I, Kazanci OB, Olesen BW. An experimental study of the active cooling performance of a novel radiant ceiling panel containing phase change material (PCM). Energy and Buildings. 2021; 243: 110981. doi:10.1016/j.enbuild.2021.110981
- (151) Quesada Allerhand J, Kazanci O, Olesen B. Energy and thermal comfort performance evaluation of PCM ceiling panels for cooling a renovated office room. E3S Web of Conferences. 2019; 111: 03020. doi:10.1051/e3sconf/201911103020
- (152) Quesada Allerhand J, Kazanci O, Olesen B. Investigation of the influence of operation conditions on the discharge of PCM ceiling panels. E3S Web of Conferences. 2019; 111: 03021. doi:10.1051/e3sconf/201911103021
- (153) Olesen BW. Radiant floor cooling systems. Ashrae Journal. 2008; 50: 16–22.
- (154) Olesen BW. Cooling and heating of buildings by activating their thermal mass with embedded hydronic pipe systems. In. Proceedings of CIBSE/ASHRAE joint conference. Dublin; 2000.
- (155) Austrian Standards International. ÖNORM EN ISO 11855-1:2022- Umweltgerechte Gebäudeplanung - Flächenintegrierte Strahlheizungs- und -kühlsysteme - Teil 1: Begriffe, Symbole und Komfortkriterien (ISO 11855-1:2021). 2022.
- (156) Zhao K, Liu X-H, Zhang T, Jiang Y. Performance of temperature and humidity independent control air-conditioning system in an office building. Energy and Buildings. 2011; 43: 1895–903. doi:10.1016/j.enbuild.2011.03.041
- (157) Rhee K-N, Olesen BW, Kim KW. Ten questions about radiant heating and cooling systems. Building and Environment. 2017; 112: 367–81. doi:10.1016/j.buildenv.2016.11.030
- (158) Kessling W, Holst S, Schuler M. Innovative Design Concept for the New Bangkok International Airport, NBIA. Proceedings of the Fourteenth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates, Richardson, TX. 2004; .
- (159) Niu JL, Zhang LZ, Zuo HG. Energy savings potential of chilled-ceiling combined with desiccant cooling in hot and humid climates. Energy and Buildings. 2002; 34: 487–95. doi:10.1016/S0378-7788(01)00132-3
- (160) Sastry G, Rumsey P. VAV vs. radiant: Side-by-side comparison. ASHRAE J. 2014; 56: 16–24.
- (161) Stetiu C. Energy and peak power savings potential of radiant cooling systems in US commercial buildings. Energy and Buildings. 1999; 30: 127–38. doi:10.1016/S0378-7788(98)00080-2
- (162) Wien Energie. Fernkälte in der Wohnung nachrüsten - geht das so einfach? 2023. <https://www.wienenergie.at/blog/erstmal-fernkaelte-fuer-wohnungen/> [20 December 2023]

- (163) Linz AG. Wie funktioniert Fernkälte? https://www.linzag.at/portal/de/businesskunden/energie/waerme_1/fernkaelte_1/funktion/funktion_fernkaelte_1.html# [20 December 2023]
- (164) Wien Energie. Technische Richtlinie. TR-TAB. Technische Auslegungsbedingungen.
- (165) Wien Energie. Fernkälte. <https://www.wienenergie.at/ueber-uns/unternehmen/energie-klimaschutz/energieerzeugung/fernkaelte/> [20 December 2023]
- (166) Wien Energie. Fernkälte. Ein Produkt der Wien Energie. <https://www.wienenergie.at/business/produkte/kaelte/fernkaelte/> [20 December 2023]
- (167) Linz AG. Linz AG - Kälteversorgung. https://www.linzag.at/portal/de/businesskunden/energie/waerme_1/fernkaelte_1# [20 December 2023]
- (168) Wien Energie. Was sind die Voraussetzungen für eine Fernkälteversorgung? 2023. <https://www.wienenergie.at/faqs/was-sind-die-voraussetzungen-fuer-eine-fernkaelteversorgung/> [22 January 2024]
- (169) ÖGUT. Österreichs Städte mit Anergie heizen und kühlen: Umstellung kostengünstiger als „Weiter wie bisher“ – auch Bohrungen unter Gehsteigen, Straßen und Parks sind möglich. Österreichische Gesellschaft für Umwelt und Technik. 2022. <https://www.oegut.at/de/news/2020/08/pa-anergie-in-oesterreichs-staedten.php> [24 January 2024]
- (170) Paschotta R. Anergienetz. RP-Energie-Lexikon. 2023. <https://www.energie-lexikon.info/anergienetz.html> [24 January 2024]
- (171) Lindorfer A, Cervený M. Anergienetz Geblergasse. Pilotprojekt Smart Block Geblergasse, 1170 Wien. Wien: BMK; 2020.
- (172) Klingenburg GmbH. Trocknen und Kühlen ohne Kältemaschine. <http://www.klingenburg.de/wissen/dec-trocknen-und-kuehlen-ohne-kaeltemaschine/> [12 January 2024]
- (173) Rafique MM, Gandhidasan P, Bahaidarah HMS. Liquid desiccant materials and dehumidifiers – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016; 56: 179–95. doi:10.1016/j.rser.2015.11.061
- (174) Rafique MM, Gandhidasan P, Rehman S, Al-Hadhrami LM. A review on desiccant based evaporative cooling systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015; 45: 145–59. doi:10.1016/j.rser.2015.01.051
- (175) Katejanekarn T, Kumar S. Performance of a solar-regenerated liquid desiccant ventilation pre-conditioning system. *Energy and Buildings*. 2008; 40: 1252–67. doi:10.1016/j.enbuild.2007.11.005
- (176) Qi R, Dong C, Zhang L-Z. A review of liquid desiccant air dehumidification: From system to material manipulations. *Energy and Buildings*. 2020; 215: 109897. doi:10.1016/j.enbuild.2020.109897
- (177) International Organization for Standardization. ISO 817:2014 - Refrigerants. Designation and safety classification. 2014.
- (178) ANSI/ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 34-2022 - Designation and Safety Classification of Refrigerants. 2022.

- (179) IIR/IIF. 48th Informatory Note on Refrigeration Technologies. Low-GWP Refrigerants: Status and Outlook. Paris: IIR/IIF; 2022.
- (180) European Parliament. Regulation (EU) 2024/573 of the European Parliament and of the Council of 7 February 2024 on fluorinated greenhouse gases, amending Directive (EU) 2019/1937 and repealing Regulation (EU) No 517/2014. Regulation (EU) 2024/573. Mar 11, 2024.
- (181) ECHA. ECHA publishes PFAS restriction proposal. 2023. <https://echa.europa.eu/-/echa-publishes-pfas-restriction-proposal> [29 January 2024]
- (182) Regierungen der Länder Deutschland, Dänemark, Niederlande, Nowegen, Schweden. ANNEX XV RESTRICTION REPORT. PROPOSAL FOR A RESTRICTION. 2. Mar 22, 2023.
- (183) UNEP. Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. 2022 Report of the Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee. 2022 Assessment. 2023 Jänner. Report No.: ISBN: 978-9914-733-93-8.
- (184) Dohmann J. Thermodynamik der Kälteanlagen und Wärmepumpen. Grundlagen und Anwendungen der Kältetechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg; 2016.
- (185) Smith C, Nicholls ZRJ, Armour K, Collins W, Forster P, Meinshausen M, Palmer MD, Watanabe M. The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity Supplementary Material. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews JBR, Maycock TK, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B, eds. Climate Change 2021: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC; 2021.
- (186) Panasonic. Datenblatt: Panasonic Neue Aquarea Generation 'L'. Luft/Wasser-Wärmepumpen. 2023.
- (187) Heliotherm. Datenblatt: Heliotherm. Die Wärmepumpe. Luft-Kompaktwärmepumpe Comfort Compact. 2022.
- (188) Daikin. Datenblatt: Daikin Ururu Sarara Wandgerät FTXZ-N / RXZ-N. 2021.
- (189) Reinhart A, Arnemann M. Kaltdampf-Kompressionskälteprozess. In: Albers K-J, ed. Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte 81st ed. Kleinaitingen: ITM InnoTech Medien GmbH; 2022; 2398–410.
- (190) E-Control. Strompreisentwicklung - Jahresreihen. Tabellarische Darstellung der Entwicklung ab 2016. 2023.
- (191) E-Control. Energiepreis. 2023.
- (192) Statistik Austria. Bruttopreise der wichtigsten Energieträger für den privaten Einsatz - in Euro (Grafik). Energiepreise, -steuern. 2023. <https://www.statistik.at/statistiken/energie-und-umwelt/energie/energiepreise-steuern> [31 October 2023]
- (193) EU Eurostat. Electricity price statistics tables and graphs. Statistics_Explained_figures_for_Elec_2023S1-v5.xlsx. 2023.

- (194) EU Eurostat. File:Electricity prices for household consumers, first half 2023 23-10-2023.png. 2023. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Electricity_prices_for_household_consumers,_first_half_2023_23-10-2023.png [31 October 2023]
- (195) EU Eurostat. Electricity prices for domestic consumers - bi - annual data (until 2007) (online data code: nrg_pc_204_h). 2021.
- (196) EU Eurostat. Electricity prices for household consumers - bi - annual data (from 2007 onwards) (online data code: nrg_pc_204). 2023.
- (197) E-Control. Gesamtpreis 1 kWh Strom bei unterschiedlichem Jahresverbrauch (Stand Jänner 2023). Was kostet eine kWh Strom? 2023. <https://www.e-control.at/konsumenten/strom/strompreis/was-kostet-eine-kwh> [5 June 2023]
- (198) E-Control. Gesamtpreis 1 kWh Strom bei unterschiedlichem Jahresverbrauch (Stand Juli 2023). Was kostet eine kWh Strom? 2023. <https://www.e-control.at/konsumenten/strom/strompreis/was-kostet-eine-kwh> [31 October 2023]
- (199) Umweltbundesamt. Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger. Datenbasis: 2020, Aktualisierung Nov. 2022. 2022. <https://secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html>
- (200) Umweltbundesamt. Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger. Datenbasis 2021, Aktualisierung Dez. 2023. 2023. <https://secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html> [13 December 2023]
- (201) E-Control. Stromkennzeichnungsbericht 2010. 2010.
- (202) E-Control. Stromkennzeichnungsbericht 2011. 2011.
- (203) E-Control. Stromkennzeichnungsbericht 2012. 2012.
- (204) E-Control. Stromkennzeichnungsbericht 2013. 2013.
- (205) E-Control. Stromkennzeichnungsbericht 2014. 2014.
- (206) E-Control. Stromkennzeichnungsbericht 2015. 2015.
- (207) E-Control. Stromkennzeichnungsbericht 2016. 2016.
- (208) E-Control. Stromkennzeichnungsbericht 2017. 2017.
- (209) E-Control. Stromkennzeichnungsbericht 2018. 2018.
- (210) E-Control. Stromkennzeichnungsbericht 2019. 2019.
- (211) E-Control. Stromkennzeichnungsbericht 2020. 2020.
- (212) E-Control. Stromkennzeichnungsbericht 2021. 2021.
- (213) E-Control. Strom- und Gaskennzeichnungsbericht 2022. Berichtsjahr 2021. 2022.
- (214) E-Control. Strom- und Gaskennzeichnungsbericht 2023. Berichtsjahr 2022. 2023.
- (215) Electricity Maps. Österreich. Electricity Maps. 2023. <https://app.electricitymaps.com/zone/AT>

- (216) EMBER, Energy Institute. Carbon intensity of electricity, 2000 to 2022. 2023. <https://our-worldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity?tab=chart&country=~AUT> [31 October 2023]
- (217) Statista, EMBER. Carbon intensity of the power sector in the European Union in 2022, by country (in grams of CO₂ per kilowatt-hour). 2023. <https://www.statista.com/statistics/1291750/carbon-intensity-power-sector-eu-country/> [17 December 2023]
- (218) carbon footprint. Carbon footprint. Country specific electricity grid greenhouse gas emission factors. 2023.
- (219) OIB. Erläuternde Bemerkungen OIB-RL 6. Energieeinsparung und Wärmeschutz. OIB-Leitfaden Energietechnisches Verhalten von Gebäuden. 2015.
- (220) OIB. Erläuternde Bemerkungen OIB-RL 6. Energieeinsparung und Wärmeschutz. OIB-Leitfaden Energietechnisches Verhalten von Gebäuden. 2019.
- (221) OIB. Erläuternde Bemerkungen OIB-RL 6. Energieeinsparung und Wärmeschutz. OIB-Leitfaden Energietechnisches Verhalten von Gebäuden. 2023.
- (222) EEA. co2-emission-intensity-14.csv. 2023.
- (223) Kranzl S. Bilanzierung von Treibhausgasemissionen von Strom. Empfehlungen zur Öko-Bilanzierung. Wien: Umweltbundesamt; 2018. Report No.: REP-0654.
- (224) Electricity Maps. Emission factors sources. https://github.com/electricitymaps/electricitymaps-contrib/blob/master/EMISSION_FACTORS_SOURCES.md [14 December 2023]
- (225) Electricity Maps. Data Sources. https://github.com/electricitymaps/electricitymaps-contrib/blob/master/DATA_SOURCES.md [14 December 2023]
- (226) Electricity Maps. Carbon Intensity calculations. <https://github.com/electricitymaps/electricitymaps-contrib/wiki/Carbon-intensity-calculations>
- (227) Our World in Data. Sources and Processing. <https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity?tab=chart&country=~AUT#sources-and-processing> [17 December 2023]
- (228) Association of Issuing Bodies. European Residual Mixes. Results of the calculation of Residual Mixes for the calendar year 2021. 2022. Report No.: Version 1.0, 2022-05-31.
- (229) OIB. OIB-Richtlinien. Begriffsbestimmungen. 2023.
- (230) EEA. Greenhouse gas emission intensity of electricity generation. 2023. https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-14/#tab-googlechartid_chart_41 [18 December 2023]
- (231) Llopis R, Calleja-Anta D, Maiorino A, Nebot-Andrés L, Sánchez D, Cabello R. TEWI analysis of a stand-alone refrigeration system using low-GWP fluids with leakage ratio consideration. International Journal of Refrigeration. 2020; 118: 279–89.
- (232) TRANE. EXEP01 2150DE. 13 Januar 2022. RF-SVX006A-DE. Originalanleitung. Montage- und Bedienungsanleitung Exergy P 30 – P 450. 2022.
- (233) Mota-Babiloni A, Barbosa JR, Makhnatch P, Lozano JA. Assessment of the utilization of equivalent warming impact metrics in refrigeration, air conditioning and heat pump systems.

Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020; : 109929.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109929>

10 Anhang

10.1 Datenblätter Kompressionskältemaschinen für IPSEpro-Simulationen

10.1.1 Panasonic





Aquarea LT | Hydraulik-Splitsysteme m. Kombi-Hydromodul | Generation „L“ | Heizen und Kühlen | ADC | einphasig | mit Fremdstromanode | R290

			Einphasig (230 V / 50 Hz)		
Set (6-kW-E-Heizstab)			KIT-ADC05L6E5AN ¹	KIT-ADC07L6E5AN ¹	KIT-ADC09L6E5AN ¹
Heizleistung / COP (A7/W35)	kW / -		5,00/5,05	7,00/4,93	9,00/4,55
Heizleistung / COP (A7/W55)	kW / -		5,00/3,07	7,00/2,98	8,90/3,03
Heizleistung / COP (A2/W35)	kW / -		5,00/3,52	6,85/3,43	7,00/3,41
Heizleistung / COP (A2/W55)	kW / -		5,00/2,34	6,25/2,34	7,00/2,41
Heizleistung / COP (A-7/W35)	kW / -		5,00/3,01	5,80/3,01	7,00/2,80
Heizleistung / COP (A-7/W55)	kW / -		5,00/2,12	5,80/2,12	7,00/2,13
Kühlleistung / EER (A35/W7)	kW / -		5,00/3,23	7,00/3,03	8,20/2,82
Kühlleistung / EER (A35/W18)	kW / -		5,00/5,00	7,00/4,73	9,00/4,19
Mittleres Klima, W35 / W55	Raumheizungs-Energieeffizienz (η _{h,s})	%	200/142	195/142	190/144
	SCOP Raumheizung		5,06/3,63	4,96/3,62	4,84/3,67
	Raumheizungs-Energieeffizienzklasse ²		A+++/A++	A+++/A++	A+++/A++

10.1.2 Heliotherm

Comfort Compact Luft			S08L-M-CC	S12L-M-CC	S18L-M-CC
Heizleistungsbereich EN14825		kW	2,6 - 10,1	4,1 - 12,2	6,6 - 20,4
A12/W24	Heizleistung	kW	6,7	8,4	8,0
	Leistungszahl	COP	7,0	8,9	7,3
A7/W27	Heizleistung	kW	5,9	7,5	6,8
	Leistungszahl	COP	5,7	5,8	6,3
A2/W30	Heizleistung	kW	5,5	6,6	9,0
	Leistungszahl	COP	4,6	4,7	5,0
A-7/W34	Heizleistung	kW	8,8	10,6	15,9
	Leistungszahl	COP	2,7	2,7	3,0
A-10/W35	Heizleistung	kW	10,2	12,0	18,1
	Leistungszahl	COP	2,2	2,2	2,5
SCOP* EN14825 Klimazone mittel			4,5	4,6	5,0
Max. Vorlauftemperatur		°C	62	62	62
Schalleistung lt. EN12102		dB(A)	48	50	51
Elektrische Leistung Backup-Heizung		kW	6 (OPTIONAL)	6 (OPTIONAL)	6 (OPTIONAL)
Abmessungen (H x B x T)		mm	1704 x 896 x 585	1702 x 935 x 1002	1702 x 935 x 1002
Leergewicht Gesamt		kg	215	256	282
Option Kühlung Reversibel					
A35/W18	Kühlleistung	kW	8,2	11,0	13,8
	Leistungszahl	EER	4,0	4,2	4,0
A35/W7	Kühlleistung	kW	7,1	9,0	11,9
	Leistungszahl	EER	3,8	3,8	3,7

10.1.3 Daikin

Angaben zur Effizienz		FTXZ + RXZ	25N + 25N	35N + 35N	50N + 50N
Kühlleistung	Min. / Nom. / Max.	kW	0,6/2,5/3,9	0,6/3,5/5,3	0,6/5,0/5,8
Heizleistung	Min. / Nom. / Max.	kW	0,6/3,6/7,5	0,6/5,0/9,0	0,6/6,3/9,4
Saisonale Effizienz (entsprechend EN14825)	Kühlen	Energieeffizienzklasse		A+++	
		Pdesign	kW	2,50	3,50
	SEER		9,54	9,00	8,60
	Jährlicher Energieverbrauch	kWh	92	136	203
	Heizen (gemäßigtes Klima)	Energieeffizienzklasse			A+++
Pdesign		kW	3,50	4,50	5,60
SCOP/A			5,90	5,73	5,50
Nominale Effizienz	EER		831	1.100	1.427
		Jährlicher Energieverbrauch	kWh	6,10	5,30
	COP		5,80	5,00	4,47
	Jährlicher Energieverbrauch	kWh	205	330	550
	Energieeffizienzklasse Kühlen / Heizen			A/A	

10.2 Kältemaschinenmodell in IPSEpro

refrigeration_a
refrigeration_b

Model: refrigeration_machine_aprox

delta_p_cold (P)	Edit>>
delta_p_hot (P)	Edit>>
Pinch (P)	Edit>>
COP_KM (V)	Edit>>

New...
Delete...

#Model built by Magdalena Wolf, 21.05.2019

#mass balance equations

```
f_mass_hot: feed_hot.mass = drain_hot.mass;
f_mass_cold: feed_cold.mass = drain_cold.mass;
```

pressure drops

```
f_delta_p_hot: feed_hot.p - delta_p_hot = drain_hot.p;
f_delta_p_cold: feed_cold.p - delta_p_cold = drain_cold.p;
```

energy balance

```
f_e_cold: feed_cold.mass * (drain_cold.h - feed_cold.h) = -1*Q_cool;
f_e_hot: feed_hot.mass * (drain_hot.h - feed_hot.h) = Q_heat;
#f_e_total: Q_heat = Q_cool + P_el;
f_e_total: 0 = Q_trans_env + Q_heat - Q_cool - P_el;
```

efficiencies

```
f_pinch1: T_o = drain_hot.t + Pinch;
f_pinch2: T_u = drain_cold.t - Pinch;
f_e_c: e_c_KM = (T_u + 273.15) / (T_o - T_u);
f_n: Eta = (1 - ((T_u + 273.15) / (T_o + 273.15))) * 100;
```

Exergy

```
#fExergy_source: E_source = Eta * Q_cool;
#fExergy_sink: E_sink = Eta * Q_heat;
```

COP heating (vgl. Baehr Chapter 3.3.5)

```
fCOP1: COP_KM = abs(Q_cool) / P_el;
fCOP2: COP_KM = Zeta_KM / 100 * e_c_KM;
```