

Schlussbericht, 31. September 2021

Klimageräte im Kontext des Klimawandels



Autoren

Silvia Domingo-Irigoyen, IGE, silvia.domingo@hslu.ch

Sina Büttner, IGE, sina.buettner@hslu.ch

Olivier Steiger, IGE, olivier.steiger@hslu.ch

Gianrico Settembrini, IGE, gianrico.settembrini@hslu.ch

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

Kurzzusammenfassung

Die Schweiz ist vom Klimawandel besonders betroffen. Infolge der globalen Erwärmung kommt es heutzutage nicht nur häufiger zu höheren Temperaturen, sondern auch zu längeren und wärmeren Hitzeperioden. Mit dem fortschreitenden Klimawandel steigt gleichzeitig die Nachfrage nach Kühlung im Wohnbereich. Heute kann dieser Bedarf nur über mobile Klimageräte oder mittels Free-Cooling abgedeckt werden. Das Ziel der vorliegenden Studie ist es, verschiedene Konzepte für eine möglichst umweltfreundliche Kühlung von Wohnräumen mit dezentralen Systemen zu untersuchen, insbesondere die Kombination von mobilen Klimageräten mit einer Photovoltaikanlage. Zudem wurden die aktuellen Gesetzgebungen analysiert und Hinweise für mögliche Anpassungen erarbeitet. Durch die genannten Projektziele soll sichergestellt werden, dass der Kühlbedarf in Wohngebäuden – vor allem angesichts des Klimawandels – möglichst umweltverträglich gedeckt werden kann, d.h. mit einem minimalen Energiebedarf und/oder CO₂-Ausstoss.

Résumé

La Suisse est particulièrement touchée par le changement climatique. En raison du réchauffement climatique, les températures plus élevées sont plus fréquentes, et les périodes de chaleur deviennent plus longues et plus chaudes. Au fur et à mesure du changement climatique, le besoin en refroidissement au sein de nos habitations va augmenter. Aujourd'hui, ce besoin est couvert par des unités de refroidissement mobiles ou par le biais du free cooling. L'objectif de la présente étude est d'examiner différents concepts écologiques destinés à refroidir les espaces résidentiels avec des systèmes décentralisés, en particulier par la combinaison de refroidisseurs mobiles avec de l'énergie photovoltaïque. De plus, la législation actuelle a été étudiée et des ébauches pour d'éventuelles adaptations futures ont été élaborées. Le but du projet est d'assurer que le besoin en refroidissement des bâtiments résidentiels - notamment en raison du changement climatique - puisse être satisfait de la manière la plus efficace et écologique possible, c'est-à-dire avec des besoins énergétiques et/ou des émissions de CO₂ minimaux.

Riassunto

La Svizzera è particolarmente colpita dal cambiamento climatico. A causa del riscaldamento globale, si osserva un aumento sia della frequenza che della durata dei periodi con temperature elevate. Con la progressione del cambiamento climatico, aumenta quindi anche il fabbisogno di raffreddamento nelle abitazioni, il quale al momento può essere coperto solo con unità mobili di condizionamento o tramite free cooling. Il progetto attuale ha come scopo lo studio di diversi concetti che permettano di raggiungere un raffreddamento degli spazi abitativi con sistemi decentralizzati nel modo il più ecologico possibile. In particolare, viene valutata la combinazione di condizionatori d'aria mobili con impianti fotovoltaici. È inoltre stata analizzata la legislazione vigente e sono state sviluppate indicazioni per possibili adattamenti. Gli obiettivi di questo progetto mirano a garantire che il fabbisogno di raffreddamento degli edifici residenziali - soprattutto in considerazione dei cambiamenti climatici - possa essere soddisfatto nel modo più compatibile possibile con l'ambiente, ovvero con il minimo di impiego di energia e/o di emissioni di CO₂.

Inhalt

Zusammenfassung	6
Résumé	18
Riassunto	30
1. Ausgangslage	42
1.1 Klimaerwärmung	42
1.2 Klimageräte	43
1.3 Ziel der Arbeit.....	47
1.4 Umweltfreundliche Ansätze zur Kühlung von Wohnräumen	48
2. Grundlagen	49
2.1 Publikationen	49
2.2 Vorschriften und Normen	50
2.2.1 MuKE n 2014 (EnDK, 2015 und EnDK, 2018).....	51
2.2.2 SIA 180 (SIA, 2014a)	53
2.2.3 SIA 382/1 (SIA, 2014b)	55
2.2.4 Delegierte Verordnung (EU) Nr. 626/2011 (Europäische Kommission, 2011)	59
3. Vorgehen.....	62
3.1 Klimadaten und Szenarien	62
3.2 Auswahl der Klimageräte	63
3.3 Photovoltaikanlage und Batteriespeicher	63
3.4 Wohntypologie	64
3.5 Grundlagen der Gebäudesimulationen	66
3.5.1 Mechanische Lüftung	66
3.5.2 Verschattungssysteme.....	66
3.5.3 Nachtkühlung	66
3.5.4 Beleuchtung und Geräte	66
3.5.5 Personenbelegung.....	67
3.5.6 Notwendigkeit einer Kühlung	67
3.5.7 Kühlung und untersuchte Szenarien.....	68
3.5.8 Dämmung einzelner, zu kühlender Räume	70
3.6 Auswertungsparameter	70
3.6.1 Thermische Behaglichkeit.....	70
3.6.2 Klimakältebedarf und –verbrauch	71

3.6.3	Potenzial einer Photovoltaikanlage ohne und mit einem Batteriespeicher.....	71
4.	Ergebnisse.....	72
4.1	Notwendigkeit einer Kühlung in der untersuchten Wohnung.....	72
4.1.1	Erkenntnisse	74
4.2	Umweltfreundliche Ansätze zur Kühlung	75
4.2.1	Untersuchte Szenarien	75
4.2.2	Klimakälteverbrauch unter verschiedenen Betriebsbedingungen der Kühlung.....	87
4.2.3	Ergänzende Szenarien	95
4.2.4	Dämmung einzelner, zu kühlender Räume	117
4.3	Gesetzgebung.....	119
4.3.1	Massnahmen für den sommerlichen Wärmeschutz in Wohngebäuden	119
4.3.2	Notwendigkeit der Kühlung in Wohngebäuden.....	122
4.3.3	Mindestanforderungen für mobile Kompaktgeräte und Split-Systeme unter einer Kälteerzeugerleistung von 12 kW	123
4.3.4	Energieverbrauch und der Beitrag von erneuerbaren Quellen zur Kühlung	123
5.	Diskussion	125
6.	Schlussfolgerungen	130
7.	Literaturverzeichnis.....	140
8.	Anhang.....	144
8.1	Beschrieb Referenzwohnung.....	144
8.2	Beschrieb Referenzjahre	148
8.3	Umweltfreundliche Ansätze zur Kühlung. Detaillierte Ergebnisse.....	148
8.3.1	«Worst-Case» Szenario: Kompaktgeräte	149
8.3.2	Referenz Szenario: Kompaktgeräte.....	157
8.3.3	Szenario 1: Multi-Split-System: Wohnung	165
8.3.4	Szenario 2: Split-System: Wohnbereich	173
8.3.5	Szenario 3: Split-System: Schlafzimmer.....	181

Zusammenfassung

Ausgangslage

Wenn die weltweiten Treibhausgasemissionen weiterhin ungebremst ansteigen, ist in der Schweiz mit einem Anstieg der jahreszeitlichen mittleren Temperatur von 3.3 – 5.4 °C (gegenüber der Periode 1981–2010) bis zum Ende des 21. Jahrhunderts zu rechnen (NCCS, 2018). Dieser Temperaturanstieg wird Auswirkungen auf den Energiebedarf und die thermische Behaglichkeit von Gebäuden haben. Bereits heute steigt die Nachfrage nach mobilen Klimageräten im Wohnbereich an, dies wird sich künftig noch verstärken. Grund dafür ist, dass diese Lösungen preisgünstig sind, die Beschaffung der Geräte einfach ist und diese nur wenig oder gar keinen konstruktiven Aufwand erfordern. Mobile Klimageräte stellen dabei i.d.R. eine sehr ineffiziente Kühlmassnahme dar und können bei intensiver Nutzung einen erheblichen Energieverbrauch verursachen. Um die Ziele der Energiestrategie 2050 zu erreichen, muss dem Thema der Kühlung somit mehr Beachtung geschenkt werden – insbesondere angesichts des Klimawandels.

Ziel des Projekts

Mit dieser Studie werden verschiedene Massnahmen untersucht, wie die Kühlung von Wohnräumen mit dezentralen Lösungen (mobilen Klimageräten und Split-Systemen) möglichst umweltfreundlich erfolgen kann, d.h. mit einem minimalen Energiebedarf und -verbrauch. Als Beispiel kann hier u.a. die Kombination von mobilen Klimageräten mit Photovoltaikanlagen genannt werden. Ebenso wurden die Anforderungen der aktuellen Gesetzgebungen analysiert und Hinweise für mögliche Anpassungen gegeben. Ziel der Studie ist es, verschiedene Lösungen zu erarbeiten, um den Kühlbedarf in Wohngebäuden möglichst umweltverträglich zu decken – heute und unter künftigen Klimabedingungen.

Vorgehensweise / Methodik

Das Projekt wurde in zwei Handlungsfelder aufgeteilt.

In der ersten Projektphase wurde der Klimakälteverbrauch einer Wohnung unter Berücksichtigung der heutigen und künftigen klimatischen Bedingungen für verschiedene Nutzungsbedingungen, Kühlgeräte und Wirkungsgrade untersucht. Dazu wurden verschiedene Szenarien definiert und mit Hilfe der Software IDA ICE 4.8 simuliert sowie anschliessend ausgewertet. Ebenso wurde analysiert, inwieweit eine Photovoltaikanlage – allein und in Kombination mit einem Batteriespeicher – den Stromverbrauch für die Kühlung decken kann.

Die Simulationen wurden anhand einer Dachgeschosswohnung (Abschnitt 3.4) eines realen Referenzgebäudes durchgeführt. Das Mehrfamilienhaus wurde 2014 erbaut und ist Minergie® zertifiziert. Bei der untersuchten Wohnung handelt es sich um eine 4.5 Zimmer-Eckwohnung in Massivbauweise mit einem süd-west-orientierten Wohnbereich und drei nordost-orientierten Zimmern. Es wurde angenommen, dass es nicht zu Verschattungen durch Nachbargebäude kommt. Die zukünftigen Klimadaten (Abschnitt 3.1) basieren auf der Klimaprojektion der Periode "2060" (2045-2074) für das mittlere Emissionsszenario A1B (CH2011, 2011). Für das heutige Klima wurde die Referenzperiode "1995" (1980-2009) betrachtet. Als Klimastandorte wurden die Stadt Basel (Station Basel-Binningen) und die Stadt Lugano (Station Lugano) gewählt. Die Simulationen wurden anhand von vier spezifischen Jahren durchgeführt: Medianjahr der Referenzperiode (2004), wärmstes Jahr der Referenzperiode (2003), Medianjahr der Periode A1B (2063), warmes Jahr der Periode A1B (2068).

In der Studie wurden ein mobiles Kompaktgerät und ein Multi-Split-System (Abschnitt 3.2) betrachtet. Das untersuchte Kompaktgerät entspricht dabei der Energieeffizienzklasse A mit einer Nennleistungszahl im Kühlbetrieb von 2.6 (EER). Das Multi-Split-System entspricht der Energieeffizienzklasse A++ mit einer Nennleistungszahl im Kühlbetrieb von 7.5 (SEER). Es wurde angenommen, dass in den Szenarien, in denen die gesamte Wohnung gekühlt wird, alle Räume über ein mobiles Klimagerät / Innengerät verfügen, im Wohnbereich mit einer Kühlleistung von 3.5 kW und in den Schlafzimmern mit je 2 kW. In den Szenarien, in denen nur das Wohnzimmer oder nur die Schlafzimmer gekühlt werden, sind nur diese Räume mit einem Klimagerät ausgestattet.

In der zweiten Projektphase wurden die aktuellen Gesetzgebungen (Abschnitt 4.3) – insbesondere die MuKE 2014 (EnDK, 2018a) und die Norm SIA 180 (SIA, 2014a) – überprüft, wobei ebenso die Auswirkungen des Klimawandels berücksichtigt wurden. Anschliessend wurden mögliche Anpassungen diskutiert.

Ergebnisse

Es wurden verschiedene Strategien für eine möglichst umweltfreundliche Kühlung von Wohnräumen mit dezentralen Systemen untersucht. Dazu gehörten Massnahmen zur Senkung des Energieverbrauchs, der Beitrag einer Photovoltaikanlage mit und ohne Batteriespeicher sowie die Dämmung einzelner, zu kühlender Räume.

Zur Senkung des Energieverbrauchs von Kühlgeräten wurden die nachfolgenden Massnahmen untersucht (Abschnitt 4.2.2):

- Gerätetyp (Kompaktgerät oder Split-Systeme).
- Solltemperatur.
- Anzahl gekühlter Räume.
- Betriebszeiten der Kühlgeräte.

Um diese verschiedenen Massnahmen zu vergleichen, wurde ein Vergleichsszenario definiert. Mit diesem Szenario wurde angenommen, dass die ganze Wohnung während des ganzen Tages mit einer Solltemperatur von 22 °C gekühlt wird. Der Stromverbrauch für die Kühlung mit mobilen Geräten liegt in diesem Szenario für das Klima in Basel bei 9.1 kWh/(m²a) für das Medianjahr der Referenzperiode, bei 14.0 kWh/(m²a) für das wärmste Jahr der Referenzperiode, bei 12.7 kWh/(m²a) für das Medianjahr der Periode A1B und bei 18.4 kWh/(m²a) für das warme Jahr der Periode A1B. Für das Klima in Lugano beträgt der Stromverbrauch für die Kühlung 11.8 kWh/(m²a), 16.3 kWh/(m²a), 15.9 kWh/(m²a) und 22.8 kWh/(m²a) für die zuvor genannten Jahre. Der Stromverbrauch für die Kühlung mit Split-Systemen liegt in diesem Szenario für das Klima in Basel bei 4.0 kWh/(m²a) für das Medianjahr der Referenzperiode, bei 6.4 kWh/(m²a) für das wärmste Jahr der Referenzperiode, bei 5.7 kWh/(m²a) für das Medianjahr der Periode A1B und bei 8.5 kWh/(m²a) für das warme Jahr der Periode A1B. Für das Klima in Lugano beträgt der Stromverbrauch für die Kühlung 5.3 kWh/(m²a), 7.8 kWh/(m²a), 7.4 kWh/(m²a) und 11.2 kWh/(m²a) für die zuvor genannten Jahre.

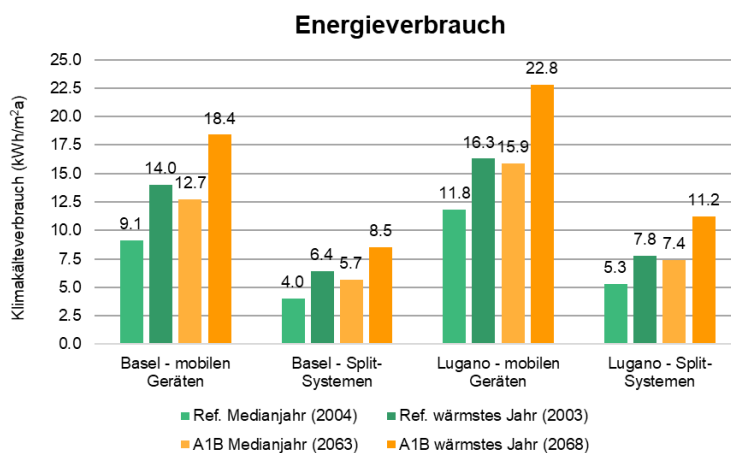


Abbildung 1: Stromverbrauch für Klimakälte der ganzen Wohnung während des ganzen Tages mit einer Solltemperatur von 22 °C für das aktuelle und zukünftige Klima in Basel und Lugano. Für die Kühlung wurden mobile Kompaktgeräte und Split-Systeme angenommen.

Tabelle 1 zeigt die Abweichungen für den Klimakälteverbrauch der untersuchten Wohnung im Vergleich zum oben definierten Vergleichsszenario in Abhängigkeit von den zuvor definierten Massnahmen sowie den Parametern Klimastandort und Klimawandel. Für jeden Parameter wurde eine Variante analysiert und die Differenz in Prozentsätzen angegeben. Z. B. wurde für den Parameter «Gerätetyp» ein Split-Gerät mit

einem mobilen Gerät verglichen oder für den Parameter «Solltemperatur» wurden die Temperaturen von 24 °C und 25.5 °C mit 22 °C verglichen (wobei der Gerätetyp unverändert bleibt). Die absoluten Werte des Klimakälteverbrauchs befinden sich in Abschnitt 6.

KLIMA	GERÄTETYP	ganzer Tag			bei Belegung			GEKÜHLTE RÄUME	JAHR		
		22 °C	24 °C	25.5 °C	22 °C	24 °C	25.5 °C				
GERÄTETYP	Basel / Lugano	Split-Gerät (vs. Mobiles Gerät)	- 50-55 %	- 45-55 %	- 40-50 %	- 55-60 %	- 50-55 %	- 50 %	Wohnzimmer ganzer Tag: + 5 %, Schlafzimmer ganzer Tag: - 5 %; Wohnzimmer bei Belegung: + 10 %, Schlafzimmer bei Belegung: - 10 %	Kein Unterschied	
KLIMA	GERÄTETYP	24 °C (vs. 22 °C)			25.5 °C (vs. 22 °C)			GEKÜHLTE RÄUME	BETRIEBSZEIT		
		Medianjahre	Wärme Jahre		Medianjahre	Wärme Jahre					
SOLLTEMPERATUR	Basel	Mobiles Gerät	- 50-60 %		- 35-45 %		- 80-90 %		- 60-70 %		Kein Unterschied
		Split-Gerät	- 45-55 %		- 30-35 %		- 70-85 %		- 60-65 %		
	Lugano	Mobiles Gerät	- 45-55 %		- 30-35 %		- 70-85 %		- 60-65 %		
		Split-Gerät	- 30-50 %		- 20-30 %		- 60-75 %		- 45-60 %		
KLIMA	GERÄTETYP	Wohnbereich (vs. ganze Wohnung)			Schlafzimmer (vs. ganze Wohnung)			JAHR	SOLLTEMP.		
		ganzer Tag		bei Belegung	ganzer Tag		bei Belegung				
GEKÜHLTE RÄUME	Basel	Mobiles Gerät	- 45 %		- 35 %		- 50 %		- 65 %		Kein Unterschied
		Split-Gerät	- 40 %		- 25 %		- 55 %		- 75 %		
	Lugano	Mobiles Gerät	- 45 %		- 35 %		- 50 %		- 60 %		
		Split-Gerät	- 40 %		- 25 %		- 55 %		- 70 %		
KLIMA	GERÄTETYP	bei Belegung (vs. ganzer Tag)						JAHR	SOLLTEMP.		
		Wohnung		Wohnbereich		Schlafzimmer					
BETRIEBSZEIT	Basel	Mobiles Gerät	- 10-30 %		bis 11 %		- 30-55 %		In warmen Jahren ist die Reduktion etwas geringer	Bei 22 °C und mobile Geräte ist die Reduktion etwas geringer und liegt eher an der unteren Werte des Bereichs	
		Split-Gerät	- 20-30 %		bis 8 %		- 45-75 %				
	Lugano	Mobiles Gerät	- 10-25 %		bis 8 %		- 25-50 %				
		Split-Gerät	- 15-25 %		bis 7 %		- 35-60 %				
KLIMA	GERÄTETYP	22 °C			24 °C		25.5 °C		GEKÜHLTE RÄUME	BETRIEBSZEIT	
		Medianj.	Wärme Jahre	Medianj.	Wärme Jahre	Medianj.	Wärme Jahre				
KLIMA	Lugano (vs. Basel)	Mobiles Gerät	+ 25-30 %	+ 15-25 %	+ 55-65 %	+ 30-45 %	+ 100-110 %	+ 45-65 %	Medianjahr, Schlafzimmer ganzer Tag: + 30 %	Warmes Jahr, Schlafzimmer bei Belegung: bei 22 °C und 25.5 °C: + 10 % bei 24 °C: + 50 %	
		Split-Gerät	+ 30-40 %	+ 20-40 %	+ 55-65 %	+ 30-45 %	+ 70-100 %	+ 35-70 %			
KLIMA	GERÄTETYP	Medianjahr der Periode A1B (vs. Medianj. der Referenzp.)			Warmes Jahr der Periode A1B (vs. Medianj. der Referenzp.)			GEKÜHLTE RÄUME	BETRIEBSZEIT		
		22 °C	24 °C	25.5 °C	22 °C	24 °C	25.5 °C				
KLIMAWANDEL	Basel	Mobiles Gerät	+ 40-45 %	+ 70-80 %	+ 100-155 %	+ 100-110 %	+ 3-fach	+ 6-fach	Im Wohnbereich ist der Anstieg etwas geringer, im Schlafzimmer ist er höher, besonders bei einer Solltemperatur von 25.5 °C	Kein Unterschied	
		Split-Gerät	+ 45-50 %	+ 80-85 %	+ 100-145 %	+ 110-135 %	+ 3.5-fach	+ 5-fach			
	Lugano	Mobiles Gerät	+ 30-40 %	+ 60-80 %	+ 120-165 %	+ 90-110 %	+ 2.5-fach	+ 5-fach			
		Split-Gerät	+ 40-45 %	+ 70-85 %	+ 130-140 %	+ 110-130 %	+ 3-fach	+ 4.5-fach			

Tabelle 1: Schwankung des Klimakälteverbrauchs für die untersuchte Wohnung in Abhängigkeit von den erforschten Massnahmen: Gerätetyp, Solltemperatur, Anzahl gekühlter Räume und Betriebszeit sowie den Parametern Klimastandort und Klimawandel.

Die wichtigsten Erkenntnisse zu den einzelnen Parametern sind nachfolgend beschrieben.

Gerätetyp (Split-Systeme)

Split-Systeme wurden als Alternative zu mobilen Kompaktgeräten untersucht. Split-Systeme sind wesentlich effizienter als Kompaktgeräte, unter anderem wegen ihres effizienten Teillastbetriebs und ihres Aussenraumgerätes, wo sich der Kompressor befindet. Dadurch gelangt keine Abwärme in den Innenraum. Die Leistungszahl beider Kühlgeräte (aus der Energieetikette) kann dabei nicht direkt verglichen werden, da unterschiedliche Berechnungsmethoden angewandt werden. Generell gilt aber, dass das effizienteste Kompaktgeräte immer mehr Energie verbrauchen wird als ein Split-System.

Für Klimageräte sollten die folgenden Energieeffizienzklassen angestrebt werden:

- Für Split-Geräte mit einer Kühlleistung kleiner als 4 kW: Energieeffizienzklasse A+++ im Kühlbetrieb und A++ im Heizbetrieb.
- Für Split-Geräte mit einer Kühlleistung grösser als 4 kW und bei Multi-Split-Systemen für mehrere Räume: Energieeffizienzklasse A++ im Kühlbetrieb und A+ im Heizbetrieb.
- Für mobile Kompaktgeräte: Energieeffizienzklasse A+++.

Das Kältemittel der Anlage muss ein GWP (*Global Warming Potential*, siehe Abschnitt 1.2) von weniger als 750 aufweisen, daher ist das Kältemittel R32 eine gute Lösung. Optimal wäre das Kältemittel R290 (Propan) mit einem GWP von 3, aber derzeit gibt es keine Klimageräte, die mit diesem Kältemittel arbeiten. Anlagen mit dem Kältemittel R410A, welches ein dreimal so hohes Treibhauspotential hat und ab dem 1. Januar 2025 verboten wird, sollten vermieden werden.

Der Stromverbrauch für Kühlung mit einem Multi-Split-System wurde mit dem Verbrauch von mobilen Kompaktgeräten verglichen. Der Klimakälteverbrauch kann durch die Split-Geräte um etwa 50 % reduziert werden, wobei diese Einsparung bei einer Solltemperatur von 22 °C etwas höher und bei einer Solltemperatur von 25.5 °C etwas niedriger ist. Erfolgt die Kühlung nur während einer Belegung der Räume, ist diese Reduktion umso höher. Dabei ist diese Reduktion für die ausschliessliche Kühlung des Wohnbereichs etwas geringer und für die Kühlung der Schlafzimmer etwas grösser. Die Unterschiede aufgrund des Klimastandorts oder der untersuchten Jahre (heute und in Zukunft) sind unerheblich.

Aufgrund der höheren Energieeffizienz und des Teillastbetriebs der Split-Geräte reduzieren diese nicht nur den Energieverbrauch, sondern auch die Stromspitzen im Netz. Dadurch kann die Spitzenbelastung im Stromnetz verringert werden.

Solltemperatur

Der Stromverbrauch für die Kühlung bei einer Solltemperatur von 24 °C und einer Solltemperatur von 25.5 °C wurde mit dem Verbrauch bei einer Solltemperatur von 22 °C verglichen. Der Klimakälteverbrauch in Abhängigkeit zur Solltemperatur variiert dabei je nach Klimastandort, Gerätetyp und Jahr. Die Reduktion des Verbrauchs aufgrund einer höheren Solltemperatur hängt hauptsächlich vom Klimastandort ab. Bei mobilen Klimageräten können folgende Einsparungen in den Medianjahren beider Perioden durch die Änderung der Solltemperatur (von 22 °C) erzielt werden:

- Bei einer Solltemperatur von 24 °C: 50-60 % für das Klima in Basel und 45-55 % für das Klima in Lugano.
- Bei einer Solltemperatur von 25.5 °C: 80-90 % für das Klima in Basel und 70-85 % für das Klima in Lugano.

Bei Split-Geräten ist diese Reduktion um 5 % geringer für das Klima in Basel und um 5-10 % geringer für das Klima in Lugano. In einem warmen Jahr ist diese Reduzierung für beide Gerätetypen und Klimastandorte um 15-20 % geringer.

Anzahl gekühlter Räume

Der Stromverbrauch für die Kühlung des Wohnbereichs und der Schlafzimmer wurde mit dem Stromverbrauch für die Kühlung der gesamten Wohnung verglichen. Die Reduktion hängt hierbei hauptsächlich von der Betriebszeit und dem Gerätetyp ab:

- Wohnbereich: Bei mobilen Geräten beträgt die Reduktion 45 % für eine ganztägige Kühlung und 35 % für eine Kühlung nur bei Belegung. Bei Split-Geräten beträgt die Reduktion 40 % für eine ganztägige Kühlung und 25 % für eine Kühlung nur bei Belegung.
- Schlafzimmer: Bei mobilen Geräten beträgt die Reduktion 50 % für eine ganztägige Kühlung und 65 % für eine Kühlung nur bei Belegung. Bei Split-Geräten beträgt die Reduktion 55 % für eine ganztägige Kühlung und 75 % für eine Kühlung nur bei Belegung.

Für das Klima in Lugano ist diese Reduktion gleich, ausser bei einer Kühlung der Schlafzimmer nur bei Belegung, diese ist 5 % geringer. Bei den untersuchten Jahren und den Solltemperaturen gibt es fast keinen Unterschied. Wird die Wohnung jedoch nur teilweise gekühlt (d.h. nur einzelne Räume), führt dies zu einer hohen Anzahl an Überhitzungsstunden in den nicht gekühlten Räumen.

Betriebszeit

Der Stromverbrauch für die Kühlung nur bei Belegung wurde mit dem Verbrauch bei einer Kühlung während des ganzen Tages verglichen. Wird nur bei Belegung gekühlt, wurden folgende Zeiten angenommen: für den Wohnbereich von 06:00 bis 21:00 Uhr und für die Schlafzimmer von 21:00 bis 06:00 Uhr. Im Vergleich zur ganztägigen Kühlung gibt es keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Klimastandorten. In den warmen Jahren beider Perioden (heute und in Zukunft) sowie bei einer Solltemperatur von 22 °C ist die Reduktion des Stromverbrauchs für Kühlung etwas geringer und bei Split-Geräten etwas höher. Die Reduktion hängt dabei hauptsächlich vom gekühlten Raum ab:

- Ganze Wohnung: 10-30 %.
- Wohnbereich: 5-10 %.
- Schlafzimmer: 30-50 % (bei Split-Geräten: 45-75 % für das Klima in Basel; 35-60% für das Klima in Lugano).

Da der Wohnbereich tagsüber belegt ist und zu dieser Zeit gleichzeitig das Klimagerät hauptsächlich genutzt wird, liegt die Reduktion nur bei ca. 5%. In den Schlafzimmern ist diese Einsparung grösser, da durch die Kühlung nur bei Belegung die Schlafzimmer lediglich nachts gekühlt werden, wenn zeitgleich die Aussen- und Innentemperaturen niedriger sind.

Weitere Parameter, welche einen wichtigen Einfluss auf den Stromverbrauch für Kühlung haben, sind der Klimastandort sowie der Temperaturanstieg aufgrund des Klimawandels.

Klima

Der Stromverbrauch für die Kühlung für das Klima in Lugano wurde mit dem Verbrauch für das Klima in Basel verglichen. Wie erwartet, führt das wärmere Klima in Lugano zu einem höheren Klimakälteverbrauch als das Klima in Basel. Der Anstieg des Stromverbrauchs aufgrund des wärmeren Klimas in der Südschweiz hängt hauptsächlich von der Solltemperatur und dem untersuchten Jahr ab. Auch der Gerätetyp hat einen Einfluss auf den Stromverbrauch. In den Medianjahren beider Perioden (heute und in Zukunft) kommt es zu einem Anstieg des Stromverbrauchs für die Kühlung, dieser ist nachfolgend beschrieben:

- Mobiles Gerät:
 - Bei einer Solltemperatur von 22 °C: 25-30 %.
 - Bei einer Solltemperatur von 24 °C: 55-65 %.
 - Bei einer Solltemperatur von 25.5 °C: 100-110 %.

- Split-Gerät:
 - Bei einer Solltemperatur von 22 °C: 30-40 %.
 - Bei einer Solltemperatur von 24 °C: 55-65 %.
 - Bei einer Solltemperatur von 25.5 °C: 70-100 %.

In den warmen Jahren beider Perioden ist der Anstieg des Stromverbrauchs für die Kühlung etwas geringer.

Klimawandel

Der Stromverbrauch für die Kühlung für das Medianjahr und das warme Jahr der zukünftigen Periode A1B wurde mit dem Verbrauch für das Medianjahr der Referenzperiode verglichen. Die künftig höheren Temperaturen führen zu einem höheren Klimakälteverbrauch. Der Anstieg des Stromverbrauchs für Kühlung variiert dabei in Abhängigkeit von der Solltemperatur und dem Klimastandort. Die Betriebszeit führt zu keinen signifikanten Schwankungen. Im Wohnbereich ist der Anstieg des Stromverbrauchs etwas geringer, im Schlafzimmer ist er höher, insbesondere bei einer Solltemperatur von 25.5 °C. Für die ganze Wohnung ist angesichts des Klimawandels mit folgendem Anstieg zu rechnen:

- Medianjahr der Periode A1B:
 - Basel:
 - Bei einer Solltemperatur von 22 °C: 40-45 %.
 - Bei einer Solltemperatur von 24 °C: 70-80 %.
 - Bei einer Solltemperatur von 25.5 °C: 100-155 %.
 - Lugano:
 - Bei einer Solltemperatur von 22 °C: 30-40 %.
 - Bei einer Solltemperatur von 24 °C: 60-80 %.
 - Bei einer Solltemperatur von 25.5 °C: 120-165 %.
- Warmes Jahr der Periode A1B:
 - Basel:
 - Bei einer Solltemperatur von 22 °C: 100-110 %.
 - Bei einer Solltemperatur von 24 °C: 3-fach.
 - Bei einer Solltemperatur von 25.5 °C: 6-fach.
 - Lugano:
 - Bei einer Solltemperatur von 22 °C: 90-110 %.
 - Bei einer Solltemperatur von 24 °C: 2.5-fach.
 - Bei einer Solltemperatur von 25.5 °C: 5-fach.

Der Gerätetyp hat dabei ebenso keinen signifikanten Einfluss. Der Anstieg des Stromverbrauchs für die Kühlung bei Split-Systemen ist etwas höher (etwa 5 % für das Medianjahr und 10-50 % für das warme Jahr der zukünftigen Periode A1B) für die Solltemperaturen von 22 °C und 24 °C und niedriger (etwa 10-20 % für das Medianjahr und ca. 50-100 % für das warme Jahr der zukünftigen Periode A1B) für die Solltemperatur von 25.5 °C.

Daraus geht hervor, dass der Klimakälteverbrauch in Zukunft erheblich ansteigen wird (um etwa 70 % bei einer Solltemperatur von 24 °C in einem zukünftigen Medianjahr). Durch den Einsatz eines effizienteren Kühlsystems, Typ Split- oder Multi-Split-System, zusammen mit einer angemessenen Nutzung (nur während der Nutzungszeiten des Raumes und bei einer nicht zu tiefen Solltemperatur, z.B. 24-25.5 °C) kann der Stromverbrauch für die Kühlung im Vergleich zur intensiven Nutzung von mobilen Kühlgeräten (Kühlung der ganzen Wohnung, während dem ganzen Tag mit einer Solltemperatur von 22 °C) erheblich reduziert werden. Diese Konfiguration reduziert den Klimakälteverbrauch um 75-85 % im Klima von Basel und um 70-80 % im Klima von Lugano bei einer Solltemperatur von 24 °C und um 85-95 % im Klima von Basel und um 80-90 % im Klima von Lugano bei einer Solltemperatur von 25.5 °C (siehe Abschnitt 6).

Weitere Massnahmen

Des Weiteren wurden im Rahmen der Studie folgende Ansätze untersucht:

- Der Beitrag einer Photovoltaikanlage (Photovoltaikanlage mit und ohne Batteriespeicher) zur Deckung des Stromverbrauchs für die Kühlung.
- Dämmung einzelner, zu kühlender Räume (bspw. Schlafzimmer) zur Senkung des Klimakälteverbrauchs.

Beitrag einer Photovoltaikanlage zur Deckung des Stromverbrauchs für die Kühlung

Der Beitrag einer Photovoltaikanlage zur Deckung des Stromverbrauchs für die Kühlung wurde anhand von vier Szenarien für das Klima in Basel und das Klima in Lugano analysiert (Abschnitt 4.2.3.3). Tabelle 2 zeigt den Klimakälteverbrauch sowie die Einstellung der Kühlung in diesen Szenarien.

Ebenso wurden zwei Photovoltaikanlagen mit unterschiedlicher Leistung ($10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ nach MuKE (EnDK, 2018a) und $30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$) definiert, die mit zwei Batterien unterschiedlicher Kapazität (1/1'000 bzw. 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage) kombiniert wurden. Somit wurden sechs verschiedene Anlagen (Tabelle 3 und Tabelle 4) analysiert.

Der Deckungsgrad der untersuchten Anlagen ist in Tabelle 3 in relativen Zahlen dargestellt. Diese Ergebnisse weisen weder für das Klima in Basel und in Lugano noch für die verschiedenen untersuchten Jahre Unterschiede auf. Der Stromverbrauch für die Geräte und Beleuchtung beträgt ca. $18.4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, was höher ist als der Verbrauch für die Kühlung des vorgestellten Szenarios, ausser im warmen Jahr der Periode A1B für das Klima in Lugano. Der Stromverbrauch für die Geräte und Beleuchtung wird somit im Vergleich zum Verbrauch für die Kühlung dominierend. Daher sind die Ergebnisse für alle Szenarien ähnlich. Für das Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung» sind die Deckungsanteile etwas niedriger, weil der Stromverbrauch für die Kühlung etwas höher ist.

Der Deckungsgrad des Stromverbrauchs für Klimakälte sowie für Geräte und Beleuchtung mit einer Photovoltaikanlage mit und ohne Batterie wurde untersucht. Deckt die Photovoltaikanlage nur den Stromverbrauch für Klimakälte, gibt es deutliche Unterschiede in den einzelnen Szenarien. Deckt die Photovoltaikanlage auch den Stromverbrauch für Geräte und Beleuchtung, gleicht sich der Anteil des Eigenverbrauchs in den verschiedenen Szenarien an, wie im vorherigen Absatz erläutert. Der Deckungsgrad je Anlage und Szenario ist nachfolgend beschrieben.

Anlage zur Deckung des Stromverbrauchs für Klimakälte:

- Leistung Photovoltaikanlage $10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$:
 - Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung»:
 - Ohne Batterie: 15-25 %.
 - Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage – 1.5 kWh: 35-45 %.
 - Batterie mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage – 4.5 kWh: 40-55 %.
 - Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag»:
 - Ohne Batterie: 25-40 %.
 - Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage – 1.5 kWh: 40-60 %.
 - batterie mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage – 4.5 kWh: 50-70 %.
 - Szenarien «Split 24 °C ganzer Tag» und «Split 24 °C bei Belegung»:
 - Ohne Batterie: 50-70 % (ganzer Tag), 50-65 % (bei Belegung).

- Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage – 1.5 kWh: 60-80 % (ganzer Tag), 55-80 % (bei Belegung).
- Batterie mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage – 4.5 kWh: 70-90 % (ganzer Tag), 60-90 % (bei Belegung).
- Leistung Photovoltaikanlage 30 W/m²_{EBF}:
 - Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung»:
 - Ohne Batterie: 40-45 %.
 - Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage – 4.5 kWh: 55-65 %.
 - Batterie mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage – 13.5 kWh: 65-90 %.
 - Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag»:
 - Ohne Batterie: 55-70 %.
 - Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage – 4.5 kWh: 65-85 %.
 - batterie mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage – 13.5 kWh: 75-95 %.
 - Szenarien «Split 24 °C ganzer Tag» und «Split 24 °C bei Belegung»:
 - Ohne Batterie: 65-80 % (ganzer Tag), 60-75 % (bei Belegung).
 - Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage – 4.5 kWh: 75-95 % (ganzer Tag), 70-90 % (bei Belegung).
 - Batterie mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage – 13.5 kWh: 90-100 %.

Anlage zur Deckung des Stromverbrauchs für Klimakälte, Geräte und Beleuchtung:

- Leistung Photovoltaikanlage 10 W/m²_{EBF}:
 - Alle untersuchten Szenarien:
 - Ohne Batterie: 25-30 % (Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung»: 20-25 %).
 - Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage – 4.5 kWh: 30-35 % (Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung»: 25-30 %).
 - Batterie mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage – 13.5 kWh: 35-40 % (Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung»: 30-35 % und «Split 24 °C bei Belegung»: 35-45 %).
- Leistung Photovoltaikanlage 30 W/m²_{EBF}:
 - Alle untersuchten Szenarien:
 - Ohne Batterie: 35-45 % (ganzer Tag), 35-40 % (bei Belegung).
 - Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage – 4.5 kWh: 45-55 % (Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung»: 45-50 % und «Mobil 24 °C ganzer Tag»: 50-55 %).
 - Batterie mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage – 13.5 kWh: 65-75 % (Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung»: 55-65 %).

Durch die Installation einer Photovoltaikanlage mit einer grösseren Leistung (30 W/m²_{EBF}) kann ein höherer Eigenverbrauch gedeckt werden als durch eine Photovoltaikanlage mit geringerer Leistung (10

$\text{W/m}^2_{\text{EBF}}$) in Kombination mit einer Batterie. In diesem Fall ist eine grössere Batterie (mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion) im Vergleich zu einer kleineren Batterie (mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion) ebenfalls von Vorteil. Die Dimensionierung der Anlage sollte auf Basis einer Ökobilanzierung des gesamten Lebenszyklus (inklusive Winter) erfolgen.

Wie aus Tabelle 2 hervorgeht, kann die Kühlung mit mobilen Kompaktgeräten bei einer Solltemperatur von 22 °C bei Belegung einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtenergiebilanz eines Wohngebäudes haben. Der Energieverbrauch liegt bei 7.9 kWh/(m²a) und 10.9 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel und bei 10.2 kWh/(m²a) und 13.6 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Lugano. Wird jedoch ein Split-System bei einer Solltemperatur von 24 °C während des ganzen Tages verwendet, reduziert sich dieser Verbrauch auf 1.8 kWh/(m²a) und 3.2 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel und auf 2.8 kWh/(m²a) und 5.0 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Lugano. Wenn ein Grossteil dieser Energie durch eine Photovoltaikanlage gedeckt wird, kann der Stromverbrauch aus dem Netz zusätzlich reduziert werden. Mit einer Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von 10 $\text{W/m}^2_{\text{EBF}}$ nach MuKE (EnDK, 2018) dimensioniert wurde, liegt der Strombezug aus dem Netz bei 0.6 kWh/(m²a) und 1.0 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel und bei 0.9 kWh/(m²a) und 2.1 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Lugano. Mit einer Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von 30 $\text{W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert wurde, liegt der Strombezug aus dem Netz bei 0.4 kWh/(m²a) und 0.6 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel und bei 0.6 kWh/(m²a) und 1.5 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Lugano.

Der direkte Verbrauch von Strom aus der Photovoltaikanlage für die Kühlung ist sinnvoll, da die maximale Stromerzeugung im Sommer mit dem Kühlbedarf übereinstimmt. Eine Photovoltaikanlage zur Abdeckung des Stromverbrauchs für die Kühlung ist dann sinnvoll, wenn der Verbrauch hoch ist und in den Stunden mit Sonneneinstrahlung anfällt. Wenn eine Photovoltaikanlage zur Kühlung verwendet wird, ist es ratsam, die Photovoltaikanlage mit einer höheren Leistung zu dimensionieren als die in der MuKE 2014 (EnDK, 2015) gemäss Artikel 1.27 festgelegte Leistung von 10 $\text{W/m}^2_{\text{EBF}}$. Ebenso sollten die Stromspitzen reduziert werden, u.a. durch effiziente Systeme und einer Kühlung nur bei Belegung der Räume. Mit einer grösseren Photovoltaikanlage kann ein grösserer Teil des Verbrauchs abgedeckt werden als mit einer grösseren Batterie. Dies gilt insbesondere bei kompakten Geräten deren elektrische Leistung sehr hoch ist und deren Batterie sich sehr schnell entleert. Bei Split-Systemen mit einem viel geringerem Stromverbrauch ist ebenso eine grössere Photovoltaikanlage einer grösseren Batterie vorzuziehen.

Bei einem geringen Stromverbrauch für die Kühlung ist es sinnvoll, den Einsatz der Photovoltaikanlage inkl. Batterie nicht nur auf die Kühlung zu beschränken, sondern mit der Verwendung für Beleuchtung, Geräte oder sogar für Mobilität und Heizung mittels Wärmepumpen zu kombinieren. Der überschüssige Strom kann in jedem Fall ins Netz eingespeist werden. Auch ausserhalb der Kühlperiode leistet die Photovoltaikanlage einen Beitrag an die Stromversorgung, insbesondere im Winter (in Basel werden etwa 25 % des von einer Photovoltaikanlage erzeugten Stroms im Winter produziert), wo i.d.R. insgesamt weniger erneuerbarer Strom produziert werden kann. Generell gilt es zu bedenken, dass sowohl Kühlgeräte als auch Photovoltaikanlagen und Batterien zu einer Erhöhung des Anteils an Grauer Energie führen können. Dank dieser Systeme kann zwar der zusätzliche Stromverbrauch für die Kühlung von Wohngebäuden gering gehalten werden, ihr Beitrag zur Grauen Energie und somit zu den Treibhausgasemissionen des Gebäudes sollte aber ebenso berücksichtigt und über den ganzen Lebenszyklus (inklusive Winter) betrachtet werden.

		Ref. Medi- anjahr (2004)	Ref. wärmstes Jahr (2003)	A1B Medi- anjahr (2063)	A1B warmes Jahr (2068)	Typ	Temperatur (°C)	ganze Whg.	ganzer Tag
BASEL	Basel - Mobil 22 °C bei Beleg.	7.9	12.0	10.9	15.6	Mobiles Ge- rät	22	Ja	Nein
	Basel - Mobil 24 °C ganzer Tag	3.8	7.9	7.2	11.8	Mobiles Ge- rät	24	Ja	Ja
	Basel - Split 24 °C ganzer Tag	1.8	4.2	3.2	6.2	Split-Gerät	24	Ja	Ja
	Basel - Split 24 °C bei Beleg.	1.3	3.2	2.4	4.9	Split-Gerät	24	Ja	Nein
LUGANO	Lugano - Mobil 22 °C bei Beleg.	10.2	14.1	13.6	20.3	Mobiles Ge- rät	22	Ja	Nein
	Lugano - Mobil 24 °C ganzer Tag	6.1	10.1	10.0	16.4	Mobiles Ge- rät	24	Ja	Ja
	Lugano - Split 24 °C ganzer Tag	2.8	5.3	5.0	8.8	Split-Gerät	24	Ja	Ja
	Lugano - Split 24 °C bei Beleg.	2.1	4.1	3.9	7.2	Split-Gerät	24	Ja	Nein

Tabelle 2: Stromverbrauch für Klimakälte (in kWh/(m²a) für die Kühlung der ganzen Wohnung in Abhängigkeit von System, Solltemperatur und Nutzungszeit für das aktuelle und zukünftige Klima in Basel und Lugano.

	Szenario	Leistung PV 10 W/m² _{EBF}			Leistung PV 30 W/m² _{EBF}		
		ohne Batterie	Batterie Kapazität 1/1'000 (1.5 kWh)	Batterie Kapazität 1/333 (4.5 kWh)	ohne Batterie	Batterie Kapazität 1/1'000 (4.5 kWh)	Batterie Kapazität 1/333 (13.5 kWh)
BASEL / LUGANO	Mobil 22 °C bei Belegung	15-25 %	35-45 %	40-55 %	40-45 %	55-65 %	65-90 %
	Mobil 24 °C ganzer Tag	25-40 %	40-60 %	50-70 %	55-70 %	65-85 %	75-95 %
	Split 24 °C ganzer Tag	50-70 %	60-80 %	65-90 %	65-80 %	75-95 %	90-100 %
	Split 24 °C bei Belegung	45-65 %	55-80 %	60-90 %	60-75 %	70-95 %	90-100 %

Tabelle 3: Deckungsgrad des Stromverbrauchs für Klimakälte (Leistung PV 10 W/m²_{EBF} und 30 W/m²_{EBF}) mit einer Photovoltaikanlage ohne Batterie, mit einer Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage und mit einer Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage für die untersuchten Szenarien.

	Szenario	Leistung PV 10 W/m² _{EBF}			Leistung PV 30 W/m² _{EBF}		
		ohne Batterie	Batterie Kapazität 1/1'000 (1.5 kWh)	Batterie Kapazität 1/333 (4.5 kWh)	ohne Batterie	Batterie Kapazität 1/1'000 (4.5 kWh)	Batterie Kapazität 1/333 (13.5 kWh)
BASEL / LUGANO	Mobil 22 °C bei Belegung	20-25 %	25-30 %	30-35 %	35-40 %	45-50 %	55-65 %
	Mobil 24 °C ganzer Tag	25-30 %	30-35 %	35-40 %	35-45 %	50-55 %	65-75 %
	Split 24 °C ganzer Tag	25-30 %	30-35 %	35-45 %	35-45 %	45-55 %	65-75 %
	Split 24 °C bei Belegung	25-30 %	30-35 %	35-40 %	35-40 %	45-55 %	65-75 %

Tabelle 4: Deckungsgrad des Stromverbrauchs für Klimakälte, Geräte und Beleuchtung (Leistung PV 10 W/m²_{EBF} und 30 W/m²_{EBF}) mit einer Photovoltaikanlage ohne Batterie, mit einer Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage und mit einer Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage für die untersuchten Szenarien.

Dämmung einzelner, zu kühlender Räume

Die Dämmung einzelner, zu kühlender Räume (Abschnitt 4.2.4) ermöglicht eine Reduzierung des Klimakälteverbrauchs zwischen 15 % und 20 %. In absoluten Zahlen ist diese Reduzierung jedoch sehr gering. Bei einer 24-Stunden-Kühlung mit einer Solltemperatur von 24 °C in den Medianjahren und warmen Jahren beider Perioden beträgt diese Einsparung sogar weniger als 0.5 kWh/(m²a) bzw. 1.0 kWh/(m²a). Andere Massnahmen, wie z. B. bewegliche Sonnenschutzelemente, die Reduzierung der internen Wärmeerträge durch effizientere Geräte und Beleuchtung oder eine effiziente Nachtlüftung, können effektiver sein als die Dämmung der zu kühlenden Räume.

Aktuelle Gesetzgebungen

Die aktuellen Vorschriften basieren auf Klimadaten, die aus dem Zeitraum von 1984 bis 2003 ausgearbeitet wurden. Sobald die neuen Klimadaten des Projekts «Klimadaten der Zukunft für Planende: Klimawandel und Merkblatt SIA 2028» (NCCS, 2020) veröffentlicht werden, wäre eine Überprüfung der in der Norm festgelegten Anforderungen, in Bezug auf die Gewährleistung der thermischen Behaglichkeit in den Gebäuden unter Berücksichtigung des zukünftigen Klimas, zu empfehlen. Wünschenswert wäre auch, dass die MuKE und die Kantone die Anforderungen an die Kühlung präzisieren – derzeit werden die Anforderungen bei Neubauten indirekt formuliert und durch den gewichteten Energiebedarf pro Jahr für Heizung, Warmwasser, Lüftung und Klimatisierung begrenzt. Dazu gehört bspw. einen maximal zulässigen Anteil von nicht erneuerbaren Energien zur Deckung des Energieverbrauchs für Kühlung (z. B. durch eine Photovoltaikanlage vor Ort oder Geocooling durch Erdsonden) festzulegen oder Mindestanforderungen an die Energieeffizienz von kleinen Kühlanlagen, wie z. B. Split-Systemen, zu formulieren.

Fazit und allgemeine Empfehlungen

Aufbauend auf den zuvor beschriebenen Ergebnissen konnten Empfehlungen formuliert werden, wie die Kühlung von Wohnräumen möglichst umweltfreundlich erfolgen kann. Die wichtigsten Erkenntnisse sind nachfolgend zusammengefasst:

- Die Sicherstellung eines behaglichen Raumklimas in Wohngebäuden sollte in erster Linie durch Massnahmen für den sommerlichen Wärmeschutz (sowohl im Gebäude als auch in der Umgebung), Massnahmen zur Vermeidung von solaren und internen Wärmegewinnen sowie Massnahmen zur Abfuhr von entstandenen Wärmelasten erfolgen. Dies ist der Ausgangspunkt für ein Gebäude mit einer hohen Energieeffizienz.
- Die Solltemperatur, die Anzahl der gekühlten Räume sowie die Betriebszeiten der Kühlgeräte bestimmen den Kühlbedarf massgeblich. Eine angemessene Nutzung der Kühlgeräte, d.h. nur während der Nutzungszeiten des Raumes und bei einer nicht zu tiefen Solltemperatur (z.B. 25.5 °C), sollte berücksichtigt werden. Dadurch kann der Kühlbedarf heute und in Zukunft möglichst geringgehalten werden. Allerdings bedeutet die Kühlung der Wohnung nur bei Belegung auch eine geringere Verbrauchsspitze, was bei den in dieser Studie untersuchten Systemen zu einer geringeren elektrischen Leistung führt.
- Split-Systeme sind viel effizientere Kühleysteme als mobile Kühlgeräte. Jedoch haben beide Systeme auch einige Nachteile:
 - sie verursachen Aussen- und Innenlärm;
 - sie geben Abwärme an die Aussenluft ab, was das Mikroklima der Umgebung verändert und den Wärmeinseleffekt in städtischen Gebieten verstärkt;
 - sie können zu Zugluft führen, was für die Nutzenden unbehaglich sein kann;
 - sie können klimaschädliche Kältemittel enthalten, welche die globale Erderwärmung verstärken;
 - sie können zu Überlastungen des Stromnetzes führen.
- Besser als Split-Systeme oder mobile Klimageräte sind Systeme, welche die Wärme aus Siedlungsgebieten abführen und über einen hohen Anteil an Freecooling verfügen, wie z.B. Wärmepumpen, welche auf Erdsonden, Anergienetzen oder Grund- und Oberflächenwasser basieren. Diese Systeme nehmen die Energie i.d.R. über das bestehende Heizungssystem auf, was zu weniger Lärm und einem höheren Komfort im Gebäude führt. Ebenfalls kann die Gebäudeträgheit ausgenutzt und somit Stromspitzen vermindert werden. Wenn mit dem Heizungssystem auch gekühlt werden kann,

fällt für die Kühlung zudem keine zusätzliche graue Energie an. Insbesondere bei Erdsonden ist die aktive Kühlung dabei sogar eine einfache und effiziente Regenerationsmöglichkeit für die Sonden.

- Durch die Kombination mit einer Photovoltaikanlage kann ein Grossteil des Stromverbrauchs für Kühlung gedeckt werden, Batterien können diesen Stromverbrauch zusätzlich decken. Generell gilt aber, dass durch eine grössere Photovoltaikanlage eine höhere Deckung des Stromverbrauchs für Kühlung ermöglicht werden kann als durch den Einsatz einer Batterie. Die Dimensionierung der Photovoltaikanlage und der Batterie sollte auf Basis einer Ökobilanzierung des gesamten Lebenszyklus der Anlage erfolgen.
- Bei einer Revision der aktuellen Vorschriften sollten künftige Klimaentwicklungen (Temperaturanstieg) und deren Auswirkungen (Überhitzung und mehr Bedarf an Kühlung) berücksichtigt werden. Dadurch kann ein hoher thermischer Komfort – heute und in Zukunft – gewährleistet werden. Es wird empfohlen, die Notwendigkeit von Mindestanforderungen für den maximal zulässigen Anteil an nicht erneuerbaren Energien zur Deckung des Energieverbrauchs für die Kühlung von Wohngebäuden zu prüfen.

In dieser Studie wurde der Stromverbrauch für eine dezentrale Kühlung und der Beitrag einer Photovoltaikanlage – mit und ohne Batterie – zur Deckung des Stromverbrauchs für die Kühlung in Wohngebäuden untersucht. Eine Ökobilanzierung des gesamten Lebenszyklus von solchen Anlagen könnte weitere wichtige Erkenntnisse im Umgang mit umweltfreundlichen Ansätzen zur Kühlung von Wohnräumen liefern.

Résumé

Contexte

Si les émissions globales de gaz à effet de serre poursuivent leur croissance actuelle, la température annuelle moyenne sera de 3.3 à 5.4 °C plus élevée à la fin du 21^e siècle (en comparaison avec la période 1981-2010) (NCCS, 2018). Cette hausse de la température aura d'importantes répercussions sur les besoins en énergie et le confort thermique des bâtiments. On constate déjà aujourd'hui une augmentation de la demande d'appareils de refroidissement mobiles pour les logements, et cette tendance va se renforcer. Les raisons de cet intérêt sont le prix modéré de tels équipement, la facilité d'accès et la possibilité de les mettre en place sans transformation constructive majeure. Cependant, les appareils de refroidissement mobiles sont généralement très peu efficaces et peuvent, en cas d'utilisation régulière, causer des besoins d'énergie conséquents. Afin d'atteindre les objectifs de la stratégie énergétique 2050, le thème du refroidissement doit donc recevoir plus d'attention, particulièrement en vue du changement climatique.

Objectifs du projet

Dans cette étude, différentes mesures ont été analysées pour comprendre comment des solutions de refroidissement décentralisées (appareils de refroidissement mobiles, systèmes split) peuvent être exploitées de la manière la plus écologique possible dans les logements, c'est-à-dire en gardant la consommation d'énergie au minimum. La combinaison d'appareils de refroidissement mobiles avec des installations photovoltaïques en est un exemple. L'objectif de cette étude est le développement de différentes solutions capables de couvrir les besoins en refroidissement du logement avec le minimum d'impact sur l'environnement.

Méthode

Le projet se divise en deux parties.

Dans la première phase du projet, les besoins en refroidissement d'un appartement ont été analysés sous considération des données climatiques actuelles et futures pour différentes conditions d'utilisation, différents appareils de refroidissement et différents niveaux d'efficacité. Pour ce faire, plusieurs scénarios ont été définis, simulés et enfin évalués à l'aide du logiciel IDA ICE 4.8. L'étude a également évalué dans quelle mesure il serait possible de couvrir la consommation électrique pour le refroidissement avec une installation photovoltaïque, avec ou sans batterie.

Les simulations se basent sur l'appartement sous toit d'un bâtiment de référence existant (Section 3.4). L'immeuble d'habitation, construit en 2014, a reçu la certification Minergie®. L'appartement étudié est une construction massive. Il compte 4,5 pièces et occupe un angle avec un séjour au sud-ouest et trois chambres à coucher orientées vers le nord-est. On suppose qu'aucune ombre n'est projetée par les bâtiments avoisinants. Les données climatiques futures (Section 3.1) sont basées sur les projections climatiques du scénario d'émissions moyennes A1B (CH2011, 2011) de la période « 2060 » (2045-2074). Pour le climat actuel, l'étude se base sur la période de référence « 1995 » (1980-2009). La ville de Bâle (station Bâle-Binningen) et la ville de Lugano (Station Lugano) ont été choisies comme lieux de référence climatique. Les simulations ont été conduites en tenant compte de quatre années spécifiques : l'année moyenne de la période de référence (2004), l'année la plus chaude de la période de référence (2003), l'année moyenne de la période A1B (2063) et l'année la plus chaude de la période A1B (2068).

L'étude se base sur l'utilisation d'un appareil compact mobile ainsi que d'un système multi-split (Section 3.2). L'appareil compact mobile correspond à la classe d'efficacité énergétique A avec un coefficient d'efficacité nominal (EER) pour le refroidissement de 2.6. Le système multi-split correspond à la classe d'efficacité énergétique A++ avec un coefficient d'efficacité énergétique saisonnier (SEER) pour le refroidissement de 7.5 – il est à noter que des méthodes différentes sont utilisées pour calculer l'efficacité des deux systèmes, qui ne sont donc pas directement comparables. Pour les scénarios où l'ensemble de l'appartement est refroidi, on suppose que toutes les pièces disposent d'un appareil mobile / appareil intérieur avec une puissance de 3.5 kW dans le séjour et une puissance de 2kW dans chaque chambre à coucher. Pour

les scénarios où seul le séjour ou les chambres à coucher sont refroidis, uniquement ces pièces sont équipées d'un appareil de refroidissement.

Dans la seconde phase de projet, les législations actuelles et en particulier la MuKE 2014 (EnDK, 2018a) et la norme SIA 180 (SIA, 2014) ont été revues (Section 4.3) afin de prendre en compte les répercussions du changement climatique. Enfin, de potentielles adaptations de ces normes ont été discutées.

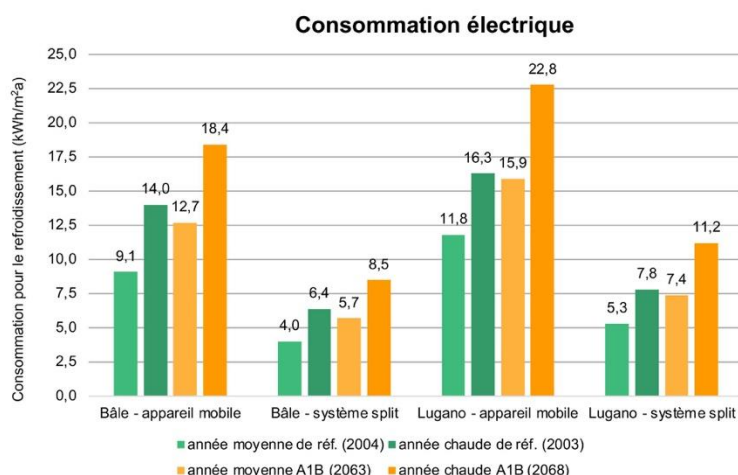
Résultats

Différentes stratégies ont été analysées pour proposer des systèmes de refroidissement décentralisés qui soient respectueux de l'environnement. Les stratégies étudiées comptent notamment des mesures de réduction de la consommation d'énergie, l'addition d'installations photovoltaïques avec ou sans batteries, ainsi que l'isolation thermique de pièces individuellement refroidies.

Les paramètres suivants ont été pris en compte pour réduire la consommation énergétique des appareils de refroidissement (Section 4.2.2) :

- Type d'appareil (système split ou appareil mobile).
- Température cible.
- Nombre de pièces refroidies.
- Horaire de fonctionnement des appareils de refroidissement.

Un scénario de référence a été défini pour comparer les différentes mesures (Graphique 1). Pour ce scénario, on suppose que l'appartement entier est refroidi à 22 °C pendant toute la journée. Avec le climat de Bâle et le scénario de référence, la consommation électrique pour le refroidissement avec des appareils mobiles s'élève à 9.1 kWh/(m²a) pour l'année moyenne de la période de référence, à 14.0 kWh/(m²a) pour l'année la plus chaude de la période de référence, à 12.7 kWh/(m²a) pour l'année moyenne de la période A1B et à 18.7 kWh/(m²a) pour l'année la plus chaude de la période A1B. Pour le climat de Lugano, la consommation électrique pour le refroidissement s'élève à 11.8 kWh/(m²a) pour l'année moyenne de la période de référence, à 16.3 kWh/(m²a) pour l'année la plus chaude de la période de référence, à 15.9 kWh/(m²a) pour l'année moyenne de la période A1B et à 22.8 kWh/(m²a) pour l'année la plus chaude de la période A1B. La consommation électrique d'un système split pour ce même scénario et pour le climat de Bâle s'élève 4.0 kWh/(m²a) pour l'année moyenne de la période de référence, 6.4 kWh/(m²a) pour l'année la plus chaude de la période de référence, 5.7 kWh/(m²a) pour l'année moyenne de la période A1B et 8.5 kWh/(m²a) pour l'année la plus chaude de la période A1B. Pour le climat de Lugano, la consommation d'électricité s'élève respectivement à 5.3 kWh/(m²a), 7.8 kWh/(m²a), 7.4 kWh/(m²a) et 11.2 kWh/(m²a) pour les années correspondantes.



Graphique 1: Consommation électrique pour le refroidissement d'un appartement complet pendant la journée entière afin de préserver une température de 22 °C avec les données climatiques actuelles et futures dans les villes de Bâle et Lugano. Le refroidissement utilise des appareils compacts mobiles et des systèmes split.

Le Tableau 1 montre les écarts existants pour les besoins en refroidissement de l'appartement analysé entre le scénario de référence et les mesures définies précédemment, ainsi qu'entre les paramètres du

climat local et ceux du réchauffement climatique. Une variation de chaque paramètre a été étudiée, les écarts sont indiqués en pourcents. Un appareil split a par exemple été comparé à un appareil mobile sous le paramètre « type d'appareil », et les températures cibles de 24 °C et 25.5 °C ont été comparées à une température cible de 22 °C sous la catégorie « température cible » (pour chaque appareil). Les valeurs absolues des besoins en refroidissement peuvent être retrouvées dans la Section 6.

CLIMAT		TYPE D'APPAREIL	toute la journée			selon l'utilisation			PIÈCES REFROIDIES	ANNÉE
			22 °C	24 °C	25.5 °C	22 °C	24 °C	25.5 °C		
TYPE D'APPAREIL	Bâle / Lugano	système split (vs. appareil mobile)	- 50-55 %	- 45-55 %	- 40-50 %	- 55-60 %	- 50-55 %	- 50 %	séjour, toute la journée : + 5 %, chambres toute la journée : - 5 % ; séjour selon l'utilisation : + 10 % ; chambres selon l'utilisation : - 10 %	aucune différence
CLIMAT	TYPE D'APPAREIL	24 °C (vs. 22 °C)			25.5 °C (vs. 22 °C)			PIÈCES REFROIDIES	HEURES DE FONCTIONNEMENT	
		année moyenne	année chaude	année moyenne	année chaude					
TEMPÉRATURE CIBLE	Bâle	appareil mobile	- 50-60 %	- 35-45 %	- 80-90 %	- 60-70 %	avec 24 °C : séjour + 5 % chambres - 5 % avec 25.5 °C: séjour + 3 % chambres - 3 %	aucune différence		
		système split	- 45-55 %	- 30-35 %	- 70-85 %	- 60-65 %				
	Lugano	appareil mobile	- 45-55 %	- 30-35 %	- 70-85 %	- 60-65 %	avec 24 °C: séjour + 5 % chambre - 5 % avec 25.5 °C: séjour + 2 % chambre - 2 %			
		système split	- 30-50 %	- 20-30 %	- 60-75 %	- 45-60 %				
CLIMAT	TYPE D'APPAREIL	séjour (vs. appartement entier)		chambres (vs. appartement entier)		ANNÉE	TEMPÉRATURE CIBLE			
		toute la journée	selon l'occupation	toute la journée	selon l'occupation					
PIÈCES REFROIDIES	Bâle	appareil mobile	- 45 %	- 35 %	- 50 %	- 65 %	aucune différence	aucune différence		
		système split	- 40 %	- 25 %	- 55 %	- 75 %				
	Lugano	appareil mobile	- 45 %	- 35 %	- 50 %	- 60 %				
		système split	- 40 %	- 25 %	- 55 %	- 70 %				
CLIMAT	TYE D'APPAREIL	selon l'utilisation (vs. toute la journée)				ANNÉE	TEMPÉRATURE CIBLE			
		appartement		séjour				chambres		
HEURES DE FONCTION.	Bâle	appareil mobile	- 10-30 %		bis 11 %		- 30-55 %		la réduction est un peu plus faible pour les années plus chaudes	pour 22 °C et des appareils mobiles, la réduction est légèrement plus faible et se situe vers les valeurs les plus basses du spectre donné
		système split	- 20-30 %		bis 8 %		- 45-75 %			
	Lugano	appareil mobile	- 10-25 %		bis 8 %		- 25-50 %			
		système split	- 15-25 %		bis 7 %		- 35-60 %			
CLIMAT	TYPE D'APPAREIL	22 °C		24 °C		25.5 °C		PIÈCES REFROIDIES	HEURES DE FONCTIONNEMENT	
		année moyenne	année chaude	année moyenne	année chaude	année moyenne	année chaude			
CLIMAT	Lugano (vs. Bâle)	appareil mobile	+ 25-30 %	+ 15-25 %	+ 55-65 %	+ 30-45 %	+ 100-110 %	+ 45-65 %	année moyenne, chambres, toute la journée : + 30 %	année chaude, chambres, selon l'utilisation: avec 22 °C et 25.5 °C : + 10 % avec 24 °C : + 50 %
		système split	+ 30-40 %	+ 20-40 %	+ 55-65 %	+ 30-45 %	+ 70-100 %	+ 35-70 %		
CLIMAT	TYPE D'APPAREIL	année moyenne période A1B (vs. année moy. période de réf.)			année chaude période A1B (vs. année chaude période de réf.)			PIÈCES REFROIDIES	HEURES DE FONCTIONNEMENT	
		22 °C	24 °C	25.5 °C	22 °C	24 °C	25.5 °C			
CHANGEMENT CLIMATIQUE	Bâle	appareil mobile	+ 40-45 %	+ 70-80 %	+ 100-155 %	+ 100-110 %	+ 3 fois	+ 6 fois	dans le séjour, l'augmentation est légèrement plus faible, dans les chambres elle est plus grande, en particulier avec une température cible de 25.5 °C	aucune différence
		système split	+ 45-50 %	+ 80-85 %	+ 100-145 %	+ 110-135 %	+ 3.5 fois	+ 5 fois		
	Lugano	appareil mobile	+ 30-40 %	+ 60-80 %	+ 120-165 %	+ 90-110 %	+ 2.5 fois	+ 5 fois		
		système split	+ 40-45 %	+ 70-85 %	+ 130-140 %	+ 110-130 %	+ 3 fois	+ 4.5 fois		

Tableau 1: Variation de la consommation de refroidissement pour l'appartement étudié en fonction des mesures recherchées : type d'appareil, température cible, nombre de pièces refroidies et nombre d'heures de fonctionnement des appareils, ainsi que les paramètres du climat local et du changement climatique.

Les conclusions les plus importantes sont décrites ci-dessous pour chacun des paramètres étudiés.

Type d'appareil (système split)

L'utilisation de systèmes split a été considérée comme alternative aux appareils compacts mobiles. Les systèmes split sont significativement plus efficaces que les appareils compacts, notamment grâce à leur efficacité sous charge partielle et leurs éléments extérieurs incluant le compresseur. Cette disposition permet d'éviter les pertes de chaleur à l'intérieur.

Puisque différentes méthodes de calcul sont utilisées, il est impossible de comparer directement les coefficients d'efficacité des deux types d'appareils de refroidissement selon l'étiquette énergétique. Généralement, on constate toutefois que même les appareils compacts les plus efficaces consomment plus d'énergie qu'un système split.

Il faudrait viser les classes d'efficacité énergétique suivantes pour les appareils de refroidissement :

- Pour les systèmes split avec une puissance de refroidissement inférieure à 4 kW : classe d'efficacité énergétique A+++ en mode refroidissement et A++ en mode chauffage.
- Pour les systèmes split avec une puissance de refroidissement supérieure à 4 kW et pour les systèmes multi-split pour plusieurs pièces : classe d'efficacité énergétique A++ en mode refroidissement et A+ en mode chauffage.
- Pour les appareils compacts mobiles : classe d'efficacité énergétique A+++.

Le réfrigérant de l'installation doit indiquer un GWP (Global Warming Potential, voir Section 1.2) de moins de 750, ce qui fait du réfrigérant R32 une bonne solution. Le réfrigérant R290 (propane) serait optimal avec son GWP de 3, mais il n'existe aucun appareil de refroidissement fonctionnant avec ce réfrigérant à ce jour. Le réfrigérant R410A présente un potentiel d'émission de gaz à effet de serre trois fois plus élevé et sera interdit dès le 1^{er} janvier 2025. Les installations qui l'utilisent sont donc à éviter.

La consommation électrique pour le refroidissement d'un système multi-split a été comparée à celle d'un appareil compact mobile. Les appareils split permettent une réduction de la consommation d'environ 50 %. La réduction est un peu plus élevée pour une température cible de 22 °C et un peu plus faible pour une température cible de 25.5 °C. La réduction est d'autant plus importante que le refroidissement n'est activé que lorsqu'une pièce est occupée. Dans ce cas, la réduction est un peu plus faible pour un refroidissement limité au séjour et un peu plus élevée pour le refroidissement des chambres à coucher. Les différences liées au climat local ou aux années étudiées (actuelles et futures) sont en revanche négligeables.

La meilleure efficacité énergétique et la charge partielle des systèmes split ne réduisent pas seulement la consommation d'énergie, mais permettent également d'éviter les pointes de courant sur le réseau. Les charges maximales sur le réseau électrique peuvent ainsi être réduites.

Température cible

La consommation d'électricité pour un refroidissement aux températures cibles de 24 °C et 25.5 °C a été comparée à la consommation pour un refroidissement à une température cible de 22 °C. La consommation du refroidissement en fonction de la température cible varie selon le climat local, le type d'appareil et l'année. La réduction de la consommation pour une température cible plus élevée dépend principalement de l'endroit. Les économies d'énergie suivantes sont possibles avec des appareils de refroidissement mobiles durant les années moyennes des deux périodes considérées grâce au changement de la température cible (en comparaison à 22 °C) :

- Pour une température cible de 24 °C : 50-60 % pour le climat de Bâle et 45-55 % pour le climat de Lugano.
- Pour une température cible de 25.5 °C : 80-90 % pour le climat de Bâle et 70-85 % pour le climat de Lugano.

Avec des systèmes split, cette réduction est d'environ 5 % inférieure pour le climat de Bâle et 5-10 % inférieure pour le climat de Lugano.

Nombre de chambres refroidies

La consommation électrique nécessaire au refroidissement du séjour et des chambres à coucher a été comparée à celle du refroidissement de l'ensemble de l'appartement. La réduction de cette consommation dépend principalement des horaires de fonctionnement et du type d'appareil :

- Séjour : Avec les appareils mobiles, la réduction est de 45 % pour un refroidissement sur toute la journée et de 35 % pour un refroidissement selon l'occupation de la pièce. Avec les systèmes split, la réduction est de 40 % pour un refroidissement sur toute la journée et de 25 % pour un refroidissement selon l'occupation de la pièce.
- Chambre à coucher : Avec les appareils mobiles, la réduction est de 50 % pour un refroidissement sur toute la journée et de 65 % pour un refroidissement selon l'occupation des pièces. Avec les systèmes split, la réduction est de 55 % pour le refroidissement sur toute la journée et de 75 % pour un refroidissement selon l'occupation des pièces.

Cette réduction de la consommation reste la même pour le climat de Lugano, sauf pour la consommation du refroidissement des chambres à coucher selon l'occupation des pièces, qui est de 5 % inférieure. L'année analysée et la température cible n'ont presque aucune influence sur la consommation. Cependant, un refroidissement partiel de l'appartement (c'est-à-dire dans certaines pièces seulement) conduit à une hausse du nombre d'heures de surchauffe dans les pièces ne profitant pas du refroidissement.

Horaires de fonctionnement

La consommation électrique pour un refroidissement limité aux heures d'occupation des pièces a été comparée à la consommation d'un refroidissement étendu sur la journée entière. On considère les horaires suivants dans le cas d'un refroidissement activé uniquement dans les pièces occupées : de 6:00 à 21:00 pour le séjour et de 21:00 à 6:00 pour les chambres à coucher. Le climat local n'a pas d'influence sur la différence entre cette situation et le refroidissement de l'appartement entier. Avec une température cible de 22 °C pendant les années les plus chaudes de chaque période (actuelle et future), la réduction de la consommation électrique est légèrement inférieure pour les appareils compacts mobiles et légèrement plus élevée pour les systèmes split. Cette réduction dépend principalement des pièces refroidies :

- Appartement entier : 10-30 %.
- Séjour : 5-10 %.
- Chambre à coucher : 30-50 % (pour système split : 45-75 % pour le climat de Bâle ; 35-60 % pour le climat de Lugano).

Puisque le séjour est occupé pendant la journée et qu'il s'agit de la période pendant laquelle les appareils de refroidissement sont principalement utilisés, cette réduction n'est que de 5 %. Cette réduction est plus importante dans les chambres à coucher, où le refroidissement a lieu pendant la nuit car les températures intérieure et extérieure baissent simultanément.

Le climat local ainsi que l'augmentation de la température liée au réchauffement climatique sont d'autres paramètres ayant une influence importante sur la consommation électrique.

Climat

La consommation électrique pour le refroidissement avec le climat de Lugano a été comparée à celle du climat de Bâle. Comme prévu, le climat plus chaud de Lugano résulte en une consommation plus élevée. Cette augmentation, causée par le climat plus doux du Sud de la Suisse, dépend principalement des températures cibles et de l'année analysée. Le type d'appareil joue également un rôle important. Pour les années moyennes des deux périodes (actuelle et future), l'augmentation de la consommation électrique évolue comme indiqué ci-dessous :

- Appareil mobile :
 - Pour une température cible de 22 °C : 25-30 %.
 - Pour une température cible de 24 °C : 55-65 %.
 - Pour une température cible de 25.5 °C : 100-110 %.
- Système split :
 - Pour une température cible de 22 °C : 30-40 %.
 - Pour une température cible de 24 °C : 55-65 %.
 - Pour une température cible de 25.5 °C : 70-100 %.

Durant l'année la plus chaude de chaque période, l'augmentation de la consommation électrique est légèrement plus faible.

Changement climatique

Les consommations électriques pour le refroidissement de l'année moyenne et de l'année la plus chaude de la période A1B ont été comparées à celles de l'année moyenne et l'année la plus chaude de la période de référence. L'augmentation de la température future conduit à une consommation électrique plus élevée pour le refroidissement. Cette augmentation varie selon la température cible et le climat local. L'horaire de fonctionnement des appareils ne conduit cependant à aucun écart significatif. Enfin, cette augmentation est légèrement plus faible pour le refroidissement du séjour et plus grande pour le refroidissement des chambres à coucher, en particulier avec une température cible de 25.5 °C. Avec le changement climatique, il faut compter sur l'augmentation suivante de la consommation pour le refroidissement de l'appartement entier :

- Année moyenne de la période A1B :
 - Bâle :
 - Pour une température cible de 22 °C : 40-45 %.
 - Pour une température cible de 24 °C : 70-80 %.
 - Pour une température cible de 25.5 °C : 100-155 %.
 - Lugano :
 - Pour une température cible de 22 °C : 30-40 %.
 - Pour une température cible de 24 °C : 60-80 %.
 - Pour une température cible de 25.5 °C : 120-165 %.
- Année la plus chaude de la période A1B :
 - Bâle :
 - Pour une température cible de 22 °C : 100-110 %.
 - Pour une température cible de 24 °C : 3 fois plus.
 - Pour une température cible de 25.5 °C : 6 fois plus.
 - Lugano :
 - Pour une température cible de 22 °C : 90-110 %.
 - Pour une température cible de 24 °C : 2.5 fois plus.
 - Pour une température cible de 25.5 °C : 5 fois plus.

Le type d'appareil n'engendre aucun changement significatif. L'augmentation de la consommation électrique pour le refroidissement est légèrement plus haute avec des systèmes split si la température cible est de 22 °C ou 24 °C (environ 5 % pour l'année moyenne et environ 10-50 % pour l'année la plus chaude

de la période A1B), et plus basse si la température cible est de 25.5 °C (environ 10-20 % pour l'année moyenne et environ 50-100% pour l'année la plus chaude de la période A1B).

On peut en déduire que la consommation électrique pour le refroidissement va augmenter fortement à l'avenir (de près de 70 % pour une température cible de 24 °C et une année moyenne). L'installation d'un système de refroidissement plus efficace, tel que les systèmes split ou multi-split, et une utilisation modérée (limitée aux horaires d'utilisation des pièces et à une température cible raisonnable, p. ex. 24-25.5 °C) permettent une réduction considérable de la consommation électrique pour le refroidissement par rapport à une utilisation intense d'appareils de refroidissement mobiles (refroidissement de l'appartement entier pendant toute la journée à une température cible de 22 °C). Cette meilleure configuration réduit la consommation électrique pour le refroidissement d'environ 75-85 % avec le climat de Bâle et d'environ 70-80 % avec le climat de Lugano pour une température cible de 24 °C, et d'environ 85-95 % pour le climat de Bâle et d'environ 80-90 % pour le climat de Lugano avec une température cible de 25.5 °C (voir Section 6).

Mesures supplémentaires

En plus des paramètres évoqués ci-dessus, les approches suivantes ont été étudiées dans le cadre de l'étude :

- L'apport d'une installation photovoltaïque (avec ou sans batterie) pour couvrir la consommation électrique.
- L'isolation thermique de pièces individuelles (p. ex. chambres à coucher) pour réduire la consommation électrique due au refroidissement.

Apport d'une installation photovoltaïque pour couvrir la consommation électrique du refroidissement

L'apport d'une installation photovoltaïque pour couvrir la consommation électrique a été étudiée pour quatre scénarios prenant en compte le climat de Bâle et le climat de Lugano (Section 4.2.3.3). Le Tableau 2 montre la consommation et les configurations du refroidissement pour ces scénarios.

Deux installations photovoltaïques avec différentes puissances (10 W/m²_{SRE} selon MuKEN (EnDK, 2018a) et 30 W/m²_{SRE}) combinées à deux batteries avec différentes capacités (1/1'000 et 1/333 de l'électricité produite à l'année par les installations photovoltaïques) ont été choisies. Ainsi, six installations différentes ont été analysées (Tableau 3 et Tableau 4).

Le Tableau 3 illustre le taux de couverture des installations photovoltaïques exprimé en nombres relatifs. Ces résultats ne montrent aucune différence entre les climats de Bâle et de Lugano ou entre les différentes années étudiées. La consommation d'énergie pour les appareils électroménagers et l'éclairage est d'environ 18.4 kWh/(m²a) et donc supérieure à la consommation du refroidissement dans les scénarios étudiés, à l'exception de l'année la plus chaude de la période A1B pour le climat de Lugano. La consommation électrique pour les appareils ménagers et l'éclairage est donc prépondérante par rapport à la consommation du refroidissement. Cela explique pourquoi les résultats sont similaires pour tous les scénarios. Le taux de couverture est légèrement plus faible pour le scénario « mobile 22 °C selon l'occupation », car les besoins en refroidissement sont plus élevés.

Le taux de couverture de la consommation électrique pour le refroidissement ainsi que celui pour les appareils électroménagers et l'éclairage ont également été étudiés pour une installation photovoltaïque avec ou sans batterie. Si l'installation photovoltaïque ne couvre que la consommation électrique due au refroidissement, une différence significative apparaît entre les différents scénarios. Si l'installation photovoltaïque couvre également la consommation électrique des appareils ménagers et de l'éclairage, la part de consommation électrique propre à chaque scénario s'égale, comme expliqué dans le paragraphe précédent. Les taux de couverture selon l'installation sont décrits ci-dessous.

Installation pour la couverture de la consommation électrique du refroidissement :

- Installation photovoltaïque d'une puissance de $10 \text{ W/m}^2_{\text{SRE}}$:
 - Scénario « mobile 22 °C selon l'occupation » :
 - Sans batterie : 15-25 %.
 - Batterie avec une capacité de 1/1'000 de la production électrique annuelle de l'installation photovoltaïque – 1.5 kWh : 35-45 %.
 - Batterie avec une capacité de 1/333 de la production électrique annuelle de l'installation photovoltaïque – 4.5 kWh : 40-55 %.
 - Scénario « mobile 24 °C toute la journée » :
 - Sans batterie : 25-40 %.
 - Batterie avec une capacité de 1/1'000 de la production électrique annuelle de l'installation photovoltaïque – 1.5 kWh : 40-60 %.
 - Batterie avec une capacité de 1/333 de la production électrique annuelle de l'installation photovoltaïque – 4.5 kWh : 50-70 %.
 - Scénarios « split 24 °C toute la journée » et « split 24 °C selon l'occupation » :
 - Sans batterie : 50-70 % (toute la journée), 50-65 % (selon l'occupation).
 - Batterie avec une capacité de 1/1'000 de la production électrique annuelle de l'installation photovoltaïque – 1.5 kWh : 60-80 % (toute la journée), 55-80 % (selon l'occupation).
 - Batterie avec une capacité de 1/333 de la production électrique annuelle de l'installation photovoltaïque – 4.5 kWh : 70-90 % (toute la journée), 60-90 % (selon l'occupation).
- Installation photovoltaïque d'une puissance de $30 \text{ W/m}^2_{\text{SER}}$:
 - Scénario « mobile 22 °C selon l'occupation » :
 - Sans batterie : 40-45 %.
 - Batterie avec une capacité de 1/1'000 de la production électrique annuelle de l'installation photovoltaïque – 4.5 kWh : 55-65 %.
 - Batterie avec une capacité de 1/333 de la production électrique annuelle de l'installation photovoltaïque – 13.5 kWh : 65-90 %.
 - Scénario « mobile 24 °C toute la journée » :
 - Sans batterie : 55-70 %.
 - Batterie avec une capacité de 1/1'000 de la production électrique annuelle de l'installation photovoltaïque – 4.5 kWh : 65-85 %.
 - Batterie avec une capacité de 1/333 de la production électrique annuelle de l'installation photovoltaïque – 13.5 kWh : 75-95 %.
 - Scénarios « split 24 °C toute la journée » et « split 24 °C selon l'occupation » :
 - Sans batterie : 65-80 % (toute la journée), 60-75 % (selon l'occupation).
 - Batterie avec une capacité de 1/1'000 de la production électrique annuelle de l'installation photovoltaïque – 4.5 kWh : 75-95 % (toute la journée), 70-90 % (selon l'occupation).
 - Batterie avec une capacité de 1/333 de la production électrique annuelle de l'installation photovoltaïque – 13.5 kWh : 90-100%.

Installation pour la couverture de la consommation électrique du refroidissement, des appareils ménagers et de l'éclairage :

- Installation photovoltaïque d'une puissance de $10 \text{ W/m}^2_{\text{SRE}}$:
 - Tous les scénarios analysés :
 - Sans batterie : 25-30 % (scénario « mobile 22 °C selon l'occupation » : 20-25 %).

- Batterie avec une capacité de 1/1'000 de la production électrique annuelle de l'installation photovoltaïque – 4.5 kWh : 30-35 % (scénario « mobile 22 °C selon l'occupation » : 25-30 %).
- Batterie avec une capacité de 1/333 de la production électrique annuelle de l'installation photovoltaïque – 13.5 kWh : 35-40 % (scénarios « mobile 22 °C selon l'occupation » : 30-35 % et « split 24 °C selon l'occupation » 35-45 %).
- Installation photovoltaïque d'une puissance de 30 W/m²_{SRE} :
 - Tous les scénarios analysés :
 - Sans batterie : 35-45 % (toute la journée), 35-40 % (selon l'occupation).
 - Batterie avec une capacité de 1/1'000 de la production électrique annuelle de l'installation photovoltaïque – 4.5 kWh : 45-55 % (scénario « mobile 22 °C selon l'occupation » : 45-50 % et « mobile 24 °C toute la journée » : 50-55 %).
 - Batterie avec une capacité de 1/333 de la production électrique annuelle de l'installation photovoltaïque - 13.5 : 65-75 % (scénario « mobile 22 °C selon l'occupation » : 55-65 %).

La mise en place d'une installation photovoltaïque de forte puissance (30 W/m²_{SRE}) permet de couvrir une partie des besoins individuels plus importante que l'utilisation d'une installation photovoltaïque plus faible (30 W/m²_{SRE}) combinée à une batterie. Dans ce cas-là, une batterie plus grande (avec une capacité de 1/333 de la production électrique annuelle) est également plus avantageuse qu'une batterie plus petite (avec une capacité de 1/1'000 de la production électrique annuelle). Le dimensionnement de l'installation photovoltaïque devrait idéalement se baser sur le bilan écologique de l'ensemble du cycle de vie (hivers inclus).

Comme illustré dans le Tableau 2, le refroidissement avec des appareils compacts mobiles et une température cible de 22 °C peut exercer une influence importante sur le bilan énergétique global d'un immeuble locatif. La consommation électrique s'élève à près de 7.9 kWh/(m²a) et 10.9 kWh/(m²a) pour les années moyennes des deux périodes considérées pour le climat de Bâle, et à 10.2 kWh/(m²a) et 13.6 kWh/(m²a) pour les années moyennes des deux périodes pour le climat de Lugano. Toutefois, si un système split est utilisé durant toute la journée avec une température cible de 24 °C, le besoin d'énergie se réduit à 1.8 kWh/(m²a) et 3.2 kWh/(m²a) pour les années moyennes des deux périodes pour le climat de Bâle, et à 2.8 kWh/(m²a) et 5.0 kWh/(m²a) pour les années moyennes des deux périodes pour le climat de Lugano. La consommation électrique issue du réseau peut encore être réduite si une grande partie de cette énergie est produite par une installation photovoltaïque. Avec une installation photovoltaïque dimensionnée pour une puissance de 10 W/m²_{SRE} selon la MuKEN (EnDK, 2018), l'électricité retirée du réseau est réduite à 0.6 kWh/(m²a) et 1.0 kWh/(m²a) pour les années moyennes de deux périodes pour le climat de Bâle, et à 0.9 kWh/(m²a) et 2.1 kWh/(m²a) pour les années moyennes des deux périodes pour le climat de Lugano. Avec une installation photovoltaïque dimensionnée pour une puissance de 30 W/m²_{SRE}, l'électricité retirée du réseau est réduite à 0.4 kWh/(m²a) et 0.6 kWh/(m²a) pour les années moyennes de deux périodes pour le climat de Bâle, et à 0.6 kWh/(m²a) et 1.5 kWh/(m²a) pour les années moyennes des deux périodes pour le climat de Lugano.

La consommation d'énergie directement issue des installations photovoltaïques est particulièrement pertinente pour le refroidissement, puisque la production d'électricité maximale se situe en été et coïncide avec les besoins en refroidissement. Une installation photovoltaïque pour couvrir la consommation électrique est donc appropriée si la consommation est forte et se produit pendant les heures d'ensoleillement maximal. Si une installation photovoltaïque est utilisée pour alimenter le refroidissement, il est recommandé de la dimensionner pour une puissance supérieure aux 10 W/m²_{SRE} établis par la norme MuKEN 2014 (EnDK, 2015), l'article 1.27. De même, les pointes de consommation électrique peuvent être réduites, par exemple en utilisant un système plus efficace et en limitant le refroidissement aux heures où les pièces sont occupées. Une installation photovoltaïque plus grande permet de couvrir une partie plus

importante de la consommation qu'une meilleure batterie. Ceci est particulièrement vrai dans le cas d'appareils compacts dont la puissance électrique est très élevée, vidant ainsi la batterie rapidement. Pour les systèmes split avec une consommation électrique nettement inférieure, une surface photovoltaïque plus grande demeure plus efficace qu'une meilleure batterie.

Il est pertinent de ne pas limiter l'utilisation des installations photovoltaïques et des batteries au refroidissement lorsque la consommation électrique pour le refroidissement est faible, mais d'étendre au contraire leur utilisation à l'éclairage, aux appareils électroménagers ou même à la mobilité, ainsi que de la combiner à un chauffage à pompe à chaleur. L'électricité supplémentaire peut dans tous les cas être redistribuée dans le réseau. En dehors de la période de refroidissement, les installations photovoltaïques contribuent à l'approvisionnement électrique, ce particulièrement en hiver (à Bâle, environ 25 % de la production électrique d'une installation photovoltaïque reste exploitable), lorsque les énergies renouvelables sont généralement plus difficiles à exploiter.

Il est en outre important de tenir compte du fait que les appareils de refroidissement, les installations photovoltaïques et les batteries peuvent entraîner une augmentation de l'énergie grise. Bien qu'il soit possible de réduire l'énergie nécessaire au refroidissement avec ces systèmes, il est important de tenir compte de leur énergie grise et, par conséquent, de leur contribution aux émissions de gaz à effet de serre du bâtiment. L'ensemble du cycle de vie (hivers inclus) doit donc être pris en considération.

		réf. année moy. (2004)	réf. année chaude (2003)	A1B année moy. (2063)	A1B année chaude (2068)	type	tempéra- ture (°C)	appart. entier	journée entière
BÂLE	Bâle - mobile 22 °C selon occ.	7.9	12.0	10.9	15.6	appareil mobile	22	Oui	Non
	Bâle - mobile 24 °C journée ent.	3.8	7.9	7.2	11.8	appareil mobile	24	Oui	Oui
	Bâle - split 24 °C journée ent.	1.8	4.2	3.2	6.2	système split	24	Oui	Oui
	Bâle - split 24 °C selon occ.	1.3	3.2	2.4	4.9	système split	24	Oui	Non
LUGANO	Lugano - mobile 22 °C selon occ.	10.2	14.1	13.6	20.3	appareil mobile	22	Oui	Non
	Lugano - mobile 24 °C journée ent.	6.1	10.1	10.0	16.4	appareil mobile	24	Oui	Oui
	Lugano - split 24 °C journée ent.	2.8	5.3	5.0	8.8	système split	24	Oui	Oui
	Lugano - split 24 °C selon occ.	2.1	4.1	3.9	7.2	système split	24	Oui	Non

Tableau 2 : Consommation électrique (en kWh/(m²a)) pour le refroidissement de l'appartement entier en fonction de l'appareil, de la température cible, de l'horaire de fonctionnement et du climat futur de Bâle et Lugano.

	scénario	puissance PV 10 W/m² _{SRE}			puissance PV 30 W/m² _{SRE}		
		sans batterie	batterie et capacité de 1/1'000 (1.5 kWh)	batterie et capacité de 1/333 (4.5 kWh)	sans batterie	batterie et capacité de 1/1'000 (4.5 kWh)	batterie et capacité de 1/333 (13.5 kWh)
BÂLE / LUGANO	mobile 22 °C selon occupation	15-25 %	35-45 %	40-55 %	40-45 %	55-65 %	65-90 %
	mobile 24 °C journée entière	25-40 %	40-60 %	50-70 %	55-70 %	65-85 %	75-95 %
	split 24 °C journée entière	50-70 %	60-80 %	65-90 %	65-80 %	75-95 %	90-100 %
	split 24 °C selon occupation	45-65 %	55-80 %	60-90 %	60-75 %	70-95 %	90-100 %

Tableau 3 : Taux de couverture de la consommation électrique pour le refroidissement (puissance PV 10 W/m²_{SRE} et PV 30 W/m²_{SRE}) avec une installation photovoltaïque sans batterie, une installation photovoltaïque munie d'une batterie d'une capacité de 1/1'000 de la production annuelle de l'installation photovoltaïque et une installation photovoltaïque avec une batterie d'une capacité de 1/333 de la production électrique annuelle de l'installation photovoltaïque pour les scénarios analysés.

	scénario	puissance PV 10 W/m ² _{SRE}			puissance PV 30 W/m ² _{SRE}		
		sans batterie	batterie et capacité de 1/1'000 (1.5 kWh)	Batterie Kapazität 1/333 (4.5 kWh)	sans batterie	batterie et capacité de 1/1'000 (1.5 kWh)	Batterie Kapazität 1/333 (13.5 kWh)
BÂLE / LUGANO	mobile 22 °C selon occupation	20-25 %	25-30 %	30-35 %	35-40 %	45-50 %	55-65 %
	mobile 24 °C journée entière	25-30 %	30-35 %	35-40 %	35-45 %	50-55 %	65-75 %
	split 24 °C journée entière	25-30 %	30-35 %	35-45 %	35-45 %	45-55 %	65-75 %
	split 24 °C selon occupation	25-30 %	30-35 %	35-40 %	35-40 %	45-55 %	65-75 %

Tableau 4: Taux de couverture de la consommation électrique pour le refroidissement, les appareils ménagers et l'éclairage (puissance PV 10 W/m²_{SRE} et PV 30 W/m²_{SRE}) avec une installation photovoltaïque sans batterie, une installation photovoltaïque munie d'une batterie d'une capacité de 1/1'000 de la production annuelle de l'installation photovoltaïque et une installation photovoltaïque avec une batterie d'une capacité de 1/333 de la production électrique annuelle de l'installation photovoltaïque pour les scénarios analysés.

Isolation thermique de chambres individuelles destinées à être refroidies

L'isolation de chambres individuelles destinées à être refroidies (Section 4.2.4) permet une réduction de 15 % à 20 % des besoins en refroidissement. La valeur absolue de cette réduction reste cependant très faible. Un refroidissement sur 24 heures avec une température cible de 24 °C pendant l'année moyenne et l'année la plus chaude des deux périodes considérées ne permet qu'une économie respectivement de moins de 0.5 kWh/(m²a) et 1.0 kWh/(m²a). D'autres mesures peuvent être plus efficaces que l'isolation des pièces refroidies, tel que l'utilisation d'éléments de protection solaire mobiles, la réduction des gains thermiques internes des appareils ménagers et de l'éclairage ou l'augmentation de l'efficacité de la ventilation nocturne.

Législations en vigueur

Les réglementations en vigueur sont basées sur les données climatiques produites pour la période de 1984 à 2003. Il est recommandé de revoir les exigences définies par les différentes normes en lien avec le confort thermique dans les bâtiments en tenant compte du climat futur dès la publication des nouvelles données climatiques du projet « Klimadaten der Zukunft für Planende: Klimawandel und Merkblatt SIA 2028 » (NCCS, 2020). Il serait également désirable que la MuKE et les cantons précisent leurs exigences concernant le refroidissement, puisqu'en ce moment, ces exigences sont indirectement formulées pour les nouveaux bâtiments et sont limitées par les besoins en énergie pondérés pour le chauffage, l'eau chaude et la ventilation. Ces exigences pourraient notamment prendre la forme d'un taux d'énergie non-renouvelable maximum pour couvrir la consommation énergétique du refroidissement (par exemple avec des installations photovoltaïques sur place ou des sondes géothermique pour un géocooling) ou d'exigences minimales sur l'efficacité énergétique de petites installations de refroidissement telles que les systèmes split.

Résumé et recommandations générales

Sur la base des résultats décrits ci-dessus, les recommandations suivantes peuvent être formulées concernant la manière de refroidir les espaces de vie de manière respectueuse de l'environnement. Les conclusions principales sont résumées ci-dessous :

- Assurer un climat confortable dans les pièces d'un immeuble de logement doit se faire en premier lieu au moyen de mesures pour la protection contre la chaleur en été (tant à l'intérieur du bâtiment que dans ses environs), de mesures pour réduire les gains de chaleur internes et ceux dus à l'ensoleillement, ainsi que de mesures conduisant à l'élimination des charges thermiques existantes. Ces mesures permettent d'atteindre une haute efficacité énergétique au sein du bâtiment.
- La température cible, le nombre de pièces refroidies et le nombre d'heures de fonctionnement des appareils de refroidissement sont décisifs pour les besoins en refroidissement. Une utilisation raisonnable des appareils de refroidissement devrait être limitée aux heures où les pièces sont occupées et se baser sur une température cible assez élevée (p. ex. 25.5 °C). De cette manière, les besoins en refroidissement actuels et futurs restent aussi bas que possible. Toutefois, le refroidissement en fonction des heures d'occupation cause de légères pointes de consommation électrique, qui résultent en une puissance électrique plus faible pour les systèmes étudiés.

- Les systèmes split sont des systèmes de refroidissement nettement plus efficaces que les appareils de refroidissement mobiles. Cependant, les solutions ont toutes deux leurs désavantages également :
 - Ils causent des nuisances sonores à l'intérieur et à l'extérieur ;
 - Ils réchauffent l'air extérieur, ce qui peut influencer le climat dans les environs et intensifier l'effet d'îlot de chaleur dans les milieux urbains ;
 - Ils peuvent entraîner des courants d'air peu confortable pour les utilisateurs ;
 - Ils peuvent contenir des produits réfrigérants mauvais pour le climat et contribuant au réchauffement planétaire global ;
 - Ils peuvent conduire à une surcharge du réseau électrique.
- Les systèmes pouvant diriger la chaleur hors de la zone résidentielle et ceux utilisant une grande part de free-cooling offrent une meilleure solution que les systèmes split et les appareils de refroidissement mobiles. Ceci est par exemple le cas des pompes à chaleur à sondes géothermiques, des réseaux d'énergie ou des eaux souterraines et de surface. Ces systèmes retirent généralement leur énergie du système existant, ce qui réduit les nuisances sonores et augmente le confort au sein du bâtiment. De plus, profiter de l'inertie du bâtiment permet de réduire les pointes sur le courant. Par ailleurs, un système de chauffage capable également de refroidir permet d'éviter l'ajout d'énergie grise apportée par un système de refroidissement. Enfin, particulièrement en cas d'utilisation de sondes géothermiques, le refroidissement actif peut même devenir une solution de régénération simple et efficace pour les sondes.
- Une combinaison des systèmes de refroidissement avec des installations photovoltaïques permet de couvrir une grande partie de la consommation électrique due au refroidissement. L'ajout d'une batterie peut de plus contribuer à augmenter l'autoconsommation d'énergie photovoltaïque. Cependant, l'augmentation de la surface photovoltaïque permet généralement un taux de couverture de la consommation électrique pour le refroidissement plus haut que l'utilisation d'une batterie. Le dimensionnement des installations photovoltaïques et de la batterie devrait se baser sur un écobilan prenant en compte l'ensemble du cycle de vie du bâtiment.
- Le réchauffement climatique (augmentation future de la température globale) et ses répercussions (surchauffes et besoins accrus en refroidissement) sont à considérer lors d'une révision des exigences légales actuelles. Un meilleur confort thermique peut ainsi être assuré, aujourd'hui et à l'avenir. Il est recommandé de contrôler s'il est nécessaire de revoir les exigences concernant la part d'énergie non renouvelable minimale autorisée pour couvrir la consommation énergétique du refroidissement dans les immeubles de logement.

Dans cette étude, la consommation électrique d'un refroidissement décentralisé et la contribution d'installations photovoltaïques avec ou sans batterie pour la couverture de cette consommation ont été étudiées pour des immeubles d'habitation. Un bilan écologique prenant en compte l'ensemble du cycle de vie de ces installations pourrait révéler d'autres conclusions concernant les méthodes de refroidissement ainsi que de nouvelles approches respectueuses de l'environnement.

Riassunto

Situazione iniziale

Se le emissioni globali di gas a effetto serra dovessero continuare ad aumentare in maniera incontrollata, la temperatura media stagionale in Svizzera potrebbe aumentare di 3.3 – 5.4 °C rispetto al periodo 1981-2010 entro la fine del 21° secolo (NCCS, 2018). Questo aumento di temperatura avrà un impatto sul fabbisogno energetico e sul comfort termico negli edifici. Già oggi, la domanda di climatizzatori mobili nel settore residenziale è in aumento, una tendenza questa che si intensificherà ancora di più in futuro. Queste soluzioni sono infatti poco costose, facilmente reperibili sul mercato e la loro installazione non richiede particolari interventi costruttivi. Tuttavia, i climatizzatori mobili sono generalmente una misura di raffreddamento molto inefficiente e, se usati intensamente, possono causare un considerevole consumo di energia. Per raggiungere gli obiettivi della strategia energetica 2050 è pertanto necessario prestare maggiore attenzione alla questione del raffreddamento - soprattutto in vista del cambiamento climatico.

Obiettivi del progetto

Questo studio esamina varie misure per raffreddare gli spazi abitativi con soluzioni decentralizzate (climatizzatori mobili e sistemi split) nel modo più ecologico possibile, vale a dire con un fabbisogno e un consumo di energia minimi. Un esempio preso in considerazione è la combinazione di climatizzatori mobili con sistemi fotovoltaici. Sono stati inoltre analizzati i requisiti della legislazione attuale, fornendo al contempo indicazioni per possibili adattamenti. L'obiettivo dello studio è quello di sviluppare varie soluzioni per soddisfare la domanda di raffreddamento negli edifici residenziali nel modo più ecologico possibile - oggi e nelle condizioni climatiche future.

Procedimento / metodologia

Il progetto si articola su due campi d'azione.

Nella prima fase del progetto è stato esaminato il consumo energetico per il raffreddamento di un appartamento, tenendo conto delle condizioni climatiche attuali e future per diverse condizioni d'uso, differenti sistemi di raffreddamento e livelli di efficienza. A questo scopo sono stati definiti, simulati e quindi successivamente valutati vari scenari con l'ausilio del software IDA ICE 4.8. È stato inoltre analizzato in che misura un impianto fotovoltaico – con e senza sistema di accumulo a batteria – può coprire il consumo di energia elettrica necessario per il raffreddamento.

Le simulazioni sono state effettuate utilizzando un appartamento mansardato (capitolo 3.4) di un edificio di riferimento esistente. Il condominio è stato costruito nel 2014 ed è certificato Minergie®. L'appartamento in esame è un appartamento ad angolo di 4.5 locali in costruzione massiccia con una zona giorno orientata a sud-ovest e tre stanze orientate a nord-est. Si è supposto che non ci sarebbe stato alcun ombreggiamento da parte degli edifici vicini. I dati climatici futuri (capitolo 3.1) sono basati sulla proiezione climatica del periodo "2060" (2045-2074) per lo scenario medio di emissioni A1B (CH2011, 2011). Per il clima odierno, è stato considerato il periodo di riferimento "1995" (1980-2009). La città di Basilea (stazione di misura di Basilea-Binningen) e la città di Lugano (stazione di misura di Lugano) sono state selezionate come siti climatici. Le simulazioni sono state effettuate utilizzando quattro anni specifici: Anno mediano del periodo di riferimento (2004), anno più caldo del periodo di riferimento (2003), anno mediano del periodo A1B (2063), anno più caldo del periodo A1B (2068).

Nello studio sono stati considerati un'unità mobile compatta e un sistema multi-split (capitolo 3.2). L'unità compatta in questione corrisponde alla classe di efficienza energetica A con un indice di efficienza energetica in modalità di raffreddamento (EER) di 2.6. Il sistema multi-split corrisponde alla classe di efficienza energetica A++ ed ha un indice di efficienza energetica stagionale in modalità di raffreddamento (SEER) di 7.5 – sono applicati metodi diversi per calcolare l'efficienza di entrambi i sistemi, quindi non sono direttamente comparabili. Si è assunto che negli scenari in cui l'intera abitazione è raffreddata, tutte le stanze dispongono di un climatizzatore mobile o di un'unità interna con una potenza di raffreddamento di 3.5 kW nella zona giorno e di 2 kW in ogni camera da letto. Negli scenari in cui solo il soggiorno o solo le camere da letto sono raffreddati, si è assunto che solo questi locali sono dotati di un climatizzatore.

Nella seconda fase del progetto, la legislazione vigente (capitolo 4.3) – in particolare MoPEC 2014 (EnDK, 2018a) e la norma SIA 180 (SIA, 2014a) – è stata rivista tenendo conto anche degli effetti del cambiamento climatico. Successivamente sono stati discussi i possibili adattamenti.

Risultati

Sono state studiate diverse strategie per raffreddare gli spazi abitativi con sistemi decentralizzati nel modo più ecologico possibile. Queste includevano anche misure per ridurre i consumi energetici, l'aggiunta di un impianto fotovoltaico con e senza batterie o l'isolamento termico dei locali da raffreddare.

Per ridurre il consumo energetico dei climatizzatori sono stati analizzati i seguenti parametri (capitolo 4.2.2):

- Tipo di apparecchio (unità mobile compatta o sistemi split).
- Temperatura di consegna.
- Numero di locali raffreddati.
- Tempo di funzionamento delle unità di raffreddamento.

Per confrontare queste diverse misure è stato definito uno scenario di riferimento, il quale prevede che l'intero appartamento sia raffreddato durante tutto il giorno ad una temperatura di 22 °C. In questo scenario, il consumo energetico per il raffreddamento con apparecchi mobili e per il clima di Basilea è di 9.1 kWh/(m²a) per l'anno mediano del periodo di riferimento, 14.0 kWh/(m²a) per l'anno più caldo del periodo di riferimento, 12.7 kWh/(m²a) per l'anno mediano del periodo A1B e 18.4 kWh/(m²a) per l'anno caldo del periodo A1B. Per il clima di Lugano il consumo energetico per il raffreddamento è rispettivamente di 11.8 kWh/(m²a), 16.3 kWh/(m²a), 15.9 kWh/(m²a) e 22.8 kWh/(m²a). Il consumo energetico per il raffreddamento con sistemi split in questo scenario e per il clima di Basilea è di 4.0 kWh/(m²a) per l'anno mediano del periodo di riferimento, 6.4 kWh/(m²a) per l'anno più caldo del periodo di riferimento, 5.7 kWh/(m²a) per l'anno mediano del periodo A1B e 8.5 kWh/(m²a) per l'anno caldo del periodo A1B. Per il clima di Lugano il consumo energetico per il raffreddamento è rispettivamente di 5.3 kWh/(m²a), 7.8 kWh/(m²a), 7.4 kWh/(m²a) e 11.2 kWh/(m²a).

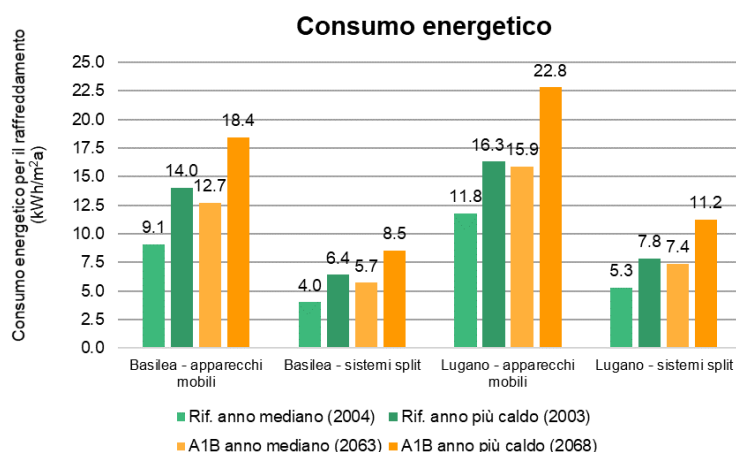


Figura 1: Consumo energetico per il raffreddamento dell'intero appartamento durante tutto il giorno ad una temperatura di consegna di 22 °C, per il clima attuale e futuro nelle località di Basilea e Lugano. Per il raffreddamento sono stati considerati apparecchi mobili compatti e sistemi split.

La Tabella 1 mostra le variazioni del consumo energetico per il raffreddamento dell'appartamento studiato in confronto allo scenario di riferimento definito sopra e a seconda delle misure applicate, della posizione geografica e dello scenario di cambiamento climatico. Per ogni parametro è stata analizzata una variante e calcolata la differenza in percentuale. Ad esempio, per il parametro «tipo di apparecchio» è stato confrontato un sistema split con un'unità mobile, oppure per il parametro «temperatura di consegna» le temperature di 24 °C e 25.5 °C sono state confrontate con 22 °C (mantenendo invariato il tipo di apparecchio). I valori assoluti del consumo energetico per il raffreddamento sono presentati nella sezione 6.

	CLIMA	TIPO	tutto il giorno			con occupanti			LOCALI RAFFREDDATI	ANNO	
			22 °C	24 °C	25.5 °C	22 °C	24 °C	25.5 °C			
TIPO DI APPARECCHIO	Basilea / Lugano	apparecchio split (vs apparecchio mobile)	- 50-55 %	- 45-55 %	- 40-50 %	- 55-60 %	- 50-55 %	- 50 %	salotto tutto il giorno: + 5 %, camera tutto il giorno: - 5 %; salotto con occupanti: + 10 %, camera con occupanti: - 10 %	nessuna differenza	
	CLIMA	TIPO DI APPAR.	24 °C (vs. 22 °C)		25.5 °C (vs. 22 °C)				LOCALI RAFFREDDATI	TEMPO DI FUNZIONAMENTO	
			anni mediani	anni caldi	anni mediani	anni caldi					
TEMPERATURA DI CONSEGNA	Basilea	apparecchio mobile	- 50-60 %		- 35-45 %		- 80-90 %		- 60-70 %	a 24 °C: salotto + 5 % camera - 5 %	nessuna differenza
		apparecchio split	- 45-55 %		- 30-35 %		- 70-85 %		- 60-65 %	a 25.5 °C: salotto + 3 % camera - 3 %	
	Lugano	apparecchio	- 45-55 %		- 30-35 %		- 70-85 %		- 60-65 %	a 24 °C: salotto + 5 % camera - 5 %	
		apparecchio split	- 30-50 %		- 20-30 %		- 60-75 %		- 45-60 %	a 25.5 °C: salotto + 2 % camera - 2 %	
	CLIMA	TIPO DI APPAR.	salotto (vs intero appartamento)		camera da letto (vs intero appartamento)				ANNO	TEMPERATURA DI CONSEGNA	
			tutto il giorno	con occupanti	tutto il giorno	con occupanti					
LOCALI RAFFREDDATI	Basilea	apparecchio mobile	- 45 %		- 35 %		- 50 %		- 65 %	nessuna differenza	nessuna differenza
		apparecchio split	- 40 %		- 25 %		- 55 %		- 75 %		
	Lugano	apparecchio mobile	- 45 %		- 35 %		- 50 %		- 60 %		
		apparecchio split	- 40 %		- 25 %		- 55 %		- 70 %		
	CLIMA	TIPO DI APPAR.	con occupanti (vs tutto il giorno)						ANNO	TEMPERATURA DI CONSEGNA	
			appartamento		salotto	camera da letto					
TEMPO DI FUNZIONAMENTO	Basilea	apparecchio mobile	- 10-30 %		bis 11 %		- 30-55 %		negli anni caldi la riduzione è leggermente inferiore	a 22 °C e con apparecchi mobili la riduzione è leggermente inferiore e si situa verso il limite inferiore dell'intervallo	
		apparecchio split	- 20-30 %		bis 8 %		- 45-75 %				
	Lugano	apparecchio mobile	- 10-25 %		bis 8 %		- 25-50 %				
		apparecchio split	- 15-25 %		bis 7 %		- 35-60 %				
	CLIMA	TIPO DI APPAR.	22 °C		24 °C		25.5 °C		LOCALI RAFFREDDATI	TEMPO DI FUNZIONAMENTO	
			anni mediani	anni caldi	anni mediani	anni caldi	anni mediani	anni caldi			
CLIMA	Lugano (vs Basilea)	apparecchio mobile	+ 25-30 %	+ 15-25 %	+ 55-65 %	+ 30-45 %	+ 100-110 %	+ 45-65 %	anno mediano, camera tutto il giorno: + 30 %	anno caldo, camera con occupanti: a 22 °C e 25.5 °C: + 10 % a 24 °C: + 50 %	
		apparecchio split	+ 30-40 %	+ 20-40 %	+ 55-65 %	+ 30-45 %	+ 70-100 %	+ 35-70 %			
	CLIMA	TIPO DI APPAR.	anno mediano del periodo A1B (vs anno mediano del periodo di riferimento)			anno caldo del periodo A1B (vs anno mediano del periodo di riferimento)			LOCALI RAFFREDDATI	TEMPO DI FUNZIONAMENTO	
			22 °C	24 °C	25.5 °C	22 °C	24 °C	25.5 °C			
CAMBIAMENTO CLIMATICO	Basilea	apparecchio mobile	+ 40-45 %	+ 70-80 %	+ 100-155 %	+ 100-110 %	+ 3 volte	+ 6 volte	nel salotto l'aumento è leggermente inferiore; nella camera è più marcato, soprattutto alla temperatura di consegna di 25.5 °C	nessuna differenza	
		apparecchio split	+ 45-50 %	+ 80-85 %	+ 100-145 %	+ 110-135 %	+ 3.5 volte	+ 5 volte			
	Lugano	apparecchio mobile	+ 30-40 %	+ 60-80 %	+ 120-165 %	+ 90-110 %	+ 2.5 volte	+ 5 volte			
		apparecchio split	+ 40-45 %	+ 70-85 %	+ 130-140 %	+ 110-130 %	+ 3 volte	+ 4.5 volte			

Tabella 1: Variazione del consumo energetico per il raffreddamento dell'appartamento studiato a seconda delle misure applicate e dei parametri climatici (tipo di apparecchio, temperatura di consegna, numero di locali raffreddati, tempo di funzionamento, posizione geografica e scenario di cambiamento climatico).

I risultati più importanti sono descritti qui di seguito per ogni singolo parametro.

Tipo di apparecchio (sistemi split)

I sistemi split sono stati analizzati quale alternativa alle unità mobili compatte. I sistemi split sono molto più efficienti degli apparecchi compatti, in parte grazie al loro efficiente funzionamento a carico parziale e alla collocazione del compressore nell'unità esterna che evita la dispersione di calore residuo negli ambienti interni. Il coefficiente di prestazione di entrambi i sistemi di raffreddamento riportato sulle rispettive etichette energetiche non può tuttavia essere confrontato direttamente, in quanto i metodi di calcolo utilizzati sono diversi. In generale, anche l'apparecchio compatto più efficiente consuma comunque sempre più energia di un sistema split.

Le seguenti classi di efficienza energetica sono raccomandate:

- Apparecchi split con potenza di raffreddamento inferiore a 4 kW: classe di efficienza energetica A+++ in modalità di raffreddamento e A++ in modalità di riscaldamento.
- Apparecchi split con potenza di raffreddamento superiore a 4 kW e sistemi multi-split per più locali: classe di efficienza energetica A++ in modalità di raffreddamento e A+ in modalità di riscaldamento.
- Apparecchi mobili compatti: classe di efficienza energetica A+++.

Per quel che concerne il fluido refrigerante, questo deve avere un GWP (*Global Warming Potential*, v. capitolo 1.2) inferiore a 750. Il fluido refrigerante R32 rappresenta pertanto una buona soluzione, anche se ottimale sarebbe l'uso del refrigerante R290 (propano) con un GWP di 3. Per quest'ultimo però attualmente non ci sono climatizzatori sul mercato in grado di farne uso. Da evitare è l'impiego di sistemi che utilizzano il fluido refrigerante R410A, il quale ha un GWP di tre volte superiore e sarà vietato a partire dal 1° gennaio 2025.

Il consumo energetico per il raffreddamento con un sistema multi-split è stato confrontato con il consumo di apparecchi mobili compatti. I risultati mostrano che con gli apparecchi split il consumo può essere ridotto di circa il 50 %. Il risparmio energetico è leggermente inferiore con una temperatura di consegna di 25.5 °C e leggermente superiore con una temperatura di consegna di 22 °C. Se il raffreddamento avviene solo durante l'occupazione dei locali, la riduzione del consumo è ancora maggiore. Questa riduzione è leggermente inferiore per il raffreddamento della sola zona giorno e leggermente maggiore per il raffreddamento delle camere da letto. Le differenze dovute al clima locale o agli anni esaminati (presente e futuro) sono marginali.

Grazie alla maggiore efficienza energetica e al miglior funzionamento a carico parziale delle unità split, non si riducono solo i consumi energetici ma anche i carichi di punta e dunque la sollecitazione della rete elettrica.

Temperatura di consegna

Il consumo di energia elettrica per il raffreddamento alle temperature di consegna di 24 °C e 25.5 °C è stato confrontato con il consumo alla temperatura di consegna di 22 °C. È risultato che il consumo in base alla temperatura di consegna varia a seconda del clima locale, del tipo di apparecchio e dell'anno. La riduzione del consumo dovuta ad una temperatura di consegna più elevata dipende tuttavia principalmente dal clima locale. Con climatizzatori mobili è possibile ottenere i seguenti risparmi energetici negli anni medi di entrambi i periodi considerati modificando la temperatura di consegna di 22 °C:

- Temperatura di consegna di 24 °C: 50-60 % per il clima di Basilea e 45-55 % per il clima di Lugano.
- Temperatura di consegna di 25.5 °C: 80-90 % per il clima di Basilea e 70-85 % per il clima di Lugano.

Nel caso di apparecchi split, questa riduzione è inferiore del 5% per il clima di Basilea e del 5-10% per il clima di Lugano. In un anno caldo questa riduzione è del 15-20% inferiore per entrambi i tipi di sistema e per entrambe le località.

Numero di locali raffreddati

Il consumo di energia elettrica per il raffreddamento della zona giorno è stato confrontato con il consumo per il raffreddamento dell'intero appartamento. La diminuzione del consumo dipende principalmente dal tempo di funzionamento e dal tipo di apparecchio:

- Zona giorno: con apparecchi mobili la riduzione ammonta a 45 % per il raffreddamento durante l'intera giornata e 35 % per il raffreddamento durante il tempo di presenza degli occupanti. Con apparecchi split si ha una riduzione del 40 % per il raffreddamento durante tutto il giorno e del 25 % per il raffreddamento durante l'occupazione.
- Camera da letto: con apparecchi mobili la riduzione ammonta a 50 % per il raffreddamento durante l'intera giornata e 65 % per il raffreddamento durante il tempo di presenza degli occupanti. Con apparecchi split si ha una riduzione del 55 % per il raffreddamento durante tutto il giorno e del 75 % per il raffreddamento durante l'occupazione.

Queste riduzioni del consumo energetico sono sostanzialmente le stesse per entrambe le località di Basilea e Lugano, eccezion fatta per lo scenario con raffreddamento della camera da letto durante la presenza degli occupanti, per il quale con il clima di Lugano la riduzione è inferiore del 5%.

Non si sono praticamente riscontrate differenze tra gli anni presi in considerazione e neppure per quel che concerne le temperature di consegna. Tuttavia, se l'appartamento viene raffreddato solo parzialmente (vale a dire solo singoli locali), questo porta ad un numero elevato di ore di surriscaldamento negli ambienti non raffreddati.

Tempo di funzionamento

Il consumo di energia elettrica per il raffreddamento durante il tempo di occupazione degli spazi interni è stato confrontato con il consumo per il raffreddamento durante l'intera giornata. Per il raffreddamento in presenza degli occupanti si sono assunte le seguenti ore di presenza: soggiorno dalle 06:00 alle 21:00; camera da letto dalle 21:00 alle 06:00. Rispetto al raffreddamento durante l'intero giorno non ci sono differenze significative tra le località considerate. Negli anni caldi di entrambi i periodi (presente e futuro) e alla temperatura di consegna di 22 °C, la riduzione del consumo di energia elettrica per il raffreddamento è leggermente inferiore e per i sistemi split leggermente superiore. La riduzione dipende principalmente dagli spazi raffreddati:

- Intero appartamento: 10-30 %.
- Zona giorno: 5-10 %.
- Camera da letto: 30-50 % (apparecchi split: 45-75 % per il clima di Basilea; 35-60% per il clima di Lugano).

Siccome la zona giorno è occupata durante la giornata e il climatizzatore è usato principalmente durante questo periodo, la riduzione del consumo risulta essere solo del 5%. Nelle camere da letto il risparmio è maggiore poiché il raffreddamento durante l'occupazione delle camere avviene unicamente di notte, quando le temperature esterne e interne sono più basse.

Altri parametri con un impatto importante sul consumo di energia elettrica per il raffreddamento sono il clima locale e l'aumento delle temperature dovuto al cambiamento climatico.

Clima

Il consumo di energia elettrica per il raffreddamento per il clima di Lugano è stato confrontato con il consumo per il clima di Basilea. Come previsto, il clima più caldo di Lugano comporta un consumo maggiore rispetto al clima di Basilea. L'aumento del consumo di energia elettrica dovuto al clima più caldo nella

Svizzera meridionale dipende principalmente dalla temperatura di consegna e dall'anno studiato. Anche il tipo di apparecchio ha un impatto sul consumo energetico. Negli anni mediani di entrambi i periodi (presente e futuro) si hanno i seguenti aumenti del consumo di energia elettrica per il raffreddamento:

- Apparecchio mobile:
 - Temperatura di consegna di 22 °C: 25-30 %.
 - Temperatura di consegna di 24 °C: 55-65 %.
 - Temperatura di consegna di 25.5 °C: 100-110 %.
- Apparecchio split:
 - Temperatura di consegna di 22 °C: 30-40 %.
 - Temperatura di consegna di 24 °C: 55-65 %.
 - Temperatura di consegna di 25.5 °C: 70-100 %.

Negli anni caldi di entrambi i periodi, l'aumento del consumo energetico per il raffreddamento è leggermente inferiore.

Cambiamento climatico

Il consumo energetico per il raffreddamento per l'anno mediano e l'anno caldo del periodo futuro A1B è stato confrontato con il consumo per l'anno mediano del periodo di riferimento. Le temperature più elevate porteranno in futuro ad un aumento dei consumi per la climatizzazione degli spazi interni. L'aumento del consumo di energia elettrica per il raffreddamento varia a seconda della temperatura di consegna e del clima locale. Il tempo di funzionamento dei climatizzatori non porta a variazioni significanti. Nella zona giorno l'aumento del consumo di elettricità è leggermente inferiore, mentre nelle camere da letto è più elevato, questo soprattutto alla temperatura di consegna di 25.5 °C. In vista del cambiamento climatico, per un intero appartamento si possono prevedere i seguenti aumenti del consumo energetico:

- Anno mediano del periodo A1B:
 - Basilea:
 - Temperatura di consegna di 22 °C: 40-45 %.
 - Temperatura di consegna di 24 °C: 70-80 %.
 - Temperatura di consegna di 25.5 °C: 100-155 %.
 - Lugano:
 - Temperatura di consegna di 22 °C: 30-40 %.
 - Temperatura di consegna di 24 °C: 60-80 %.
 - Temperatura di consegna di 25.5 °C: 120-165 %.
- Anno caldo del periodo A1B:
 - Basilea:
 - Temperatura di consegna di 22 °C: 100-110 %.
 - Temperatura di consegna di 24 °C: 3 volte.
 - Temperatura di consegna di 25.5 °C: 6 volte.
 - Lugano:
 - Temperatura di consegna di 22 °C: 90-110 %.
 - Temperatura di consegna di 24 °C: 2.5 volte.
 - Temperatura di consegna di 25.5 °C: 5 volte.

Il tipo di apparecchio non ha un impatto significativo. L'aumento del consumo per il raffreddamento con sistemi split è leggermente superiore per le temperature di consegna di 22 °C e 24 °C (ca. 5 % per l'anno mediano e 10-50 % per l'anno caldo del periodo futuro A1B), mentre è inferiore per la temperatura di consegna di 25.5 °C (ca. 10-20 % per l'anno mediano e ca. 50-100 % per l'anno caldo del periodo futuro A1B).

Questi dati mostrano che il consumo per il raffreddamento degli spazi interni aumenterà significativamente in futuro (ca. del 70 % per temperature di consegna di 24 °C in un futuro anno mediano). Con un uso appropriato di sistemi di raffreddamento efficienti del tipo split o multi-split (unicamente durante i periodi di utilizzo dei locali e a temperature di consegna non troppo basse, p.es. 24-25.5 °C), il consumo di energia elettrica per il raffreddamento può essere significativamente ridotto rispetto all'uso intensivo di unità di raffreddamento mobili (raffreddamento dell'intero appartamento durante tutto il giorno e con una temperatura di consegna di 22 °C). Questa strategia di raffreddamento permette una riduzione del consumo energetico del 75-85 % nel clima di Basilea e del 70-80 % nel clima di Lugano se si considera una temperatura di consegna di 24 °C, rispettivamente dell'85-95 % nel clima di Basilea e dell'80-90 % nel clima di Lugano con una temperatura di consegna di 25.5 °C (v. sezione 6).

Ulteriori misure

Nell'ambito dello studio sono stati inoltre esaminati i seguenti approcci:

- Aggiunta di un impianto fotovoltaico (con e senza batteria) per coprire il fabbisogno di energia elettrica per il raffreddamento
- Isolamento termico dei singoli locali da raffreddare (p.es. camera da letto), al fine di ridurre il consumo energetico per il raffreddamento

Contributo dell'impianto fotovoltaico per la copertura del fabbisogno di energia elettrica per il raffreddamento

Il contributo di un impianto fotovoltaico per la copertura del fabbisogno di energia elettrica per il raffreddamento è stato analizzato sulla base di quattro scenari per il clima di Basilea e Lugano (capitolo 4.2.3.3). La Tabella 2 mostra il consumo energetico come pure le impostazioni per il raffreddamento negli scenari in questione.

Sono stati inoltre definiti due impianti fotovoltaici con differenti potenze (10 W/m²_{SRE} come da MoPEC (EnDK, 2018a) e 30 W/m²_{SRE}), combinati con batterie di diversa capacità (1/1'000 risp. 1/333 della produzione annua di energia elettrica), per un totale di sei impianti analizzati (Tabella 3 e Tabella 4).

La Tabella 4 riporta il grado di copertura degli impianti considerati. Questi risultati non mostrano differenze per il clima di Basilea e di Lugano come pure per i vari anni esaminati. Il consumo elettrico per gli apparecchi e l'illuminazione ammonta a ca. 18.4 kWh/(m²a) ed è quindi superiore al consumo per il raffreddamento secondo gli scenari considerati, eccezion fatta per l'anno caldo del periodo A1B per il clima di Lugano. Il consumo per gli apparecchi e l'illuminazione è dunque predominante rispetto al consumo per il raffreddamento. I risultati sono pertanto simili per tutti gli scenari. Nello scenario «mobile 22 °C con occupanti» i gradi di copertura sono leggermente inferiori a causa del maggiore consumo energetico per il raffreddamento.

È stato inoltre studiato il grado di copertura del fabbisogno energetico per il raffreddamento, gli apparecchi e l'illuminazione di un impianto fotovoltaico con e senza batteria. Nel caso in cui l'impianto fotovoltaico copre unicamente il fabbisogno energetico per il raffreddamento, i vari scenari mostrano differenze significative. Se l'impianto fotovoltaico copre anche il fabbisogno per gli apparecchi e l'illuminazione, allora la quota di consumo proprio nei vari scenari tende a livellarsi, come mostrato nel paragrafo precedente. Il grado di copertura a seconda dell'impianto di raffreddamento e dello scenario è descritto qui di seguito.

Impianto per la copertura del fabbisogno di energia elettrica per il raffreddamento:

- Potenza dell'impianto fotovoltaico 10 W/m²_{SRE}:
 - Scenario «mobile 22 °C con occupanti»:
 - Senza batteria: 15-25 %.
 - Batteria con capacità di 1/1'000 della produzione elettrica annua dell'impianto fotovoltaico - 1.5 kWh: 35-45 %.

- Batteria con capacità di 1/333 della produzione elettrica annua dell'impianto fotovoltaico - 4.5 kWh: 40-55 %.
- Scenario «mobile 24 °C tutto il giorno»:
 - Senza batteria: 25-40 %.
 - Batteria con capacità di 1/1'000 della produzione elettrica annua dell'impianto fotovoltaico - 1.5 kWh: 40-60 %.
 - Batteria con capacità di 1/333 della produzione elettrica annua dell'impianto fotovoltaico - 4.5 kWh: 50-70 %.
- Scenari «split 24 °C tutto il giorno» e «split 24 °C con occupanti»:
 - Senza batteria: 50-70 % (tutto il giorno), 50-65 % (con occupanti).
 - Batteria con capacità di 1/1'000 della produzione elettrica annua dell'impianto fotovoltaico - 1.5 kWh: 60-80 % (tutto il giorno), 55-80 % (con occupanti).
 - Batteria con capacità di 1/333 della produzione elettrica annua dell'impianto fotovoltaico - 4.5 kWh: 70-90 % (tutto il giorno), 60-90 % (con occupanti).
- Potenza dell'impianto fotovoltaico 30 W/m²_{SRE}:
 - Scenario «mobile 22 °C con occupanti»:
 - Senza batteria: 40-45 %.
 - Batteria con capacità di 1/1'000 della produzione elettrica annua dell'impianto fotovoltaico - 4.5 kWh: 55-65 %.
 - Batteria con capacità di 1/333 della produzione elettrica annua dell'impianto fotovoltaico - 13.5 kWh: 65-90 %.
 - Scenario «mobile 24 °C tutto il giorno»:
 - Senza batteria: 55-70 %.
 - Batteria con capacità di 1/1'000 della produzione elettrica annua dell'impianto fotovoltaico - 4.5 kWh: 65-85 %.
 - Batteria con capacità di 1/333 della produzione elettrica annua dell'impianto fotovoltaico - 13.5 kWh: 75-95 %.
 - Scenari «split 24 °C tutto il giorno» e «split 24 °C con occupanti»:
 - Senza batteria: 65-80 % (tutto il giorno), 60-75 % (con occupanti).
 - Batteria con capacità di 1/1'000 della produzione elettrica annua dell'impianto fotovoltaico - 4.5 kWh: 75-95 % (tutto il giorno), 70-90 % (con occupanti).
 - Batteria con capacità di 1/333 della produzione elettrica annua dell'impianto fotovoltaico - 13.5 kWh: 90-100 %.

Impianto per la copertura del fabbisogno di energia elettrica per il raffreddamento, gli apparecchi e l'illuminazione:

- Potenza dell'impianto fotovoltaico 10 W/m²_{SRE}:
 - Tutti gli scenari esaminati:
 - Senza batteria: 25-30 % (scenario «mobile 22 °C con occupanti»: 20-25 %).
 - Batteria con capacità di 1/1'000 della produzione elettrica annua dell'impianto fotovoltaico - 4.5 kWh: 30-35 % (scenario «mobile 22 °C con occupanti»: 25-30 %).
 - Batteria con capacità di 1/333 della produzione elettrica annua dell'impianto fotovoltaico - 13.5 kWh: 35-40 % (scenario «mobile 22 °C con occupanti»: 30-35 % e «split 24 °C con occupanti»: 35-45 %).

- Potenza dell'impianto fotovoltaico $30 \text{ W/m}^2_{\text{SRE}}$:
 - Tutti gli scenari esaminati:
 - Senza batteria: 35-45 % (tutto il giorno), 35-40 % (con occupanti).
 - Batteria con capacità di 1/1'000 della produzione elettrica annua dell'impianto fotovoltaico - 4.5 kWh: 45-55 % (scenario «mobile 22 °C con occupanti»: 45-50 % e «mobile 24 °C tutto il giorno»: 50-55 %).
 - Batteria con capacità di 1/333 della produzione elettrica annua dell'impianto fotovoltaico - 13.5 kWh: 65-75 % (scenario «mobile 22 °C con occupanti»: 55-65 %).

Impianti fotovoltaici di potenza superiore ($30 \text{ W/m}^2_{\text{SRE}}$) permettono un miglior grado di copertura del consumo proprio rispetto ad impianti di minor potenza ($10 \text{ W/m}^2_{\text{SRE}}$) con batteria. In tal caso, le batterie di capacità più elevata (1/333 della produzione annua di energia elettrica) sono energeticamente vantaggiose rispetto alle batterie di capacità inferiore (1/1'000 della produzione annua di energia elettrica). Il dimensionamento degli impianti dovrebbe inoltre tenere conto dell'intero ciclo di vita del sistema (periodo invernale compreso).

Come mostrato nella Tabella 2, il raffreddamento a 22 °C con apparecchi mobili compatti durante il tempo di occupazione dei locali può avere un impatto significativo sul bilancio energetico complessivo di un edificio residenziale. Il consumo energetico è di $7.9 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ e $10.9 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ negli anni mediani di entrambi i periodi per il clima di Basilea e, rispettivamente, di $10.2 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ e $13.6 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ negli anni mediani di entrambi i periodi per il clima di Lugano. Utilizzando un sistema split con una temperatura di consegna di 24 °C durante l'intero giorno, il consumo energetico si riduce a $1.8 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ e $3.2 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ negli anni mediani di entrambi i periodi per il clima di Basilea e, rispettivamente, a $2.8 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ e $5.0 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ negli anni mediani di entrambi i periodi per il clima di Lugano. Se una buona parte di questo fabbisogno energetico è coperto da un impianto fotovoltaico, il consumo di energia elettrica prelevata dalla rete può essere ulteriormente ridotto. Con un impianto fotovoltaico della potenza di $10 \text{ W/m}^2_{\text{SRE}}$ secondo MoPEC (EnDK, 2018) il consumo di energia elettrica dalla rete si situa attorno a $0.6 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ e $1.0 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ negli anni mediani di entrambi i periodi per il clima di Basilea e, rispettivamente, $0.9 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ e $2.1 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ negli anni mediani per il clima di Lugano. Se l'impianto fotovoltaico ha una potenza di $30 \text{ W/m}^2_{\text{SRE}}$, l'utilizzo di energia elettrica dalla rete è di $0.4 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ e $0.6 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ negli anni mediani di entrambi i periodi per il clima di Basilea e, rispettivamente, di $0.6 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ e $1.5 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ negli anni mediani di entrambi i periodi per il clima di Lugano.

L'utilizzo diretto di energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico per il raffreddamento degli edifici è sensato, in quanto la massima produzione di elettricità avviene durante l'estate, in coincidenza con il periodo di fabbisogno di raffreddamento. L'impiego di un sistema fotovoltaico per coprire il fabbisogno di energia elettrica per il raffreddamento ha senso se il consumo è elevato e avviene durante le ore con irraggiamento solare. Se il raffreddamento è supportato da un impianto fotovoltaico, è consigliabile dimensionare l'impianto con una potenza maggiore rispetto ai $10 \text{ W/m}^2_{\text{SRE}}$ definiti nell'articolo 1.27 del MoPEC 2014 (EnDK, 2015). È inoltre consigliabile cercare di ridurre i picchi di corrente, ad esempio utilizzando sistemi efficienti, e raffreddare gli spazi interni unicamente quando sono utilizzati. Con un impianto fotovoltaico più grande è possibile coprire una parte maggiore del fabbisogno energetico che con una batteria di capacità superiore. Questo vale in modo particolare per gli apparecchi compatti con potenze molto elevate e con batterie che possono scaricarsi molto velocemente. Per i sistemi split con un consumo energetico molto più basso, un impianto fotovoltaico di dimensioni maggiori è da preferire ad una batteria di capacità più elevata.

Se il consumo di energia elettrica per il raffreddamento è basso, non è sensato limitare l'impiego dall'impianto fotovoltaico con batteria al solo raffreddamento, ma è meglio utilizzarlo anche per l'illuminazione, gli elettrodomestici, la mobilità e il riscaldamento tramite pompa di calore. L'energia elettrica in eccesso può comunque essere immessa nella rete di distribuzione. Va inoltre considerato che gli impianti fotovoltaici contribuiscono all'approvvigionamento elettrico anche al di fuori del periodo in cui è necessario raffreddare gli edifici, soprattutto in inverno, quando di regola la produzione complessiva di

energia rinnovabile è ridotta (a Basilea circa il 25 % dell'energia elettrica generata con il fotovoltaico è prodotta durante l'inverno). In generale va comunque tenuto presente che l'impiego di climatizzatori, come pure di impianti fotovoltaici e di batterie, può portare ad un aumento della percentuale di energia grigia nel bilancio energetico totale di un edificio. Grazie a questi sistemi è possibile mantenere basso il consumo aggiuntivo di energia per il raffreddamento degli edifici residenziali prelevata dalla rete. Tuttavia, il loro impatto sull'energia grigia e sulle emissioni di gas serra dovrebbe essere preso in considerazione e valutato per l'intero ciclo di vita dell'edificio (periodo invernale incluso).

	scenario	rif. anno mediano (2004)	rif. anno più caldo (2003)	A1B anno mediano (2063)	A1B anno più caldo (2068)	tipo	temperatura (°C)	tutto l'appartamento	tutto il giorno
BASILEA	Basilea - mobile 22 °C con occup.	7.9	12.0	10.9	15.6	apparecchio mobile	22	sì	no
	Basilea - mobile 24 °C tutto il giorno	3.8	7.9	7.2	11.8	apparecchio mobile	24	sì	sì
	Basilea - split 24 °C tutto il giorno	1.8	4.2	3.2	6.2	apparecchio split	24	sì	sì
	Basilea - split 24 °C con occup.	1.3	3.2	2.4	4.9	apparecchio split	24	sì	no
LUGANO	Lugano - mobile 22 °C con occup.	10.2	14.1	13.6	20.3	apparecchio mobile	22	sì	no
	Lugano - mobile 24 °C tutto il giorno	6.1	10.1	10.0	16.4	apparecchio mobile	24	sì	sì
	Lugano - split 24 °C tutto il giorno	2.8	5.3	5.0	8.8	apparecchio split	24	sì	sì
	Lugano - split 24 °C tutto il giorno	2.1	4.1	3.9	7.2	apparecchio split	24	sì	no

Tabella 2: Consumo di energia elettrica (kWh/(m²a)) per il raffreddamento di un intero appartamento a seconda del sistema di climatizzazione, della temperatura di consegna e del tempo di funzionamento per il clima attuale e futuro di Basilea e Lugano.

	scenario	potenza PV 10 W/m² _{SRE}			potenza PV 30 W/m² _{SRE}		
		senza batteria	batteria capacità 1/1'000 (1.5 kWh)	batteria capacità 1/333 (4.5 kWh)	senza batteria	batteria capacità 1/1'000 (1.5 kWh)	batteria capacità 1/333 (13.5 kWh)
BASILEA / LUGANO	mobile 22 °C con occupanti	15-25 %	35-45 %	40-55 %	40-45 %	55-65 %	65-90 %
	mobile 24 °C tutto il giorno	25-40 %	40-60 %	50-70 %	55-70 %	65-85 %	75-95 %
	split 24 °C tutto il giorno	50-70 %	60-80 %	65-90 %	65-80 %	75-95 %	90-100 %
	split 24 °C con occupanti	45-65 %	55-80 %	60-90 %	60-75 %	70-95 %	90-100 %

Tabella 3: Grado di copertura del fabbisogno di energia elettrica per il raffreddamento con un impianto fotovoltaico (potenza di 10 W/m²_{SRE} e 30 W/m²_{SRE}) senza batteria e con batterie di capacità di 1/1'000 e, rispettivamente, di 1/333 della produzione elettrica annua.

	scenario	potenza PV 10 W/m² _{SRE}			potenza PV 30 W/m² _{SRE}		
		senza batteria	batteria capacità 1/1'000 (1.5 kWh)	batteria capacità 1/333 (4.5 kWh)	senza batteria	batteria capacità 1/1'000 (4.5 kWh)	batteria capacità 1/333 (13.5 kWh)
BASILEA / LUGANO	mobile 22 °C con occupanti	20-25 %	25-30 %	30-35 %	35-40 %	45-50 %	55-65 %
	mobile 24 °C tutto il giorno	25-30 %	30-35 %	35-40 %	35-45 %	50-55 %	65-75 %
	split 24 °C tutto il giorno	25-30 %	30-35 %	35-45 %	35-45 %	45-55 %	65-75 %
	split 24 °C con occupanti	25-30 %	30-35 %	35-40 %	35-40 %	45-55 %	65-75 %

Tabella 4: Grado di copertura del fabbisogno di energia elettrica per il raffreddamento, gli apparecchi e l'illuminazione con un impianto fotovoltaico (potenza di 10 W/m²_{SRE} e 30 W/m²_{SRE}) senza batteria e con batterie di capacità di 1/1'000 e, rispettivamente, di 1/333 della produzione elettrica annua.

Isolamento termico dei locali da raffreddare

L'isolamento termico dei locali da raffreddare (capitolo 4.2.4) permette una riduzione del consumo energetico del 15-20 %. In termini assoluti questa riduzione è tuttavia esigua. Per il raffreddamento durante 24 ore alla temperatura di 24 °C negli anni mediani e negli anni caldi di entrambi i periodi considerati, il risparmio energetico è addirittura inferiore a 0.5 kWh/(m²a) e, rispettivamente, 1.0 kWh/(m²a). Altre misure,

come p.es l'impiego di protezioni solari mobili, la riduzione delle emissioni di calore residuo all'interno tramite l'utilizzo di apparecchi e sistemi di illuminazione più efficienti o la ventilazione notturna, possono essere più efficaci dell'isolamento termico dei locali da raffreddare.

Legislazione attuale

Le attuali normative si basano su dati climatici elaborati nel periodo dal 1984 al 2003.

Sarebbe pertanto raccomandata una revisione che tenga conto del clima futuro per quanto riguarda i requisiti di comfort termico negli edifici, non appena saranno pubblicati i nuovi dati climatici elaborati nell'ambito del progetto «Klimadaten der Zukunft für Planende: Klimawandel und Merkblatt SIA 2028» (NCCS, 2020). È inoltre auspicabile una specificazione dei requisiti per il raffreddamento da parte del MoPEC e dei cantoni: attualmente, i requisiti per i nuovi edifici sono formulati in maniera indiretta e limitati al fabbisogno annuo di energia per il riscaldamento, l'acqua calda sanitaria, la ventilazione e la climatizzazione. Tali requisiti dovrebbero includere, ad esempio, una quota massima ammissibile di energia non rinnovabile per coprire il fabbisogno per il raffreddamento (p.es. tramite impianto fotovoltaico o geocooling con sonde geotermiche) o la formulazione di requisiti minimi per l'efficienza energetica degli impianti di raffreddamento di piccole dimensioni, come p.es. i sistemi split.

Conclusioni e raccomandazioni generali

Sulla base dei risultati descritti sopra, è stato possibile formulare raccomandazioni su come effettuare il raffreddamento degli spazi abitativi nel modo più rispettoso dell'ambiente possibile. I risultati più importanti sono riassunti qui di seguito:

- Il raggiungimento di un clima confortevole all'interno degli edifici residenziali dovrebbe avvenire principalmente attraverso misure di protezione dal calore estivo (sia nell'edificio che nell'area circostante), misure per evitare i guadagni termici solari e interni, come pure misure per dissipare i carichi termici. Questi elementi rappresentano il punto di partenza per un edificio ad alta efficienza energetica.
- La temperatura di consegna, il numero di locali raffreddati e il tempo di funzionamento dei climatizzatori determinano in larga misura il fabbisogno di energia per il raffreddamento. È raccomandabile un uso adeguato degli apparecchi di raffreddamento, vale a dire unicamente durante i periodi di occupazione degli spazi interni e con temperature di consegna non troppo basse (p.es. 25.5 °C). Questo permette di minimizzare il fabbisogno energetico per il raffreddamento, sia attuale che futuro. Raffreddare gli appartamenti solo quando sono occupati implica anche picchi di consumo inferiori, il che porta ad una minore potenza elettrica necessaria per i sistemi analizzati in questo studio.
- I dispositivi di raffreddamento split sono molto più efficienti degli apparecchi mobili. Tuttavia, entrambi i sistemi hanno anche alcuni svantaggi:
 - causano rumore all'esterno ed all'interno;
 - producono calore, modificando il microclima dell'ambiente circostante ed accentuando l'effetto isola di calore nelle aree cittadine;
 - possono generare correnti d'aria sgradevoli per gli utenti;
 - possono far uso di fluidi refrigeranti dannosi per il clima e che accelerano il cambiamento climatico;
 - possono portare a sovraccarichi della rete elettrica.
- I sistemi che sfruttano il calore delle aree residenziali e fanno largo uso del freecooling, come p.es. le pompe di calore con sonda geotermica o che fanno capo a reti di energia o ad acque di falda e di superficie, sono migliori dei sistemi split o dei condizionatori mobili. Questi sistemi prelevano generalmente l'energia tramite l'impianto di riscaldamento, il che porta a minori emissioni di rumore e ad un miglior comfort nell'edificio.

Anche l'inerzia termica dell'edificio può essere sfruttata, riducendo così i picchi di corrente. Se l'impianto di riscaldamento viene utilizzato anche per il raffreddamento, questo non genera consumi aggiuntivi di energia grigia. Nel caso specifico delle sonde geotermiche, il raffreddamento attivo dei locali permette anche una rigenerazione termica del terreno semplice ed efficace.

- La combinazione con un impianto fotovoltaico permette di coprire gran parte del consumo di energia elettrica per il raffreddamento; l'impiego di batterie può contribuire ulteriormente alla copertura di questo consumo. In generale però, un impianto fotovoltaico di dimensioni superiori permette un miglior grado di copertura del fabbisogno di energia elettrica per il raffreddamento rispetto all'utilizzo di una batteria. Il dimensionamento degli impianti fotovoltaici e della batteria dovrebbe tenere conto dell'intero ciclo di vita dell'intero sistema.
- Nel caso di una revisione delle normative vigenti, dovrebbero essere presi in considerazione i futuri sviluppi climatici (aumento della temperatura) e i loro effetti (surriscaldamento e maggiore necessità di raffreddamento). Questo garantirebbe un elevato livello di comfort termico anche in futuro. Si raccomanda di valutare la necessità di requisiti minimi per la quota massima ammissibile di energie non rinnovabili per coprire il fabbisogno energetico per il raffreddamento degli edifici residenziali.

In questo studio è stato esaminato il consumo energetico per il raffreddamento decentralizzato di edifici residenziali e il contributo di un sistema fotovoltaico – con e senza batteria – per la copertura del fabbisogno di energia elettrica. Una valutazione dell'intero ciclo di vita di tali sistemi potrebbe fornire ulteriori importanti informazioni su possibili strategie rispettose dell'ambiente per il raffreddamento di edifici residenziali.

1. Ausgangslage

1.1 Klimaerwärmung

In der Schweiz hat die bodennahe Lufttemperatur in den letzten 150 Jahren um etwa 2 Grad Celsius zugenommen, deutlich stärker als der weltweite Durchschnitt¹. 2018 war in der Schweiz das wärmste Jahr seit Messbeginn². In Folge dieser Erwärmung kommt es heute häufiger zu längeren und wärmeren Hitzeperioden.

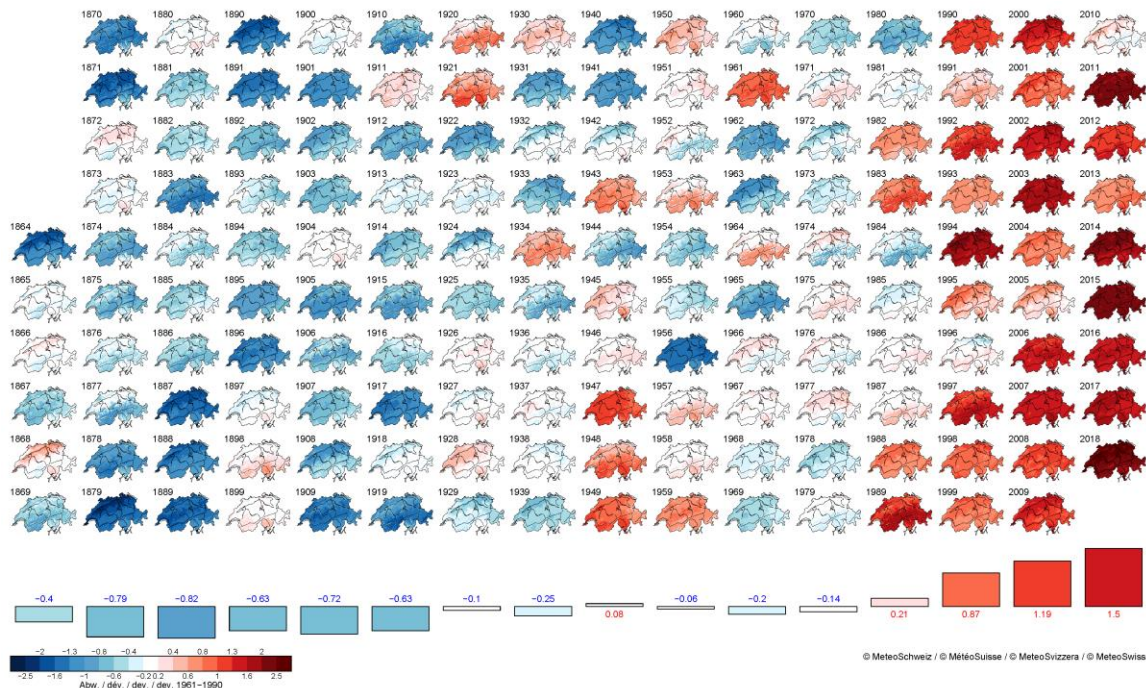


Abbildung 2: Temperaturabweichungen vom Mittelwert (1961-1990) in der Schweiz für jedes Jahr seit 1864. Jahre unter dem Mittel sind blau, Jahre über dem Mittel rot dargestellt. Im unteren Teil der Grafik sind die Abweichungen der Jahrzehnte als eingefärbte Säulen dargestellt. Quelle: MeteoSchweiz³.

Gemäss dem National Centre for Climate Services NCCS (NCCS, 2018) «steigen die Höchsttemperaturen [...] noch erheblich stärker als die Durchschnittstemperaturen. Hitzewellen sowie heisse Tage und Nächte werden häufiger und extremer. Am grössten ist die Hitzebelastung in den bevölkerungsreichen städtischen Gebieten in tiefen Lagen. Die heissesten Sommertage können 2060 in einem durchschnittlichen Sommer bis zu 5.5 Grad Celsius wärmer sein als heute. Dies lässt sich unter anderem damit erklären, dass aufgrund der geringeren Bodenfeuchte weniger Wasser verdunsten und so den Boden kühlen kann [...] Im Mittelland und in den Alpentälern steigt das Thermometer vermehrt über die 30-Grad-Marke, die einen «Hitzetag» kennzeichnet. Am meisten zusätzliche Hitzetage werden für die Region Genf, das Wallis sowie die Südschweiz erwartet. [...] Damit würde es z.B. in Genf am wärmsten Tag in einem durchschnittlichen Jahr etwa 40 Grad Celsius heiss.»

«Als «sehr heiss» gelten per Definition die 1 Prozent heissesten Tage aller Sommer von 1981 bis 2010. Heute kommen sehr heisse Tage im Schnitt an knapp einem Tag im Sommer vor (in einzelnen Jahren treten sehr heisse Tage oft gehäuft an aufeinanderfolgenden Tagen auf). Bis Mitte dieses Jahrhunderts könnte die Anzahl sehr heisser Tage in einem typischen Sommer bis auf 18 steigen»⁴. Damit werden auch Hitzewellen deutlich intensiver, häufiger und länger auftreten. Dabei berücksichtigen die Klimamodelle keine städtischen Wärmeinsel-Effekte. In stark überbauten Gebieten liegen die Temperaturen, insbesondere nachts, noch einige Grad Celsius höher als im Umland.

¹<https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/beobachtete-klimaentwicklung-in-der-schweiz.html>

²<https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/news-und-veranstaltungen/details.html/de/nccs/2019/news/2018-das-waermste-jahr-seit-messbeginn.html>

³<https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klimawandel-schweiz.html>

⁴<https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/kernaussagen/mehr-hitzetage.html>

Gemäss Gehrig, R., König, N., Scherrer, S., 2018, ist «die städtische Wärmeinsel [...] in allen untersuchten Städten während des ganzen Jahres vorhanden. Maxima werden im Sommer erreicht, vor allem in den Nächten. Die Nachttemperaturen sind in den Stadtzentren im Mittel im Sommer um über 2 °C höher als auf dem Land. In weniger dicht bebauten Gebieten sind sie zwischen 1 und 2 °C höher. Im Maximum werden an den untersuchten Stationen rund 6-7 °C höhere Nachttemperaturen verzeichnet. In den wärmsten Nächten sinkt die Temperatur in den Stadtzentren nicht unter 24-25 °C ab. Die Anzahl der Tropennächte ist in den Städten deutlich höher als auf dem Land, während die Anzahl der Hitzetage nur wenig erhöht ist». Aus diesem Grund ist die klimagerechte Raumplanung und Architektur der wichtigste Schritt zum Schutz der Bevölkerung bei zunehmender Hitzebelastung. Massnahmen zur Sensibilisierung der Bevölkerung für den Umgang mit Hitzewellen leisten ebenfalls zentrale Beiträge und sollten dringend umgesetzt werden.

Die erhöhten Temperaturen in der Nacht reduzieren die Möglichkeiten der natürlichen Nachtauskühlung und verstärken so den Bedarf nach einer aktiven Kühlung. Insofern ist die Suche nach umweltfreundlichen und energieeffizienten Ansätzen zur Kühlung von Wohnräumen wesentlich zur Erreichung der Ziele der schweizerischen Energiestrategie 2050⁵.

Die zukünftige Entwicklung der Luftfeuchtigkeit und der Globalstrahlung ist weniger eindeutig. Ein Anstieg der Luftfeuchtigkeit würde bewirken, dass der Energieverbrauch der Kältetechnik erheblich zunimmt. Zudem führt eine hohe Luftfeuchtigkeit dazu, dass die Entfeuchtung der Luft zwingend wird und die gefühlte Temperatur zunimmt, was wiederum zu einem verstärkten Einsatz von Kälteanlagen führt.

1.2 Klimageräte⁶

Der zunehmende Einsatz von Kälteanlagen in bestimmten Gebäudetypen (u.a. Warenhäuser und Detailhandel, Restaurants, Grossraumbüros) und in öffentlichen und privaten Verkehrsmitteln erhöht die Behaglichkeitsansprüche der Nutzenden bezüglich der zulässigen Raumtemperatur in Wohngebäuden. Die Ausbreitung von ineffizienten Raumklimageräten im Wohnbereich kann im Sommer zu Stromspitzen und Netzspitzenbelastung führen. Dabei können Raumklimageräte die Trägheit der Gebäudemasse nicht ausnutzen (wie z.B. eine Fussbodenkühlung). Dies verstärkt die Problematik der Spitzenlast zusätzlich. Ebenso können diese Geräte unerwünschte Folgen haben, wie z.B. die Zunahme der Stromerzeugung aus nicht erneuerbaren Quellen oder einer Zunahme von Stromimporten.

Die Zunahme der Raumklimatisierung und Teilkühlung ist bisher erst in wenigen Gebäudekategorien signifikant. Die Anschaffung eines Kühlgeräts für die Wohnung erfolgt i.d.R. aufgrund von Komfortansprüchen bei zu hohen Innenraumtemperaturen. Ältere Menschen leiden verstärkt unter erhöhten Temperaturen. Ragettli et al. (Ragettli M. S., Vicedo-Carera A. M., Schindler C., Rösli M., 2017) haben aufgezeigt, dass die Sterblichkeit ab 24 °C (24 h Mittel der Aussentemperatur) rapide zunimmt, wobei die Altersgruppe > 74 Jahre diejenige mit dem höchsten Risiko ist. Deshalb kann die Kühlung oder Teilkühlung im Wohnbereich in Zukunft nicht mehr nur erwünscht, sondern gar notwendig sein, um die thermische Belastung der Menschen und damit verbundene, gesundheitliche Probleme zu vermeiden. Im Rahmen des Projekts «ResCool: Klimaanpassung von Neu-, Um- und bestehenden Wohnbauten – effiziente Kühlkonzepte» der Hochschule Luzern (Koschenz, et al., 2021) in Zusammenarbeit mit den Swiss Tropical and Public Health Institute wurden die maximal zulässigen Innenraumtemperaturen für Personen, welche zur Risikogruppe gehören, untersucht. Anschliessend wurde der dazu notwendige Kühlbedarf von Wohngebäuden analysiert, um diese Temperaturen bereitzustellen.

Die Hitzewellen im Sommer 2018 und 2019 haben gezeigt⁷, dass die Schweizer Bevölkerung vermehrt zu ineffizienten Klimageräten zur Bekämpfung der hohen Temperaturen greift. Diese Systeme sind kostengünstig, benötigen keine Baubewilligung und sind einfach einsetzbar (ohne oder nur mit einem geringen baulichen Aufwand verbunden). Daher werden sie oft als Sofortlösung gewählt. Klimageräte eignen sich

⁵<https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energiestrategie-2050.html>

⁶Die hier untersuchten Klimageräte sind einfache Klimaanlage, die nur mit Luft funktionieren (Luft-Kältemittel-System) und über eine zeitabhängige Temperaturregelung verfügen.

⁷<https://www.fea.ch/de/markt/marktstatistik/>

für einzelne Zimmer oder für Gruppen von maximal fünf Räumen und haben eine typische Höchstleistung von 12 kW. Im Gegenzug dazu eignen sich Kühlungsanlagen für ganze Gebäude oder grosse Raumgruppen.

Im Jahr 2019 führte eine sehr frühe, erste Hitzewelle dazu, dass die Bevölkerung angesichts der Gefahr eines langanhaltenden, heissen Sommers vermehrt mobile Klimageräte kaufte. Dies spiegelt sich in der Marktstatistik des Halbjahres 2019 vom Fachverband Elektroapparate für Haushalt und Gewerbe Schweiz wieder, wo jedoch einige Grosshändler nicht vertreten sind. Die Statistik zeigt, dass die Anzahl der verkauften Klimageräte in der ersten Jahreshälfte des Jahres 2019 (16'236 Geräte) im Vergleich zum gleichen Zeitraum im Jahr 2018 (6'473 Geräte) um 150 %⁸ zugenommen hat. Dies entspricht einer Steigerung von 30 %⁹ im Vergleich zur Anzahl der im gesamten Jahr 2018 (12'253 Geräte) verkauften Klimageräte. In der Jahresbilanz lag der Kauf von Klimageräten im Jahr 2019 (18'060 Geräte) im Vergleich zum Vorjahr (12'253 Geräte) fast 50 % höher. Dabei wurden 90 % dieser Klimageräte in der ersten Jahreshälfte verkauft, aufgrund der ersten beiden Hitzewellen im Juni¹⁰.

Bei den meisten Klimageräten handelt es sich um **mobile Kompaktgeräte** mit ein oder zwei Schläuchen oder Kanälen. Gemäss der Norm SN/EN 14511-1:2018 (SNV, 2018) sind Kompaktgeräte solche, bei denen die Bauteile des Kältesystems fabrikmässig auf einer gemeinsamen Vorrichtung zusammengebaut werden, so dass sie eine alleinstehende Baueinheit bilden.

Beim **Einleitungssystem** oder **Einkanal-Luftkonditionierer** (Abbildung 3) wird die Eintrittsluft aus dem zu kühlenden Raum dem Verflüssiger zugeführt und die warme Abluft durch einen Schlauch ausserhalb dieses Raumes abgeblasen. Der Schlauch wird durch einen Fenster- oder Türspalt mittels eines Adapters oder durch ein Loch mit der Aussenseite verbunden. Da sich das Kühlgerät im Raum selbst befindet, wird die Wärme des Kompressors ebenfalls im Raum abgegeben. Die Effizienz ist daher gering und die Kühlleistung kann sich im Vergleich zu den Angaben des Herstellers um bis zu 40 % reduzieren.

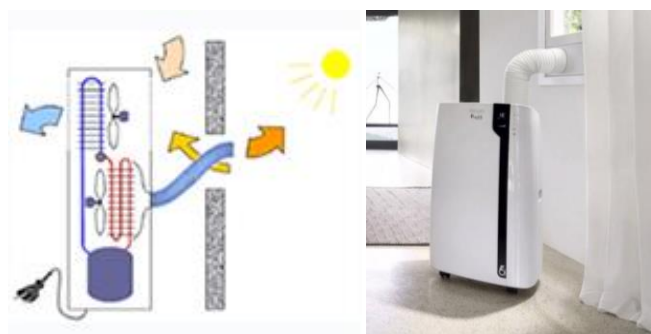


Abbildung 3: Links: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Einkanalsystems. Quelle: Brunner, Steinemann, & Nipkow, 2008. Rechts: Abbildung eines mit einem Fensteradapter installierten Systems. Quelle: De'Longhi Appliances S.r.l..

Beim **Zweileitungssystem** oder **Zweikanal-Luftkonditionierer** wird die Eintrittsluft über einen Kanal aus der äusseren Umgebung dem Verflüssiger zugeführt und über einen zweiten Kanal in die äussere Umgebung abgeblasen. Die Effizienz ist dadurch etwas höher als bei Einleitungssystemen. Das Kühlgerät befindet sich aber weiterhin im Raum, wodurch die Abwärme und der Kompressor-Lärm ebenfalls in den Raum abgegeben werden.

⁸<https://www.fea.ch/de/downloads/marktstatistik/2018-2019/marktstatistik-halbjahr-2019-2018.pdf>

⁹https://www.fea.ch/de/downloads/marktstatistik/2017-2018/vj/03.03.ms_vj_17_16_d.pdf

¹⁰<https://www.fea.ch/de/downloads/marktstatistik/2018-2019/marktstatistik-volljahr-2018-2019.pdf>



Abbildung 4: Links: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Zweikanalsystems. Quelle: Brunner, Steinemann, & Nipkow, 2008. Rechts: Abbildungen eines mit einem Fensteradapter bzw. Türadapter installierten Systems. Quelle: Trotec GmbH.

Die genannten Systeme sind aus mehreren Gründen nicht effizient. Erstens haben sie eine wesentlich niedrigere Leistungszahl als andere verfügbare Technologien, bspw. Split-Geräte oder reversible Wärmepumpen. Zweitens wird die warme Abluft durch den Schlauch ins Freie abgelassen. Hat das System nur einen Schlauch, wird von draussen Ersatzluft angesaugt, während gleichzeitig warme Abluft ins Freie abgeführt wird. Deswegen wird die abgegebene, warme Luft teilweise wieder angesaugt. Bei einem Zweileitungssystem werden die Zu- und Abluft jeweils durch einen separaten Schlauch geführt, so dass der Wirkungsgrad etwas höher ist. In beiden Fällen sind ein Adapter für den Fenster- oder Türspalt bzw. Bohrungen erforderlich, um zu verhindern, dass warme Aussenluft in den Innenraum gelangt. Bei beiden Systemen bleibt zudem die Abwärme der Geräte im Raum.

Kompaktgeräte haben nur einen einzigen Betriebsmodus. Der Kompressor arbeitet mit einer fixen Drehzahl – Volllast – und hat daher nicht die Fähigkeit, die Kühlleistung an die erforderliche Kühllast anzupassen. Meistens ist nur eine Teilkühllast erforderlich, um angenehme Temperaturen aufrechtzuerhalten. Bei Kompaktgeräten wird stattdessen der Kompressor kontinuierlich ein- und ausgeschaltet und läuft mit voller Leistung, um die Kühlleistung zu modulieren. Dies führt nicht nur zu einer Energieverschwendung, sondern auch zu unangenehmen Temperaturschwankungen.

Split-Systeme werden stattdessen fest installiert. **Einzel-Split-Systeme** bestehen aus einem Innenraum- und einem Aussenraumgerät. In letzterem befindet sich der Kondensator inkl. Kompressor, somit gelangt keine Abwärme des Klimagerätes und weniger Lärm in den Raum. Im Innenraumgerät befinden sich ein Wärmetauscher und ein Ventilator, der die Luft über den kalten Wärmetauscher bläst. Beide Komponenten sind nur über einer Kältemittelleitung miteinander verbunden und die Abluft gelangt nicht zurück in den Innenraum.

Multi-Split-Systeme bestehen aus mehreren Geräten für die Innenaufstellung (Innenraumgeräte), einem oder mehreren Kältemittelkreislauf/-läufen, einem oder mehreren Verdichter/-n und einem oder mehreren Gerät/-en für die Aussenaufstellung (Aussengeräte). Diese Systeme können für die Kühlung mehrerer Räume eingesetzt werden. Die Innenraumgeräte können einzeln oder gemeinsam geregelt werden. Die Inneneinheit wird in der Regel direkt an der Wand montiert (Abbildung 5), kann aber auch durch ein Kassettenelement in die Decke integriert werden. Diese Systeme sind normalerweise weniger effizient als Einzel-Split-Systeme. Zudem nimmt die Effizienz des Systems weiter ab, je mehr Innenraumgeräte installiert sind. Bei Einzel- und Multi-Split-Systemen benötigt man zudem für die Montage der Aussengeräte an den Fassaden i.d.R. eine Baubewilligung.

Split-Systeme sind heutzutage üblicherweise mit einer Drehzahlsteuerung (Invertertechnologie) ausgestattet. Dadurch kann die Drehzahl des Kompressors verändert werden, wodurch eine kleinere und variable Kühlleistung möglich ist. Dies ermöglicht einen besonders effizienten Teillastbetrieb. Die meisten Split-Systeme können mittels der integrierten, reversiblen Wärmepumpe auch zum Heizen benutzt werden. Dabei werden der Verdampfer und der Kompressor ausgetauscht. Im Gegensatz dazu ermöglichen viele Kompaktsysteme keine Heizfunktion. In diesem Fall erfolgt die Heizung über einen elektrischen Widerstand und ist daher höchst ineffizient.



Abbildung 5: Links: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Split-Systems. Quelle: Brunner, Steinemann, & Nipkow, 2008. Rechts: Abbildungen eines Innenraum- und Aussenraumgerätes. Quelle: Daikin Industries, Ltd..

Zusätzlich existiert eine Kombination von Mobil- und Split-Systemen, die sogenannten **Mobile-Split-Geräte**. In diesem Fall enthält das relativ leichte Aussengerät nur den Verflüssiger und den wärmeabgebenden Ventilator. Dadurch bleiben die Abwärme und der Lärm des Kompressors wiederum im Raum. Die Effizienz ist besser als bei Zweileitungssystemen, kommt aber nicht an die Split-Systeme heran.

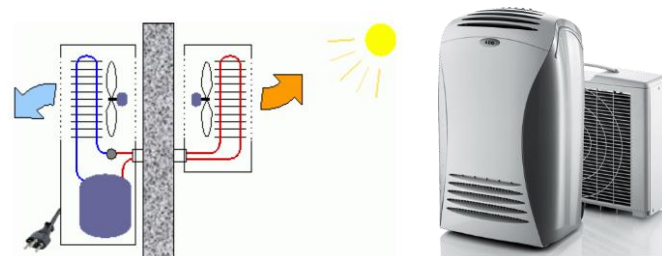


Abbildung 6: Links: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Mobile-Split-Systems. Quelle: Brunner, Steinemann, & Nipkow, 2008. Rechts: Abbildung eines Innenraum- und Aussenraumgerätes. Quelle: AEG Haustechnik GmbH.

Weiter existieren **Kompaktgeräte für den Fenster- oder Mauereinbau**. Dabei handelt es sich um kompakte Einheiten, die in eine Fenster- oder Wandöffnung eingebaut werden, so dass sich der Verdampfer innerhalb des Raumes und der Kondensator ausserhalb des Raumes befinden. Die Effizienz ist höher als bei Kompaktsystemen, aber niedriger als bei Split-Systemen. Solche Geräte funktionieren nur für die Kühlung und werden selten installiert.

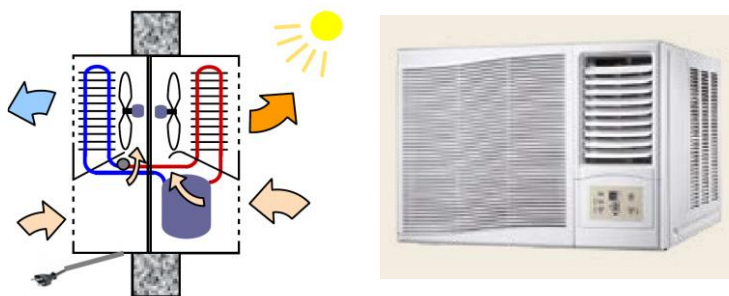


Abbildung 7: Links: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Kompakt-Fenstergerätes. Quelle: Brunner, Steinemann, & Nipkow, 2008. Rechts: Abbildung des Kompaktgerätes für den Fenster- oder Mauereinbau. Quelle: Carrier Global Corporation.

Der Einsatz von Klimageräten geht mit einer Erwärmung der äusseren Umgebung einher. Diese kann in der unmittelbaren Umgebung zu einem Anstieg von etwa 1 °C führen (Salamanca, Georgescu, Mahalov, Moustauoui, & Wang, 2014).

Zusätzlich zum Energieverbrauch enthalten solche Systeme Kältemittel. Diese bestehen normalerweise aus teilfluorierten Kohlenwasserstoffen (HFKW), die für die Umwelt schädlich sind, da sie starke Treibhausgase sind. Die europäische Verordnung EU 517/2014 (Europäisches Parlament, 2014) über fluorierte Treibhausgase (HFKW) legt die Auflagen fest für den Einsatz von Einrichtungen, die fluorierte Treibhausgase enthalten oder benötigen. Darunter fallen auch die neuen Kälte- und Klimaanlage.

Ab dem 1. Januar 2020 wurden bewegliche Raumklimageräte (hermetisch geschlossene Systeme, die der Endnutzer von einem Raum in einen anderen bringen kann – in dieser Studie als mobile Kompaktgeräte bezeichnet), die HFKW mit einem Treibhauspotential (GWP – auf Englisch *Global Warming Potential*) von 150 oder mehr enthalten, verboten. Ab dem 1. Januar 2025 werden Mono-Splitklimageräte – in dieser Studie als Split-System bezeichnet – mit weniger als 3 kg fluorierten Treibhausgasen, die fluorierte Treibhausgase mit einem GWP von 750 oder mehr enthalten oder für ihren Betrieb benötigen, ebenfalls verboten. Das bedeutet, dass gängige Kältemittel wie R410A – mit einem GWP von 2'090 – und R407C – mit einem GWP von 1'770 – nicht mehr verwendet werden dürfen (BAFU, 2017).

Eine Alternative bietet das Kältemittel R32, was ein GWP von 675 (unter dem Grenzwert von 750 der europäischen Verordnung) hat. Die Energieeffizienz dieses Kältemittels ist dennoch hoch. Zudem kommen die Anlagen mit vergleichsweise geringeren Füllmengen aus.

Weiter ist das Kältemittel R32 schwer entflammbar. Es entzündet sich nicht, solange die Konzentration im Raum unter der Zündgrenze von 0,306 kg/m³ bleibt. Damit kann es in den meisten Klimaanlageanlagen gefahrlos verwendet werden.

Heute findet man auch Kompaktgeräte, die als Kältemittel Propan – R290 – verwenden. Dabei handelt es sich um ein natürliches Kältemittel, das ein sehr geringes Treibhauspotential von 3 aufweist. Es ist zudem ein sehr effizientes Kältemittel und erfordert nur die Hälfte der Menge, um die gleiche Kühlleistung wie das Kältemittel R410A zu erbringen.

Kompaktsysteme enthalten typischerweise nicht mehr als 0.5 kg Kältemittel, während Split-Systeme 0.8 kg für Leistungen bis zu 3.5 kW und Multi-Split-Systeme etwa 2.4 kg für Leistungen von 7.5 kW und 3.6 kg für Leistungen von 12 kW enthalten.

Für Anlagen mit mehr als 3 kg Kältemittel der Kategorie HFKW besteht eine Meldepflicht, zudem sind ein Wartungsheft und eine Dichtigkeitsprüfung erforderlich. Für Anlagen mit mehr als 3 kg natürliches Kältemittel ist nur das Wartungsheft erforderlich.

Andere, natürliche Kältemittel bieten keine Alternative: CO₂ besitzt ein geringes GWP, jedoch auch eine zu geringe Energieeffizienz. Propan ist, wie schon erwähnt, sehr energieeffizient und hat ein geringes GWP, ist jedoch auch sehr leicht entzündlich. Ammoniak bietet eine gute Energieeffizienz und den geringsten GWP, ist aber sehr giftig.

Bei der Betrachtung von Klimageräten ist zu bedenken, dass einmal angeschaffte Geräte und eingebaute Anlagen nicht nur intensiv genutzt, sondern auch für lange Zeit verwendet werden (die Lebensdauer beträgt 10-15 Jahre). Klimageräte werden in Zukunft in Anbetracht der steigenden Komfortbedürfnisse und der steigenden Aussentemperaturen immer wichtiger.

Um das Klima nicht noch stärker zu belasten, müssen also strenge Mindestanforderungen an die Energieeffizienz der Klimageräte gestellt werden. Zudem müssen Nutzer informiert werden, wie sie die Geräte möglichst wirksam und somit energieschonend betreiben können.

1.3 Ziel der Arbeit

Die vorliegende Studie konzentriert sich auf die Untersuchung von umweltfreundlichen Ansätzen zur Kühlung von Wohnräumen, insbesondere die Kombination von mobilen Klimageräten und Split-Systemen mit einer Photovoltaikanlage, sowie auf die Notwendigkeit, die diesbezüglich bestehenden Gesetze anzupassen.

Die Arbeit verfolgt also zwei komplementäre Ziele:

- Bestimmung umweltfreundlicher Ansätze zur Kühlung von Wohnräumen in der Schweiz. Die energetische Wirkung der vorgeschlagenen Lösungen wird geprüft, u.a. mittels Gebäudesimulationen.
- Analyse der aktuellen Gesetzgebung und Bestimmung allfälliger Verbesserungsmöglichkeiten.

Durch die genannten Projektziele soll sichergestellt werden, dass der künftig zunehmende Kühlbedarf in Wohngebäude durch den Klimawandel möglichst umweltverträglich gedeckt wird (d.h. minimaler Energiebedarf und/oder CO₂ Ausstoss). Dabei werden heute bereits bekannte und genutzte Möglichkeiten, wie die Nachtauskühlung oder Kühlung via Erdsonden (Regeneration), mitberücksichtigt.

1.4 Umweltfreundliche Ansätze zur Kühlung von Wohnräumen

Kühlsysteme können bei intensiver Nutzung einen erheblichen Energieverbrauch verursachen. Daher liegt der Schwerpunkt dieser Studie auf der Umsetzung effizienter Lösungen unter Berücksichtigung einer angemessenen Nutzung des Kühlsystems in Abhängigkeit von Solltemperatur und Nutzungsdauer. In allen Szenarien wird komplementär zum Kühlsystem eine angemessene Verwendung von Sonnenschutzsystemen und natürlicher Lüftung berücksichtigt.

Die untersuchten Ansätze sind:

- Split-Kühlsysteme in Kombination mit einer Photovoltaikanlage und einem Batteriespeicher.
- Dämmung einzelner, zu kühlender Räume (bspw. Schlafzimmer).

2. Grundlagen

Die vorliegende Studie basiert teilweise auf den Ergebnissen der Studie «ClimaBau» von der Hochschule Luzern (Settembrini, et al., 2017). Diese Arbeit zeigt, dass der Klimakältebedarf in Wohngebäuden in den nächsten fünfzig Jahren aufgrund des klimawandelbedingten Temperaturanstiegs deutlich zunehmen wird. Sie bestätigt weiter die Bedeutung von Entwurfparametern im Zusammenhang mit der Reduzierung der Wärmegewinne im Sommer (Fensterflächen, Sonnenschutz, natürliche Lüftung u.a.) sowie die Rolle der Bewohnenden beim Klimakältebedarf.

2.1 Publikationen

Zur behandelten Thematik gibt es diverse Publikationen, welche weiterführende Informationen enthalten und für interessierte Personen zu empfehlen sind. Dazu gehören:

- Aebischer, B., Jakob, M., & Catenazzi, G. (2007). Impact of climate change on thermal comfort, heating and cooling energy demand in Europe. *ECEEE 2007 Summer Study Panel 5 Energy*, 859-870.
- Birda, D. N., de Witb, R., Schwaigera, H. P., Andreb, K., Beermann, M., & Žuvela-Aloiseb, M. (2019). Estimating the daily peak and annual total electricity demand for cooling in Vienna, Austria by 2050. *Urban Climate* 28, 1-18.
- Brunner, A., Kriegers, M., Prochaska, V., & Tillenkamp, F. (2019). *Klimakälte heute: kluge Lösungen für ein angenehmes Raumklima*. Zürich: Faktor Verlag.
- Brunner, C., Steinemann, U., & Nipkow, J. (2008). *Bauen, wenn das Klima wärmer wird*. Zürich: Faktor Verlag.
- Bundesamt für Umwelt BAFU. (2017). *Klimabedingte Risiken und Chancen. Eine schweizweite Synthese*. Bern: Umwelt-Wissen Nr. 1706.
- Burke, T., Willem, H., Ni, C. C., Stratton, H., Chen, Y., Ganeshalingam, M., . . . Dunham, C. (2015). *Using Field-Metered Data to Quantify Annual Energy Use of Portable Air Conditioners*. Environmental Energy Technologies Division, Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Christenson, M., Manz, H., Gyalistras, D. (2006). Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland. *Energy Conversion and Management* 47, 671-686.
- EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE. (11. Juli 2019). *Energieetikette für Raumklimageräte. Faktenblatt*. Von https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/effizienz/die-energieetikette/die-energieetikette-fuer-haushaltsgeraete/die-energieetikette-fuer-raumklimageraete/_jcr_content/par/tabs/items/tab/tabpar/externalcontent.external.exturl.pdf/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWWRta-abgerufen
- EnFK, EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE. (2016). *Komfortabler Wohnen – alles rund ums Heizen und Lüften*. Bern: BBL, Vertrieb Publikationen.
- Europäische Parlament. (2011). *Delegierte Verordnung (EU) Nr. 626/2011 der Kommission vom 4. Mai 2011 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Kennzeichnung von Luftkonditionierern in Bezug auf den Energieverbrauch*. Brussels: Off. J. Eur. Union, L178.
- Europäische Parlament. (2012). *Verordnung (EU) Nr. 206/2012 der Kommission vom 6. März 2012 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die*

umweltgerechte Gestaltung von Raumklimageräten und K. Brussels: Off. J. Eur. Union, L072.

- Fitzner, K., Finke, U., & Zeidler, O. (2007). *Wirksamkeit von mobilen Klimageräten*. Berlin: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Frank, T. (2005). Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland. *Energy and Buildings* 37, 1175-1185.
- Maas, A., & Schlitzberger, S. (2013). *Thermisches und energetisches Verhalten von Gebäuden im Lichte des Klimawandels. Anforderungen und Lösungen für den Sonnenschutz*. Stuttgart: Fraunhofer IRB.
- NCCS. (2018). *CH2018 - Klimaszenarien für die Schweiz*. Zürich: National Centre for Climate Services, Zürich.
- Rochat, H., Bättig, M., & Bush, E. (2019). *Wärmeschutz und Kühlung von Büro- und Gewerberäumen*. EnergieSchweiz, Bern.
- Schweizerischen Fachverbandes Fenster- und Fassadenbranche. (11. Juli 2019). *Optimales Lüften-Online Informationsbroschüre des Schweizerischen Fachverbandes Fenster- und Fassadenbranche*. Von <https://fff.ch/de/optimal/de> abgerufen
- Stettler, M., Prochaska, V., Dumortier, R., & Lang, T. (2015). *Energieeffizienz in der Klimakälte. Auslegeordnung und Vorgehensvorschlag*. Zürich: EnergieSchweiz.

2.2 Vorschriften und Normen

Für den Erlass von Vorschriften im Gebäudebereich sind primär die Kantone zuständig. Dazu gehört u.a. die gemeinsame Erarbeitung und Abstimmung von energierechtlichen Vorschriften, die sogenannten «Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich» (MuKE) (EnDK, 2018). Diese müssen dann in den unterschiedlichen, kantonalen Gesetzgebungen umgesetzt werden. Die vierte Ausgabe der MuKE, Auflage 2014, wurde im Jahr 2015 publiziert. Die Kantone sollten diese Vorschriften bis spätestens 2018 in ihre kantonale Gesetzgebung aufnehmen, damit die Inkraftsetzung per 2020 erfolgen konnte. Einige Kantone haben allerdings die Energiegesetzgebung der MuKE 2014 (EnDK, 2015) noch nicht übernommen, weitere Kantone halten noch an den Anforderungen der Auflage 2008 fest.

Die in den MuKE festgelegten Anforderungen, insbesondere Artikel 1.8 und 1.21, werden auf der Grundlage der im ersten Teil des Projekts erzielten Ergebnisse (Abschnitte 4.1 und 4.2) analysiert. Gegebenenfalls werden Verbesserungsvorschläge ausgearbeitet.

Des Weiteren sind folgende Vorschriften für diese Studie relevant:

- SIA. (2014). *Norm SIA 180. Wärmeschutz und Raumklima in Gebäuden*. Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- SIA. (2014). *Norm SIA 382/1. Lüftungs- und Klimaanlage - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen*. Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- SIA. (2010). *Norm SIA 382/2. Klimatisierte Gebäude – Leistungs- und Energiebedarf*. Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- SIA. (2019). *SIA Merkblatt 2044. Klimatisierte Gebäude - Standard-Berechnungsverfahren für den Leistungs- und Energiebedarf*. Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- Energieeffizienzverordnung, EnEV. (2018). *Verordnung über die Anforderungen an die Energieeffizienz serienmässig hergestellter Anlagen, Fahrzeuge und Geräte*. Bern: Schweizerische Bundesrat.

Die relevantesten Aspekte der Gebäudekühlung in diesen Vorschriften und Normen werden zuerst analysiert und vorgelegt, um Bestimmung allfälliger Verbesserungsmöglichkeiten treffen zu können. Die Gesetzgebung bildet auch die Grundlage vieler der getroffenen Annahmen dieser Studie.

2.2.1 MuKE 2014 (EnDK, 2015 und EnDK, 2018)

Die MuKE 2014, in der Nachführung von 2018 (EnDK, 2018), stellt im **Artikel 1.21 «Kühlen, Be- und Entfeuchten (V)»** fest, dass:

«¹ Klimaanlage für die Aufrechterhaltung des Komforts sind in bestehenden Bauten so zu erstellen, dass entweder

- a. der elektrische Leistungsbedarf für die Medienförderung und die Medienaufbereitung inklusiver allfälliger Kühlung, Befeuchtung, Entfeuchtung und Wasseraufbereitung 12 W/m² nicht überschreitet, oder
- b. die Kaltwassertemperaturen und die Leistungszahlen für die Kälteerzeugung nach dem Stand der Technik ausgelegt sind, sowie die Planung und der Betrieb einer allfälligen Befeuchtung nach dem Stand der Technik erfolgt».

In der Ausgabe 2014 (EnDK, 2015) enthielt dieser Artikel auch eine Anforderung an den elektrischen Leistungsbedarf in Neubauten. Dieser lautet wie folgt:

«¹ Die Installation neuer Anlagen sowie der Ersatz bestehender Anlagen für Kühlung, Be- und Entfeuchtung ist immer zulässig, wenn der elektrische Leistungsbedarf für die Medienförderung und die Medienaufbereitung inklusiver allfälliger Kühlung, Befeuchtung, Entfeuchtung und Wasseraufbereitung 7 W/m² in Neubauten resp. 12 W/m² in bestehenden Gebäuden nicht überschreitet.

² Bei Anlagen für die Komfortkühlung, welche nicht unter Absatz 1 fallen, sind die Kaltwassertemperaturen und die Leistungszahlen für die Kälteerzeugung nach dem Stand der Technik auszulegen.

³ Bei Anlagen, welche nicht unter Absatz 1 fallen, müssen die Auslegung und der Betrieb einer allfälligen Befeuchtung nach dem Stand der Technik erfolgen».

Diese Anforderung (maximaler elektrischer Leistungsbedarf von 7 W/m² in Neubauten resp. 12 W/m² in bestehenden Gebäuden) entspricht derjenigen, die in der Norm SIA 382/1 (SIA, 2014b) für Anlagen mit kleinem elektrischem Leistungsbedarf festgelegt wurde. In der Norm SIA 382/1 (SIA, 2014b) ist diese Anforderung nur für Fälle festgelegt, wo eine Kühlung nach dem vereinfachten oder vertieften Verfahren höchstens erwünscht oder gar nicht notwendig ist, jedoch trotzdem eine Kühlung vorgesehen wird.

Deshalb wurden in der Nachführung von 2018 Neubauten von der Anforderung ausgenommen und der Grenzwert für bestehende Gebäude beibehalten. Bei der Begrenzung für Neubauten wird auf den Grenzwert des gewichteten Energiebedarfs pro Jahr für Heizung, Warmwasser, Lüftung und Klimatisierung verwiesen.

Für die Auslegung und den Betrieb einer allfälligen Kälteerzeugung gelten die Anforderungen gemäss Ziffer 5.6.1 (Kaltwassertemperaturen) sowie Ziffern 5.6.2 und 5.6.3 (Anforderungen an die Effizienz der Kältemaschinen) der Norm SIA 382/1 (SIA, 2014b).

Zusätzlich ist im **Artikel 1.8 «Anforderungen und Nachweis sommerlicher Wärmeschutz» (V)** festgehalten, dass bei gekühlten Räumen oder bei Räumen, in welchen eine Kühlung notwendig oder erwünscht ist, die Anforderungen an den g-Wert, die Steuerung und die Windfestigkeit des Sonnenschutzes nach dem Stand der Technik einzuhalten sind. Bei den anderen Räumen sind nur die Anforderungen an den g-Wert des Sonnenschutzes nach dem Stand der Technik einzuhalten.

Die Norm verordnet im Artikel 1.18 die Abwärmenutzung der Kälteerzeugung, soweit dies technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich zumutbar ist, die Wärmedämmung von Lüftungstechnischen Anlagen je nach Temperaturdifferenz im Auslegungsfall und den λ -Wert des Dämmmaterials gemäss der Norm SIA 382/1 (SIA, 2014b). Es gibt keine zusätzlichen Anforderungen bezüglich der Kühlung.

Abbildung 8 zeigt eine Übersicht der Anforderungen der MuKE, wie sie in der Vollzugshilfe EN-110 "Kühlen, Be- und Entfeuchten" (EnDK, 2018b) vorzufinden ist.

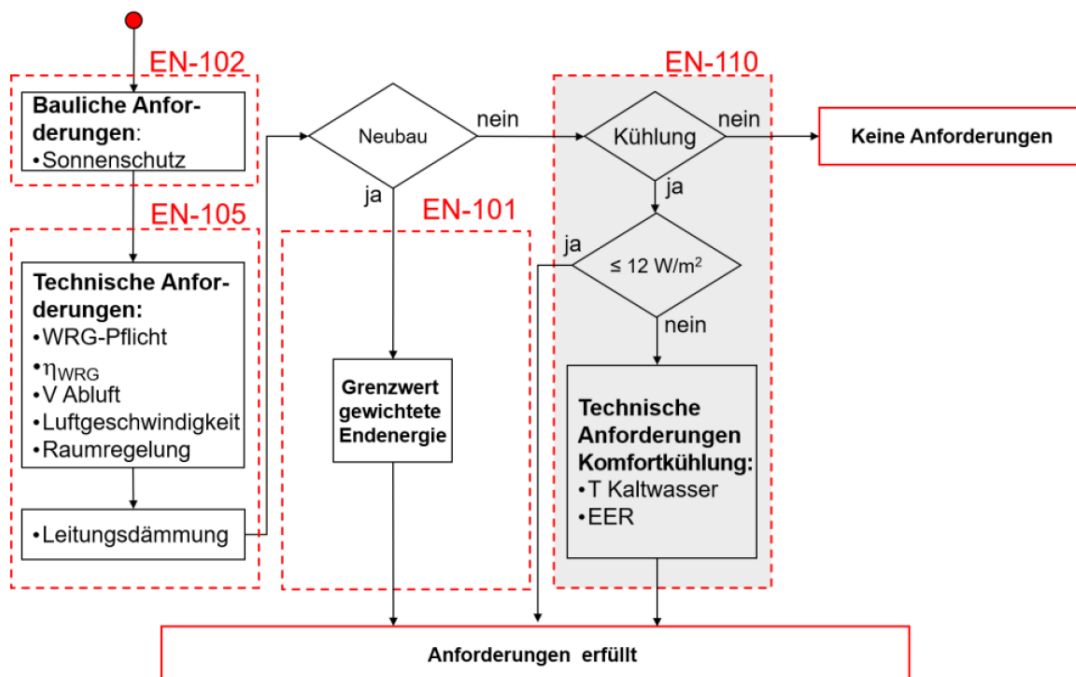


Abbildung 8: Allgemeine Übersicht der Anforderungen, Vollzugshilfen und Formulare der Vollzugshilfe EN-110 "Kühlen, Be- und Entfeuchten". Quelle: EnDK, 2018.

Gemäss dem "Stand der Energie- und Klimapolitik in den Kantonen 2020" (BFE, 2020) wurde der Artikel 1.21 in allen Kantonen ohne inhaltliche Abweichungen übernommen, ausser im Kanton Basel-Landschaft, wo er mit inhaltlichen Anpassungen übernommen wurde. Im Kanton Tessin ist eine Ausnahme für Anlagen mit einer elektrischen Leistung grösser als 7 W/m² (in Neubauten) oder 12 W/m² (in bestehenden Gebäuden) möglich, wenn dies durch den Standort oder die besondere Nutzung des Gebäudes gerechtfertigt ist. Im Kanton Genf wurden hingegen höhere Anforderungen an die Kühlung gestellt.

Bemerkenswert ist die Position, die der Kanton Waadt in Bezug auf neue Befeuchtungs- und Klimaanlage einnimmt: mindestens 50 % des Stromverbrauchs der neuen Befeuchtungs- und Klimaanlage müssen durch erneuerbare Energien gedeckt werden oder die Kühlenergie muss zu 100 % aus einer erneuerbaren Quelle stammen (Seewasser, Grundwasser, Erde, geothermische Einrichtungen, Solar).

Im Kanton Luzern wurden am 20. November 2020 die «Hinweise für die Vollzugspraxis des kantonalen Energiegesetzes (Version 6)¹¹» publiziert. Dieses Dokument ergänzt die Vollzugshilfen der Konferenz kantonomer Energiefachstellen zur MuKE und enthält konkretisierende Erläuterungen und teilweise abweichende Regelungen für die Vollzugspraxis im Kanton Luzern.

In diesem Dokument wurde der Punkt 1.a im Artikel 1.21 mit folgender Erklärung gestrichen: «Eine Kühlung und Befeuchtung ist grundsätzlich immer zulässig. Ist die Kühlung gem. SIA 382/1:2014 nur erwünscht oder sogar nicht notwendig so darf trotzdem eine Kühlung eingebaut werden».

Dieses Dokument beinhaltet technische Anforderungen für die Kälteerzeugung und definiert Zielwerte für Split-Geräte nach Tabelle 17 der Norm SIA 382/1 (SIA, 2014b). Es hält fest, dass Free-Cooling (alle Systeme wie Geo-Cooling über Erdsonden oder eine adiabatische Kühlung über Lüftungsanlagen, welche nicht auf dem Betrieb einer Kältemaschine oder reversiblen Wärmepumpe basieren) nicht als Kühlung gilt.

Die Umsetzung der Anforderungen und Nachweise des sommerlichen Wärmeschutzes gemäss Artikel 1.8 wurde in allen Kantonen, ausser im Kanton Schwyz, Ende März 2020 eingeführt. Inhaltliche Abweichungen gegenüber den MuKE 2014 (EnDK, 2018a) gibt es in den Kantonen Luzern, Basel-Landschaft, Tessin, Waadt und Genf.

Viele Kantone haben den Bedarfsnachweis, der früher für die Bewilligung von Kühl-, Be- und Entfeuchtungsanlagen nötig war, durch technische Anforderungen abgelöst. Dennoch muss gemäss Ziffer 1.23 die Energie für Klimatisierung in den gewichteten Endenergiebedarf eingerechnet werden. In jedem Fall benötigt die Installation einer Klimaanlage oder eines Split-Systems eine Baubewilligung.

2.2.2 SIA 180 (SIA, 2014a)

Der Zweck der Norm SIA 180 (SIA, 2014a) ist die Sicherstellung eines behaglichen Raumklimas und die Vermeidung von Bauschäden. Sie enthält Definitionen, Komfortgrundlagen und Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz. Die Anforderungen an die Raumluftqualität und an die thermische Behaglichkeit im Sommer sind in Abschnitt 3 bzw. Abschnitt 5.1 der Norm SIA 180 (SIA, 2014a) beschrieben und dienen als Grundlage für die Norm SIA 382/1 (SIA, 2014b).

Die Norm unterscheidet die Behaglichkeitsanforderungen an Räume mit technischen Installationen im Betrieb («**Anforderungen an Räume, während diese beheizt, gekühlt oder mechanisch belüftet sind**» oder «**Anforderungen an Räume mit natürlicher oder mechanischer Lüftung, während diese beheizt oder maschinell gekühlt sind**» nach Korrigenda C2 zur Norm SIA 180:2014 (SIA, 2020a)) von denjenigen an Räume mit ausgeschalteten Installationen oder ohne Installationen («**Anforderungen an Räume mit natürlicher Lüftung, während diese weder beheizt noch gekühlt sind**» oder «**Anforderungen an Räume ohne maschinelle Kühlanlage**» nach Korrigenda C2 zur Norm SIA 180:2014 (SIA, 2020a)).

Zu diesem Zweck legt die Norm einen zulässigen Bereich der empfundenen Temperatur fest, der in Bezug zum gleitenden Mittelwert der Aussentemperatur über 48 Stunden steht. Der obere Grenzwert für

¹¹https://uwe.lu.ch/-/media/UWE/Dokumente/Themen/Energie/Energiegesetz_EnG/Luzerner_Hinweise_Vollzugspraxis_KEng.pdf?la=de-CH

Räume mit natürlicher Lüftung ist höher, da davon ausgegangen wird, dass die Fenster geöffnet werden können und die Menschen ihre Kleidung saisonal anpassen können. Dieser Bereich für beide Raumtypen ist in Abbildung 9 dargestellt.

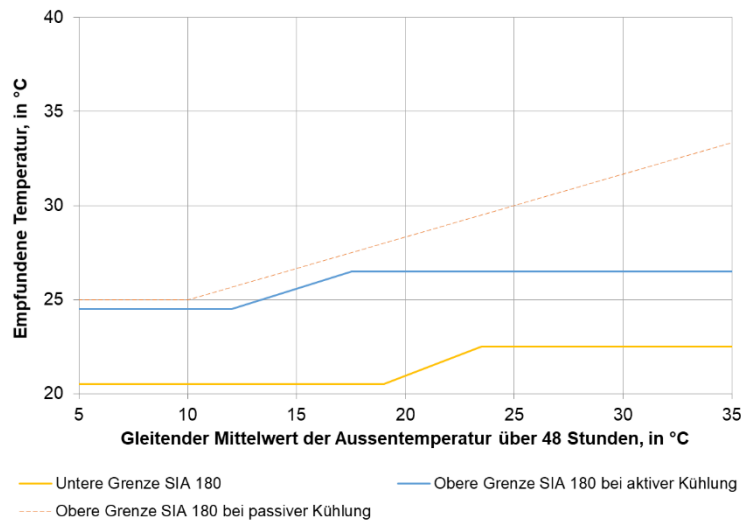


Abbildung 9: Zulässiger Bereich der empfundenen Temperatur in Wohn- und Büroräumen, während diese beheizt, gekühlt oder mechanisch belüftet sind (Wohn- und Büroräume mit natürlicher oder mechanischer Lüftung, während diese beheizt oder maschinell gekühlt sind) (blaue Linie) und bei passiver Kühlung (Anforderungen an Räume ohne maschinelle Kühlanlage) (orange Linie), in Abhängigkeit des Mittelwertes der Aussentemperatur. Quelle: Hochschule Luzern (angelehnt an die Norm SIA 180 (SIA, 2014a)).

In diesem Bericht wurde eine Überhitzungsstunde als eine Stunde während der Nutzungszeit, in der die empfundene Raumtemperatur die obere Grenzkurve für Räume mit technischen Installationen im Betrieb (blaue Linie in Abbildung 9) nach Norm SIA 180 (SIA, 2014a) überschreitet, definiert.

In Räumen mit Installationen im Betrieb werden zusätzliche Anforderungen in Bezug auf Zugluft, Temperaturdifferenz zwischen Kopf und Knöcheln, Fussbodentemperatur und Asymmetrie der Strahlungstemperatur gestellt.

Die Anforderungen an die Raumluftqualität beinhalten u.a. die Verpflichtung, in der Vorprojektphase ein Lüftungskonzept zu erstellen und den erforderlichen, minimal notwendigen Aussenluftvolumenstrom sicherzustellen.

Zur Überprüfung der **Anforderungen an die thermische Behaglichkeit** enthält die Norm SIA 180 (SIA, 2014a) folgende Nachweise:

- für beheizte Räume den Nachweis des winterlichen Wärmeschutzes nach Kapitel 4, unter Annahme von Heizungs- und Klimaanlage, welche die Einhaltung der zulässigen empfundenen Temperatur sicherstellen;
- für Räume mit natürlicher Lüftung, während diese weder beheizt noch maschinell gekühlt sind, den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes nach Kapitel 5;
- für Räume mit natürlicher Lüftung, während diese weder beheizt noch maschinell gekühlt sind und interne Wärmeeinträge pro Tag von über 120 Wh/m² aufweisen, die Berechnung der resultierenden Temperaturen (empfundene Temperatur, Temperatur der Oberflächen, Lufttemperatur) mittels Simulationen gemäss Anhang C.2 und Verifizierung, dass die gestellten Anforderungen erfüllt werden.

Bei bestehenden Gebäuden kann die Einhaltung der Anforderungen durch Messungen gemäss Ziffern 2.6 und 5.3 überprüft werden. Dabei sind die Randbedingungen während der Messperiode zu erfassen und mit den Vorgaben für die rechnerischen Nachweise zu vergleichen.

Für die Beurteilung der Notwendigkeit einer maschinellen Kühlung ist der Nachweis nach SIA 382/1 (SIA, 2014b) zu führen.

Das Ziel des sommerlichen Wärmeschutzes ist es, Gebäude so zu projektieren und auszuführen, dass bei Nutzungen mit mässigen, internen spezifischen Wärmeeinträgen die Behaglichkeitsanforderungen bei bestimmungsgemässer Bedienung der beweglichen Sonnenschutzeinrichtungen und bei bedarfsgerechter natürlicher Lüftung ohne aktive Kühlung (jede Form der Kühlung, die mit zusätzlichem Stromverbrauch verbunden ist, inkl. Kühlung mit Grundwasser, Oberflächenwasser oder Erdwärmesonden) erfüllt sind. Diese Anforderungen gelten auch für Gebäude mit aktiver Kühlung.

Die Erfüllung der grundsätzlichen **Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz** kann mit einem der drei beschriebenen Verfahren nachgewiesen werden:

- Verfahren 1 umfasst die Einhaltung einfacher Anforderungen und den Nachweis einer effizienten Nachtkühlung.
- Verfahren 2 enthält drei Nachweise, um zu prüfen, dass eine effiziente Nachtkühlung möglich ist (Ziffer 5.2.3), die Sonnenschutzeinrichtungen genügend sind (Ziffer 5.2.4) sowie die Wärmedämmung und die Wärmespeicherfähigkeit ausreichend sind (Ziffer 5.2.5).
- Verfahren 3 prüft durch Simulationen mit den Randbedingungen von Anhang C.1, dass die Behaglichkeitsanforderungen erfüllt werden. Zu diesem Zweck müssen alle berechneten, empfundenen Temperaturen in der Sommerperiode unter der oberen Grenzkurve von Abbildung 9 liegen.

Bei Verfahren 1 werden Anforderungen an den Wärmedurchgangskoeffizient des Daches, der Ausführung von Oberlichtern, die Windwiderstandsklasse des aussenliegenden beweglichen Sonnenschutzes und der Raumgeometrie gestellt. Darüber hinaus muss die Wärmespeicherfähigkeit jedes Raumes mindestens mittel ($80 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$) nach Norm SIA 380/1 (SIA, 2016) sein und es gibt einen maximalen Glasanteil. Dieser ist abhängig von der Nutzung des Raumes und seiner Wärmekapazität, der Anordnung der Fenster an einer oder mehreren Fassaden und der Bedienung des Sonnenschutzes.

Der Nachweis der Nachtauskühlung (Ziffer 5.2.3) basiert auf der Annahme, dass ein Aussenluft-Volumenstrom pro Nettogeschossfläche von mindestens $10 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ erforderlich ist, um eine effiziente Nachtauskühlung durch eine natürliche Lüftung zu erreichen. Dies kann durch Öffnungen erreicht werden, deren Querschnittsfläche mindestens 5 % der Nettogeschossfläche des Raumes beträgt. Diese Öffnungen sollten nachts offenbleiben können und so positioniert werden, dass die Abluftöffnung an höchstmöglicher Stelle im Raum platziert ist. In tiefen Räumen (bei Raumtiefen von 2.5- bis 5.0-facher Raumhöhe) sind Öffnungen an zwei Fassaden erforderlich.

Der Nachweis für den Sonnenschutz (Ziffer 5.2.4) legt die Anforderungen an den Gesamtenergiedurchlassgrad g_{tot} von Fassadenfenstern (Verglasung und Sonnenschutz) nach Glasanteil der Fassade und ihrer Orientierung für Räume mit einer oder mehreren Fassaden sowie die Anforderungen an den Gesamtenergiedurchlassgrad g_{tot} von Dachflächenfenstern und Oberlichtern (Verglasung und Sonnenschutz) nach Glasanteil fest. Der bewegliche Sonnenschutz muss die empfohlene Windwiderstandsklasse gemäss Norm SIA 342 (SIA, 2009), Anhang 8.2, einhalten. Bei aktiv gekühlten Räumen wird der Sonnenschutz fassadenweise automatisch gesteuert (Oberlichter werden separat gesteuert).

Der Nachweis für die Wärmedämmung und Wärmespeicherfähigkeit (Ziffer 5.2.5) setzt einen dynamischen Wärmedurchgangskoeffizienten U_{24} von maximal $0.20 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ (dieser wird durch eine Dachkonstruktion mit einem U-Wert von $0.2 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ erreicht) und eine minimale, auf die Nettogeschossfläche bezogene Wärmespeicherfähigkeit (C_R/ANGF) eines Raumes von $45 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$ fest.

2.2.3 SIA 382/1 (SIA, 2014b)

Die Anforderungen an die Kälteerzeugung sind in der Norm SIA 382/1 (SIA, 2014b) festgelegt. Die Angaben in dieser Norm gelten für Räume mit Lüftungs- oder Klimaanlage. Für Räume mit natürlicher Lüftung und Räume, die weder beheizt noch gekühlt sind, gilt SIA 180 (SIA, 2014a).

Sie definiert die Notwendigkeit einer Kühlung, die Anforderungen an die Energieeffizienz des Gesamtsystems, die Nutzung der anfallenden Wärme oder des Freecoolings (Kühlung durch Nutzung einer natürlichen Wärmesenke (z.B. kühle Aussenluft) ohne Kältemaschine) sowie Anforderungen an den Betrieb der Klimaanlage: Die Norm «beschreibt die grundsätzlichen Kriterien für die Wahl der Lüftungsstrategie (inkl. Fensterlüftung) und nennt die technischen Rahmenbedingungen zur Erreichung eines möglichst geringen Energieverbrauchs für die Luftaufbereitung und Luftförderung in Lüftungs- und Klimaanlage. Zusätzlich werden die Bedingungen festgelegt, unter welchen eine Kühlung, Be- oder Entfeuchtung der Raumluft zweckmässig ist».

Die Norm definiert zusätzliche, bauliche Anforderungen zu den Normen SIA 180 (SIA, 2014a) und SIA 380/1 (SIA, 2016) für Gebäude mit Lüftungs- und Klimaanlage. Diese Anforderung sind auch einzuhalten, wenn nach den Kriterien dieser Norm eine Belüftung oder Klimatisierung zwar erwünscht oder notwendig ist, aber nicht ausgeführt wird.

Bei Räumen, für welche nach den Kriterien dieser Norm eine Kühlung notwendig oder erwünscht ist und bei allen Räumen, welche tatsächlich gekühlt werden, müssen die Anforderungen an die obengenannten Normen erfüllt werden, insbesondere gemäss Kapitel 5, Wärmeschutz im Sommer und gemäss Ziffer 3.6, Luftdichtheit der Gebäudehülle der Norm SIA 180 (SIA, 2014a), und es muss gleichzeitig eine Steuerung des Sonnenschutzes durchgeführt werden. Der Sonnenschutz von Fassadenfenstern muss mindestens fassadenweise anhand der gemessenen Bestrahlungsstärke oder eines gleichwertigen Kriteriums automatisch gesteuert werden. Der Sonnenschutz von Oberlichtern muss separat gesteuert werden.

Die **Notwendigkeit einer Kühlung** kann nach drei Kriterien bestimmt werden:

- 1) Spezialfälle mit besonderen Anforderungen an die Raumlufttemperatur. Falls eine Kühlung aufgrund besonderer Anforderungen an die Raumlufttemperatur unumgänglich ist.
- 2) Interne Wärmeeinträge und Fensterlüftung. Eine erste Beurteilung der Notwendigkeit einer Kühlung kann anhand der internen Wärmeeinträge pro Tag (Personen, Geräte und Beleuchtung) und den zusätzlich zur mechanischen Lüftung vorhandenen Möglichkeiten der Fensterlüftung gemäss Tabelle 5 erfolgen. Typische Werte der internen Wärmeeinträge verschiedener Nutzungen finden sich in der Norm SIA 380/4 (SIA, 2006) – durch das SIA Merkblatt 2056 (SIA, 2019) ersetzt – und im SIA Merkblatt 2024 (SIA, 2015).

Interne Wärmeeinträge pro Tag, in Wh/m ²			Kühlung
mit Fensterlüftung Tag und Nacht	mit Fensterlüftung bei Belegung	ohne Fensterlüftung	
> 200	> 140	> 120	notwendig
140 – 200	100 - 140	80 - 120	erwünscht ¹
< 140	< 100	< 80	nicht notwendig ¹

¹ Kühlung nur mit Anlagen mit kleinem Leistungsbedarf gemäss 5.5 zulässig (Abschnitt 4.5.5.3).

Tabelle 5: Beurteilung der Notwendigkeit einer Kühlung anhand der internen Wärmeeinträge pro Nettogeschossfläche und den zusätzlich zur mechanischen Lüftung vorhandenen Möglichkeiten der Fensterlüftung nach Norm SIA 382/1 (SIA, 2014b).

- 3) Hohe sommerliche Raumtemperatur. Eine vertiefte Beurteilung der Notwendigkeit einer Kühlung kann mittels einer dynamischen Simulation oder in bestehenden Bauten mit einer Messung der Raumtemperatur erfolgen. Durch dynamische Simulationen wird die Anzahl der Stunden, in denen die Raumtemperatur während der Nutzungszeit die obere Grenzkurve für Räume mit technischen Installationen in Betrieb (blaue Linie in Abbildung 9) überschreitet, berechnet. Bei einer Überschreitung von mehr als 100 Stunden pro Jahr ist eine Kühlung **notwendig**, bei bis zu 100 Stunden pro Jahr ist eine Kühlung **erwünscht**, ohne Überschreitung ist eine Kühlung **nicht notwendig**.

Die Norm sieht jedoch Ausnahmen bei bestehenden Bauten und bei Wohnbauten mit mechanischer Lüftung vor, wobei die Grenze bei 400 Stunden statt bei 100 Stunden angesetzt wird, indem eine erhöhte Toleranz infolge der Anpassungsfähigkeit der Nutzer (z.B. Öffnen von Fenstern oder Lüftungsflügeln, Beeinflussung der Stellung des beweglichen Sonnenschutzes u.a.) angenommen wird.

In jedem Fall kann auf eine Kühlanlage verzichtet werden, wenn die gleichen baulichen Voraussetzungen, wie bei gekühlten Räumen, gegeben sind und die Vorkehrungen für eine allfällige spätere Nachrüstung einer Kühlung getroffen werden.

Die Kühlung, falls nötig, wird auf die tatsächlich erforderliche Kühlleistung gemäss SIA 382/2 (SIA, 2011) ausgelegt. Wenn die Kühlung nach Kriterien 2 oder 3 nur erwünscht oder nicht notwendig ist und trotzdem eine Kühlung vorgesehen wird, sind nur Anlagen mit kleinem Leistungsbedarf zulässig. Als Anlagen mit kleinem Leistungsbedarf gelten «Anlagen mit einem elektrischen Leistungsbedarf für die Medienförderung (Luft, Wasser und andere Flüssigkeiten) und die Medienaufbereitung inkl. Kühlung und allfälliger Befeuchtung und Wasseraufbereitung von total maximal 7 W/m² gekühlte Nettogeschossfläche». In bestehende Anlagen und bei sanierten Anlagen kann dieser totale elektrische Leistungsbedarf bis zu 12 W/m² erreichen.

Bei Wohngebäuden liegen die Standardwerte der internen Wärmeeinträge pro Nettogeschossfläche und Tag bei 84 Wh/m² für Mehrfamilienhäuser (MFH) bzw. 71 Wh/m² für Einfamilienhäuser (EFH), gemäss SIA Merkblatt 2024 (SIA, 2015). Das bedeutet, dass in einem MFH eine Kühlung nicht notwendig ist, wenn die Möglichkeit der Fensterlüftung bei Belegung besteht. In einem EFH ist eine Kühlung auch ohne Fensterlüftung nicht notwendig. Dies ist auch der Fall, wenn man die Idealwerte der internen Wärmeeinträge für MFH und EFH – 58 bzw. 46 Wh/m² – betrachtet. Bei bestehenden Gebäuden liegen die internen Wärmeeinträge bei 96 Wh/m² für MFH bzw. 83 Wh/m² für EFH, daher wäre in beiden Fällen eine Fensterlüftung bei Belegung erforderlich, so dass keine Kühlung notwendig ist.

Die Norm legt zusätzlich das Vorgehen zur Bestimmung des **Grundkonzepts zur Aussenluftversorgung** fest, wie Abbildung 10 zeigt. Bei diesem Verfahren wird ermittelt, ob eine reine Fensterlüftung grundsätzlich möglich ist oder nicht. Dies unter Berücksichtigung des sommerlichen Wärmeschutzes: die Fenster ermöglichen die Nachtlüftung und intensive Lüftung nur bei günstigen Aussenlufttemperaturbedingungen. Deren Verwendung hängt jedoch stark vom Benutzerverhalten ab. Zudem besteht ein grösseres Risiko der Dauerlüftung im Winter, was zu einem erhöhtem Luftaustausch und Energieverbrauch führt.

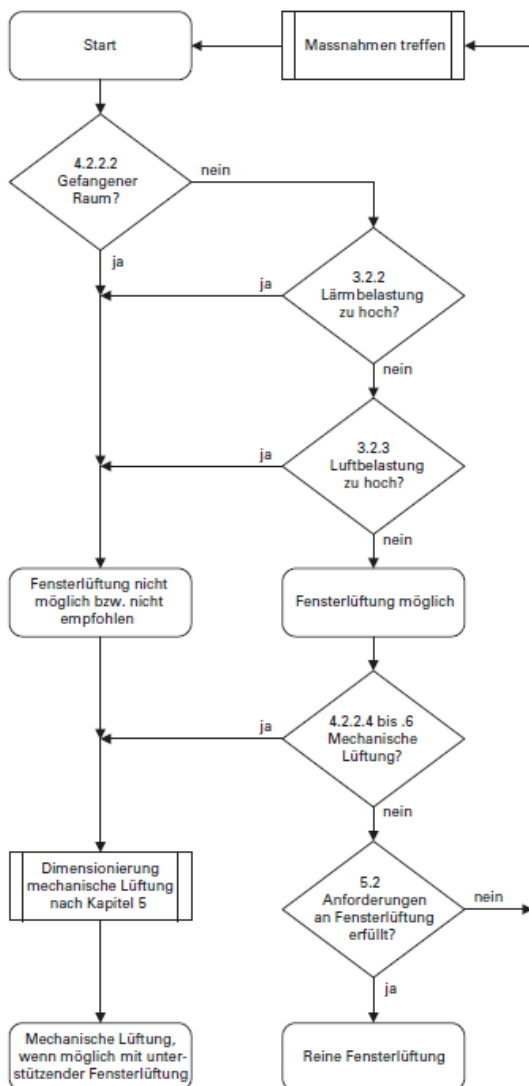


Abbildung 10: Bestimmung des Grundkonzepts zur Aussenluftversorgung gemäss SIA 382/1 (SIA, 2014b). Quelle: SIA, 2014.

Aufgrund der Vorteile der Fensterlüftung sieht die Norm vor, dass «wenn möglich die Fenster trotz mechanischer Lüftung geöffnet werden können sollten (unterstützende Fensterlüftung). Allerdings sollten diese nur für kurze ergänzende Stosslüftungsphasen genutzt werden und sonst geschlossen bleiben. Kippfenster sind nur vorzusehen, wenn eine Kühlanlage fehlt und die Kippfenster für die nächtliche Auskühlung im Sommer verwendet werden».

Für die effektive Fensterlüftung muss eine Mindestlüftungsöffnung gewährleistet sein. Nach der Norm ist diese folgendermassen zu bestimmen: die freie Strömungsfläche, der im betrachteten Raum zu öffnenden Fenster, muss mindestens 3 % betragen. Bei Räumen mit intensiverem Fensterlüftungsbedarf oder für die Sicherstellung der Nachtauskühlung durch natürliche Lüftung (Norm SIA 180 (SIA, 2014a)), muss die Öffnung mindestens 5 % der Nettogeschossfläche des Raumes betragen. Die zu öffnenden Fensterflächen sollten möglichst gleichmässig verteilt sein. Zudem sind hohe Öffnungen wesentlich effizienter als breite, da heisse Luft aufsteigt und sich unter der Decke ansammelt. Aus diesem Grund ist die Abluftöffnung an der höchstmöglichen Stelle im Raum zu platzieren.

Durch die Anordnung der Fenster wird die Wirksamkeit der Fensterlüftung entsprechend der Raumgeometrie sichergestellt: «Bei Räumen mit einer Raumtiefe bis zur 2.5-fachen Raumhöhe genügen Fenster

auf einer Fassadenseite, bei Raumtiefen von 2.5- bis 5.0-facher Raumhöhe sollen Fenster auf zwei Fassadenseiten (gegenüberliegend oder über Eck) vorhanden sein. Wo dies nicht möglich ist und bei grösseren Raumtiefen ist der Einsatz einer mechanischen Lüftung notwendig».

Die Norm SIA 382/1 (SIA, 2014b) ordnet Klimaanlage den folgenden Anlagentypen zu: einfache Klimaanlage, Klimaanlage mit Luftbefeuchtung und Klimaanlage mit Luftbefeuchtung und -entfeuchtung. Die hier untersuchten Klimageräte sind einfache Klimaanlagen, die nur mit Luft funktionieren (Nur-Luft-System) und eine zeitabhängige Steuerung einsetzen.

Für die luftgekühlten Kältemaschinen unter 12 kW Kälteerzeugerleistung, die in dieser Studie berücksichtigt werden, enthält diese Norm keine Anforderungen. Sie legt jedoch energetische Anforderungen für luftgekühlte Kältemaschinen (kompakter Kaltwassersatz für die Aussenaufstellung) ab 12 kW Kälteerzeugerleistung fest.

Alle Klimaanlagen sollen zudem mit einer wirksamen Wärmerückgewinnung ausgerüstet werden.

Weitere Aspekte in Bezug auf die akustische Behaglichkeit und den Schallschutz sowie die Anordnung von Aussenluftfassungen und Fortluftöffnungen sind zu berücksichtigen.

Die Standard-Berechnungsmethoden des Leistungs- und Energiebedarfs von klimatisierten Gebäuden erfolgt nach der Norm SIA 382/ (SIA, 2011) mit den Klimadaten nach SIA Merkblatt 2028 (SIA, 2019).

2.2.4 Delegierte Verordnung (EU) Nr. 626/2011 (Europäische Kommission, 2011)

Die Delegierte Verordnung (EU) Nr. 626/2011 (Europäische Kommission, 2011) legt verschiedene Effizienzskaleten für Luftkonditionierer unterschiedlicher Ausführungen mit einer Kälteleistung (bzw. Heizleistung bei reiner Heizfunktion) bis 12 kW fest. In dieser Verordnung werden zwei Energieeffizienzskaleten für die Energieverbrauchskennzeichnung eingeführt (für Zweikanal- und Einkanalgeräte sowie für Luftkonditionierer mit Ausnahme von Zweikanal- und Einkanalgeräten – in dieser Studie als Split-Systeme bezeichnet). Da die Methoden zur Bewertung der Effizienz der Systeme unterschiedlich sind, können die Effizienzskaleten gemäss Geräteetiketten nicht unmittelbar miteinander verglichen werden.

Bei Systemen, die sowohl zum Kühlen als auch zum Heizen verwendet werden können, bewertet die Energieeffizienzklasse sowohl die Effizienz der Kühl- als auch der Heizfunktion. Systeme, die nur dem Kühlen dienen, erhalten nur eine Bezeichnung (von der niedrigsten Effizienz G bis zur höchsten Effizienz A+++). Systeme, die dem Kühlen und Heizen dienen, werden mit zwei Klassen bezeichnet, wobei die beiden Skalen unterschiedlich sein können, z.B. A+++/A++ (Effizienzklasse Kühl-/Heizfunktion).

Die **Skala für Zweikanal- und Einkanalgeräte** (Tabelle 6) ist durch die Nennleistungszahl¹² im Kühlbetrieb (EER_{rated}) und im Heizbetrieb (COP_{rated}) definiert. Die Abkürzung EER_{rated} bezeichnet die angegebene Kühlleistung (kW) geteilt durch die Nenn-Leistungsaufnahme eines Geräts im Kühlbetrieb (kW) unter Norm-Nennbedingungen¹³ (mit einer Aussentemperatur von 35 °C – Trockentemperatur – und einer Raumlufttemperatur von 27 °C). Diese Zahl gibt daher das Verhältnis von der Kühlleistung zur Stromaufnahme an. In gleicher Weise bezeichnet die Nennleistungszahl im Heizbetrieb (COP_{rated}) die angegebene Heizleistung (kW) geteilt durch die Nenn-Leistungsaufnahme eines Geräts im Heizbetrieb (kW) unter Norm-Nennbedingungen.

¹² Nennleistung (P_{rated}): Kühl- oder Heizleistung des Dampfverdrichtungszyklus des Geräts unter Norm-Nennbedingungen (Europäisches Parlament, 2011).

¹³ Norm-Nennbedingungen: die Kombination von Raumluft- und Aussenlufttemperaturen, die die Betriebsbedingungen für die Ermittlung des Schalleistungspegels, der Nennleistung, der nominalen Luftstromrate sowie der Nennleistungszahl im Kühlbetrieb und/oder im Heizbetrieb» gemäss Anhang VII Tabelle 2 der Delegierten Verordnung (EU) Nr. 626/2011 (Europäische Kommission, 2011).

	Zweikanalgeräte		Einkanalgeräte	
	EER _{rated}	COP _{rated}	EER _{rated}	COP _{rated}
A+++	≥ 4.10	≥ 4.60	≥ 4.10	≥ 3.60
A++	3.60 ≤ EER < 4.10	4.10 ≤ COP < 4.60	3.60 ≤ EER < 4.10	3.10 ≤ COP < 3.60
A+	3.10 ≤ EER < 3.60	3.60 ≤ COP < 4.10	3.10 ≤ EER < 3.60	2.60 ≤ COP < 3.10
A	2.60 ≤ EER < 3.10	3.10 ≤ COP < 3.60	2.60 ≤ EER < 3.10	2.30 ≤ COP < 2.60
B	2.40 ≤ EER < 2.60	2.60 ≤ COP < 3.10	2.40 ≤ EER < 2.60	2.00 ≤ COP < 2.30
C	2.10 ≤ EER < 2.40	2.40 ≤ COP < 2.60	2.10 ≤ EER < 2.40	1.80 ≤ COP < 2.00
D	1.80 ≤ EER < 2.10	2.00 ≤ COP < 2.40	1.80 ≤ EER < 2.10	1.60 ≤ COP < 1.80
E	1.60 ≤ EER < 1.80	1.80 ≤ COP < 2.00	1.60 ≤ EER < 1.80	1.40 ≤ COP < 1.60
F	1.40 ≤ EER < 1.60	1.60 ≤ COP < 1.80	1.40 ≤ EER < 1.60	1.20 ≤ COP < 1.40
G	< 1.40	< 1.60	< 1.40	< 1.20

Tabelle 6: Energieeffizienzklassen für Zweikanal- und Einkanalgeräte. Quelle: Europäische Kommission 2011.

Die **Skala für Luftkonditionierer mit Ausnahme von Zweikanal- und Einkanalgeräten** (Tabelle 7) – d.h. Split-Systeme – wird stattdessen über die jahreszeitbedingte Leistungszahl im Kühlbetrieb (SEER) definiert. Diese berücksichtigt den für die gesamte Kühlperiode repräsentativen Gesamtenergiewirkungsgrad des Geräts. Da Luftkonditionierer überwiegend unter Teillastbedingungen betrieben werden, spiegelt dieses Verfahren die Effizienz des Systems besser wieder. Die SEER bezeichnet den für die gesamte Kühlperiode repräsentativen Gesamtenergiewirkungsgrad des Geräts und ergibt sich aus dem Bezugs-Jahreskühlenergiebedarf geteilt durch den Jahresstromverbrauch für die Kühlung. Die Energieeffizienzklasse enthält auch die jahreszeitbedingte Leistungszahl im Heizbetrieb (SCOP), welche den Gesamtenergiewirkungsgrad des Geräts für die gesamte angegebene Heizperiode angibt.

	SEER	SCOP
A+++	SEER ≥ 8.50	SCOP ≥ 5.10
A++	6.10 ≤ SEER < 8.50	4.60 ≤ SCOP < 5.10
A+	5.60 ≤ SEER < 6.10	4.00 ≤ SCOP < 4.60
A	5.10 ≤ SEER < 5.60	3.40 ≤ SCOP < 4.00
B	4.60 ≤ SEER < 5.10	3.10 ≤ SCOP < 3.40
C	4.10 ≤ SEER < 4.60	2.80 ≤ SCOP < 3.10
D	3.60 ≤ SEER < 4.10	2.50 ≤ SCOP < 2.80
E	3.10 ≤ SEER < 3.60	2.20 ≤ SCOP < 2.50
F	2.60 ≤ SEER < 3.10	1.90 ≤ SCOP < 2.20
G	SEER < 2.60	SCOP < 1.90

Tabelle 7: Energieeffizienzklassen für Luftkonditionierer mit Ausnahme von Zweikanal- und Einkanalgeräten. Quelle: Europäische Kommission 2011.

Es ist zu erwarten, dass sich die Energieeffizienzskaalen für Luftkonditionierer in den nächsten Jahren ändern werden (dies ist ebenso bei bestimmten Haushaltsprodukten der Fall). Im Dezember 2020 wurde die delegierte Verordnung (EU) 2021/340 (Europäisches Parlament, 2020) der Kommission zur Änderung der delegierten Verordnungen (EU) 2019/2013, (EU) 2019/2014, (EU) 2019/2015, (EU) 2019/2016, (EU) 2019/2017 und (EU) 2019/2018 vorgelegt. Dabei wurde Bezug auf die Anforderungen an die Energieverbrauchskennzeichnung von elektronischen Displays, Haushaltswaschmaschinen und Haushaltswaschtrocknern, Lichtquellen, Kühlgeräten, Haushaltsgeschirrspülern und Kühlgeräten mit Direktverkaufsfunktion genommen.

Im Laufe der Zeit hat sich die Effizienz der Produkte verbessert. Es war notwendig, für einige Produktkategorien eine neue Klasse einzuführen (bis zu A+++). Gleichzeitig wurden die niedrigeren Klassen schrittweise abgeschafft, da sich die Effizienz aller Produkte so weit verbessert hat, dass diese nicht mehr benötigt wurden. Bei Klimageräten gibt es auf dem Markt Geräte mit einer Skala von A+++ bis D, während Fernseher, Waschmaschinen oder Kühl- und Gefriergeräte auf einer Skala von A bis F eingestuft werden. Diese Tatsache könnte die Verbraucher/innen zu der Annahme verleiten, dass ein Klimagerät mit einer C-Skala relativ effizient ist, obwohl dies nicht der Fall ist.

Das Ziel dieser neuen Verordnung ist es, innovative und effiziente Produkte zu fördern und gleichzeitig die Verbraucher/innen mit einer neuen Skala von A (höchste Effizienz) bis G (geringste Effizienz) eine bessere Vergleichsmöglichkeit zu bieten.

Die neue Verordnung beinhaltet nicht nur die neue Skala, sondern bildet auch neue Anforderungen sowie eine neue, strengere und realistischere Berechnungsmethoden ab. Daher sind das alte und das neue Etikett nicht vergleichbar.

Nach dem neuen Label wird ein Produkt viel schlechter eingestuft, da die neue Skala viel anspruchsvoller geworden ist oder sich möglicherweise die Anforderungen oder Prüfkriterien geändert haben.

Ab dem 1. März 2021 gilt die neue Skala von A bis G für:

- Kühlgeräte.
- Geschirrspüler.
- Waschmaschinen.
- Fernsehgeräte.

Ab dem 1. September 2021 wird eine neue Skala für Lichtquellen veröffentlicht. Weitere Produktgruppen werden schrittweise folgen.

3. Vorgehen

Das Projekt wurde in zwei Handlungsfelder aufgeteilt. In der ersten Projektphase wurde der Klimakälteverbrauch einer Wohnung unter Berücksichtigung der zukünftigen klimatischen Bedingungen für verschiedene Nutzungsbedingungen, Kühlgeräte und Wirkungsgrade untersucht. In der zweiten Phase wurde die aktuelle Gesetzgebung analysiert und bei Bedarf wurden Verbesserungsmöglichkeiten bestimmt. Dieses Kapitel beschreibt die verwendete Methodik sowie die Parameter, die als Basis für die thermischen Simulationen dienten und daher die Grundlage dieser Studie bildeten.

3.1 Klimadaten und Szenarien

Thermische Simulationen wurden für die Quantifizierung der Betriebsenergie der Referenzwohnung auf Stufe Nutz- und Endenergie sowie der Behaglichkeit verschiedener Zonen dieses Modells unter Berücksichtigung des aktuellen Klimas und zukünftiger Klimaprognosen durchgeführt. Das aktuelle Klima (Periode "1995" (1980-2009)) wurde durch Klimadatensätze bestehend aus Messungen bestimmt. Das zukünftige Klima wurde auf der Basis von Klimaprojektionen aus dem Projekt «ClimaBau» (Settembrini, et al., 2017) simuliert.

Diese zukünftigen Klimadaten wurden aus der **Klimaprojektion der Periode "2060" (2045-2074) für das Emissionsszenario A1B aus dem Bericht „Swiss Climate Change Szenarios CH2011“** (CH2011, 2011) erstellt. Dieses Emissionsszenario stellt ein Nicht-Interventionsszenario dar und nimmt einen Anstieg der Emissionen vorweg. Es beschreibt ein zukünftiges Szenario mit sehr schnellem Wirtschaftswachstum, geringem Bevölkerungswachstum und der raschen Einführung neuer und effizienterer Technologien mit einer ausgewogenen Nutzung aller Energiequellen.

Im Vergleich zum Zeitraum 1980-2009 wird für das A1B-Szenario ein Anstieg der saisonalen Mitteltemperatur von 2.7 – 4.1. °C prognostiziert. Diese Schätzung beruht auf Vorhersagen für alle in der Schweiz betrachteten Regionen.

Eine detaillierte Beschreibung des Aufarbeitungsprozesses ist im Bericht des Projekts «ClimaBau» (Settembrini, et al., 2017) zu finden.

Die **Stadt Basel**, die in der Region Nordwestschweiz lokalisiert ist, wurde für die Simulationen als Referenzstandort ausgewählt, da ihr Klima als repräsentativ für das Schweizer Mittelland betrachtet werden kann. In einem zweiten Schritt wurden Simulationen mit dem Klima der **Stadt Lugano** durchgeführt, da sich das Klima der Region Südschweiz deutlich vom Klima im Mittelland unterscheidet. Die Simulationen wurden für vier spezifische Jahre durchgeführt, welche bereits zur Beurteilung der Behaglichkeit in der Studie «ClimaBau» (Settembrini, et al., 2017) verwendet wurden. Die vier Jahre setzten sich zusammen aus je zwei durchschnittlichen Jahren aus den Referenzperioden "1995" und "2060", sowie aus zwei ausserordentlich warmen Jahren («2003» und «2068»). Für die Periode "1995" wurde das wärmste Jahr ausgewählt, für die Periode A1B "2060" das Medianjahr («2063») aus den zehn wärmsten Jahren der zehn Modellketten. Dieses Jahr («2068») stellt daher ein extrem heisses Jahr mit einer entsprechend geringen Eintretenswahrscheinlichkeit dar.

Die nachfolgenden Jahre wurden simuliert:

- Medianjahr der Referenzperiode (2004).
- Wärmstes Jahr der Referenzperiode (2003).
- Medianjahr der Periode A1B (2063).
- Warmes Jahr der Periode A1B (2068).

3.2 Auswahl der Klimageräte

Wohngebäude in der Schweiz sind derzeit in der Regel nicht mit einem Kühlsystem ausgestattet. Die Anzahl der mobilen Kühlsysteme ist jedoch deutlich gestiegen, wie Verkaufsstatistiken (Marktstatistik vom Fachverband Elektroapparate für Haushalt und Gewerbe Schweiz, (FEA, 2020)) der letzten heissen Sommer gezeigt haben. Dies ist nicht nur auf die hohen Temperaturen und häufigeren Hitzewellen zurückzuführen, sondern auch auf die gestiegenen Komfortansprüche.

Wie in Abschnitt 1.2 beschrieben, arbeiten diese mobilen Kühlsysteme äusserst ineffizient, weshalb in dieser Studie auch Split-Systeme (bestehend aus einem Aussengerät und einem Innengerät) und Multi-Split-Systeme (bestehend aus einem Aussengerät und mehreren Innengeräten) als effizientere Alternative betrachtet wurden.

Das in dieser Studie untersuchte Kompaktgerät entspricht der Energieeffizienzklasse A mit einer Nennleistungszahl im Kühlbetrieb von 2.6. Wie mehrere Studien zeigen (Fitzner, Finke, & Zeidler, 2007; Burke, et al., 2015), wird diese Nennleistungszahl jedoch selten erreicht. Daher wurde für die Simulationen eine Nennleistungszahl von 2.1 verwendet.

Die in dieser Studie untersuchten Split- und Multi-Split-Systeme entsprechen der Energieeffizienzklasse A++ mit einer Nennleistungszahl im Kühlbetrieb von 7.5.

Die Leistungsnachweise für reversible Komfortklimageräte bis 12 kW (Type Split und Multi-Split) aus der Eurovent-Datenbank (Eurovent Certita Certification, 2019) wurden untersucht. Zusätzlich zu SEER und SCOP enthalten diese Zertifikate den EER Wert, welcher unter gleichen Norm-Nennbedingungen wie Ein- und Zweikanalsysteme ermittelt wurde. Der durchschnittliche EER-Wert mit einer Aussentemperatur von 35 °C und einer Raumlufttemperatur von 27 °C eines Multi-Split-Systems mit einer SEER von 7.5 liegt bei etwa 3.7, wobei es auch Geräte der Energieeffizienzklasse A+++ auf dem Markt gibt (mit kleinerer Leistung, deren EER bis zu 6.0 (4.8 als Mittelwert) erreichen kann).

3.3 Photovoltaikanlage und Batteriespeicher

Photovoltaikanlagen bieten eine umweltfreundliche Möglichkeit, um den Strom für die Kälteproduktion zu erzeugen, da an heissen Sommertagen – wenn die Kühlung besonders erwünscht ist – meist viel Solarstrahlung zur Verfügung steht. Die Stromspitzen im Sommer können also direkt genutzt werden, um die Klimageräte zu versorgen.

Die Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie ermöglicht es, den Kühlverbrauch über einen längeren Zeitraum zu decken, während die Photovoltaikanlage keinen Strom produziert, so dass der gespeicherte Strom in den Nächten zum Kühlen genutzt werden kann.

Batterien enthalten meist giftige Materialien wie Blei, Cadmium oder Quecksilber, die keinesfalls in die Umwelt gelangen dürfen. Bei den heutigen Photovoltaikanlagen werden hauptsächlich Blei- oder Lithiumbatterien als Speichersysteme verwendet. Blei kann recycelt werden. Lithiumbatterien enthalten auch wertvolle und recycelbare Stoffe: Eisen, Ferromangan, sowie Kobalt, Nickel und Kupfer. Diese Batterien enthalten Lösungsmittel als Elektrolyt, so dass ein gewisses Risiko besteht, dass sich die Batterie entzündet. Die Entsorgung erfolgt über eine vorgezogene Entsorgungsgebühr. Die Rücklaufquote aller Geräte- und Industriebatterien (exkl. Lithiumbatterien) beträgt dabei aktuell 82.1%, diejenige von Lithiumbatterien jedoch nur 19.5%¹⁴. Weniger verbreitet sind Salzwasserbatterien. Diese enthalten jedoch keine giftigen Materialien und können zu 100 % recycelt werden. Deshalb hat der Einsatz einer Batterie (ausser bei Salzwasserbatterien) in einer Photovoltaikanlage i.d.R. immer auch Auswirkungen auf die Umwelt.

¹⁴<http://www.swissrecycling.ch/wertstoffe/batterien-und-akkus/>

Die simulierte Photovoltaikanlage wurde in einem ersten Schritt in Anlehnung an Artikel 1.27 der MuKE 2014 (EnDK, 2015) mit einer Leistung von $10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert. Für den Wirkungsgrad der Photovoltaikanlage wurden Werte von 0.17 für die aktuelle Periode "1995" und 0.22 für die zukünftige Periode "2060" (unter Berücksichtigung des technischen Fortschritts) angenommen.

Die Speicherkapazität der Batterie wird entsprechend der jährlichen, elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage dimensioniert, wobei die Speicherkapazität $1/1'000^{15}$ der jährlichen elektrischen Produktion entspricht (die Speicherkapazität in kWh entspricht ungefähr der Leistung der Anlage in kW_p). Dank der Speicherung kann die Energie zu einem späteren Zeitpunkt, wenn nur wenig oder keine Sonnenenergie zur Verfügung steht, genutzt werden.

In einer Photovoltaikanlage mit integriertem, elektrischem Speicher steuert der Laderegler die verschiedenen Stromwege. Wird der durch die Photovoltaikanlage produzierte Strom direkt im Gebäude benötigt, wird der gewonnene Solarstrom direkt aus der Photovoltaikanlage, nach der Umwandlung in Wechselstrom und der Erhöhung der Spannung mit Hilfe eines Wechselrichters, verbraucht. Wird mehr Strom produziert als benötigt, wird dieser in der Batterie gespeichert. Gleiches gilt, wenn das Gebäude keinen Strom benötigt und die Photovoltaikanlage Strom produziert. Falls die Photovoltaikanlage zu viel Energie erzeugt und der Speicher vollständig mit Energie gefüllt ist, wird der Überschuss an Solarstrom ins öffentliche Netz eingespeist. Wenn das Gebäude Strom benötigt, aber weder die Photovoltaikanlage noch die Batterie diese erbringen kann, bezieht das Gebäude die Elektrizität direkt aus dem öffentlichen Netz.

Beim Laden und Entladen von elektrischen Speichern entstehen Verluste. Der Wirkungsgrad für das Laden-Entladen der Batterie inklusive Batterieumrichter mit 95 % Wirkungsgrad entspricht 0.85 für die aktuelle Periode "1995" und 0.90 für die zukünftige Periode "2060" (vgl. Tabelle 8). Die Entladetiefe für die Periode "1995" und die Periode "2060" entsprechen 85 % bzw. 100 %. Die Nutzkapazität der Batteriespeicher wird daher auf 85 % bzw. 100 % der Speicherkapazität festgelegt. Die Selbstentladung von Batterien ist bei jedem Batterietyp unterschiedlich und ist zudem temperaturabhängig, liegt aber in der Regel bei ca. 3-5 % pro Monat. Da eine lange Speicherbetriebsdauer in diesem Fall nicht wichtig ist, sondern eher ein häufiger Batteriebetrieb, wird davon ausgegangen, dass der Selbstentladungsprozess nicht stattfindet.

	Referenzperiode "1995"	Periode A1B "2060"
Wirkungsgrad der Photovoltaikanlage	0.17	0.22
Wirkungsgrad Laden-Entladen inkl. Batterieumrichter mit 95 % Wirkungsgrad	0.85	0.90
Entladetiefe der Batterie	85 %	100 %

Tabelle 8: Annahmen für die Charakterisierung des PV-Systems und der Batterie.

Auf Grundlage der Ergebnisse wird die Auswirkung einer Vergrößerung der Photovoltaikanlage und des Batteriespeichers bewertet.

3.4 Wohntypologie

Die untersuchte Wohnung ist die Dachwohnung eines Mehrfamilienhauses, das 2014 gebaut wurde. Diese Wohnung gehört zur Gebäudetypologie, welche in der Studie «ClimaBau» (Settembrini, et al., 2017) als „Neubau hybrid“ beschrieben wurde. In diesem Fall wurde ein massives Bausystem definiert, was der Bauart der meisten Wohngebäude in der Schweiz entspricht.

¹⁵Faustregel zur Dimensionierung der Batteriekapazität über die jährliche elektrische Produktion einer Photovoltaikanlage. Unterlagen Kurs: «S03 PV-Anlagen & Batteriespeicher. Standardanlagen selbstständig planen und realisieren» am 20. Mai 2019, Konferenz Kantonalen Energiefachstellen Regionalkonferenz Zentralschweiz.

Es handelt sich um eine 4.5 Zimmer-Eckwohnung mit einem südwest-orientierten Wohnbereich und drei nordost-orientierten Zimmern. Wie in Abbildung 11 dargestellt, liegt eine breite Loggia vor dem Wohnbereich, die die grossen Glastüren vor der Sonne schützt. Alle Fenster haben Rafflamellenstoren. 34 % der Fassade sind verglast, wobei der Glasanteil der Südwestfassade mit 47 %, der Nordwestfassade mit 36 % und der Nordostfassade mit 25 % etwas geringer ist. Das Gebäude ist nach Minergie® zertifiziert (U-Wert: Aussenwand 0.15 W/m²K, Dach 0.16 W/m²K, Boden 0.19 W/m²K). Die Verglasung hat einen U-Wert von 0.7, einen g-Wert von 0.51 und einen T_{vis} von 0.71 (Dreifachwärmeschutzglas 0.7 gemäss SIA 382/1:2007 (SIA, 2007)).

Es wurde angenommen, dass keine Nachbargebäude ihren Schatten auf die untersuchte Wohnung werfen.

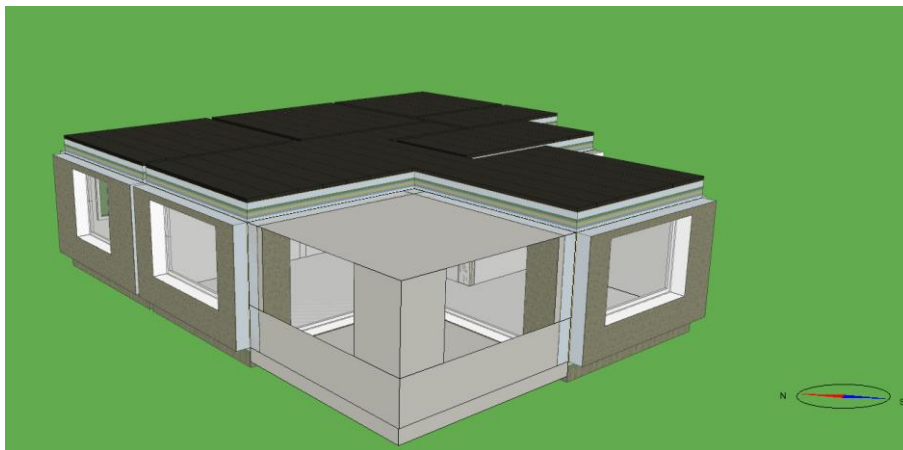


Abbildung 11: Geometrisches Modell der untersuchten Dachwohnung. Quelle: Hochschule Luzern.

Die Aufteilung der Räume sowie deren Bezeichnung, die später bei der Simulation und Auswertung der Ergebnisse verwendet werden, ist in Abbildung 12 dargestellt.

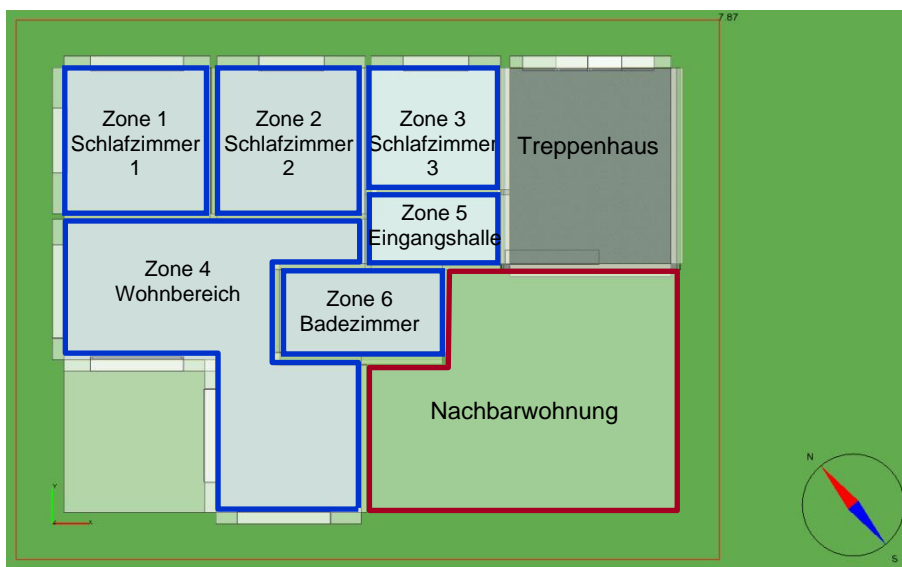


Abbildung 12: Grundriss des Wohnmodells mit entsprechender Zonenaufteilung. Quelle: Hochschule Luzern.

Eine Tabelle (Tabelle 28) mit den wichtigsten Eigenschaften der Wohnung sowie Konstruktionsdetails der Gebäudehülle befindet sich im Anhang 8.1 "Beschrieb Referenzwohnung".

3.5 Grundlagen der Gebäudesimulationen

Die Untersuchungen wurden mit der Simulationssoftware IDA ICE 4.8 durchgeführt. Diese Software erlaubt die Quantifizierung von wesentlichen Kenngrössen der Betriebsenergie von Gebäuden auf Stufe Nutz- und Endenergie, sowie der Behaglichkeit von verschiedenen Modellzonen. Letztere entsprechen in dieser Studie den verschiedenen Räumen der Wohnung, wie in Abbildung 12 dargestellt.

In diesem Abschnitt wurden die Rahmenbedingungen und die getroffenen Annahmen beschrieben, auf denen die Simulationen basieren. Diese Parameter haben einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse, was bei der Analyse der Simulationsergebnisse entsprechend berücksichtigt wurde.

3.5.1 Mechanische Lüftung

Es wurde grundsätzlich eine CO₂-gesteuerte, mechanische Lüftung mit einem Lüftungsstrom von 1 m³/(m²h) angenommen. Die Steuerung erfolgt dabei automatisch in Abhängigkeit der CO₂-Konzentration im Raum, bei einem CO₂-Pegel von 1'000-1'400 ppm gemäss SIA 382/1:2014 (SIA, 2014b), Raumluftqualität RAL 3. Der Aussenluft-Volumenstrom wurde bei extremen Aussenlufttemperaturen gemäss Abschnitt 2.2.6.5 der Norm SIA 382/1 (SIA, 2014b) reduziert. Die mechanische Lüftung verfügt über eine Wärmerückgewinnung mit einem Wirkungsgrad von 85 %. Im Sommer wird die Wärmerückgewinnung nur aktiviert, wenn die Temperatur im Gebäude niedriger als die Aussentemperatur ist.

Die mechanische Lüftung wurde mit einer natürlichen Lüftung kombiniert, um die Vorteile der freien Kühlung zu nutzen. Die Bedingungen, unter denen die Nachtkühlung stattfindet, sind im Abschnitt 3.5.3 festgehalten.

3.5.2 Verschattungssysteme

Bei der Bewertung des Komforts, des Energiebedarfs und -verbrauchs der Klimageräte wurde nicht eine adäquate Nutzung des Gebäudes simuliert. Daher weichen die berücksichtigten Überlegungen hinsichtlich des Einsatzes der Verschattungssysteme sowie der Nachtlüftung (Abschnitt 3.5.3) von den in den Normen festgelegten Bedingungen ab.

Die Wohnung verfügt über Lamellenstoren an allen Fenstern. Diese Sonnenschutzsysteme garantieren einen Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) von 0.10.

Ab einer Globalstrahlung von 150 W/m² (in Anlehnung an die Studie "S.A.D.L.E.S.S." (Schrader, Gerber & Menti, 2015) auf die entsprechende Fassade, wenn die empfundene Temperatur im Raum behaglich oder zu warm ist sowie einer Windgeschwindigkeit (Stundenmittelwert) von weniger als 40 km/h (gemäss SIA 382/1:2007 (SIA, 2007)), wurden die Sonnenschutz-Systeme als zu 2/3 geschlossen simuliert.

3.5.3 Nachtkühlung

Die Öffnung der Fenster in der ganzen Wohnung erfolgt unter folgenden Bedingungen der Aussen- und Raumlufttemperatur: $T_{AUL} < T_{RAL}$ & $T_{RAL} > 22$ °C, gemäss SIA 382/1:2007 (100 %ig geöffnetes Fenster und 33 %ig geöffnete Balkontür). Zudem erfolgt das Öffnen der Fenster bei zutreffenden Bedingungen nur in den Lüftungszeiträumen von 06:00 bis 07:00 Uhr und 18:00 bis 22:00 Uhr.

Der Fensteranteil der Wohnung ist relativ hoch (Abschnitt 3.4), sodass trotz der begrenzten Fensteröffnungszeiten ein grosser Luftaustausch möglich ist. Jedoch ermöglichen die festgelegten Lüftungszeiträume nicht in jedem Fall die optimale Ausnutzung von tiefen Aussenlufttemperaturen.

3.5.4 Beleuchtung und Geräte

Die Wärmeeintragsleistung der Beleuchtung und Geräte wurde gemäss SIA Merkblatt 2024 (SIA, 2015) definiert.

Die elektrische Leistung sowie die Wärmeeintragsleistung der Raumbeleuchtung wurden mit 2.7 W/m² definiert und die minimale Beleuchtungsstärke wurde mit 50 Lux simuliert. Die Beleuchtung wurde über einen Zeitplan (Abbildung 13) und über das Tageslicht der Räume gesteuert.

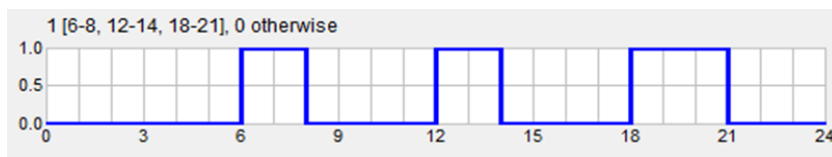


Abbildung 13: Zeitplan der Beleuchtung; bei 1.0 ist das Licht eingeschaltet, bei 0.0 ausgeschaltet. Quelle: Annahme nach SIA Merkblatt 2024 (SIA, 2015).

Die elektrische sowie die Wärmeeintragsleistung der Geräte wurden mit 8.0 W/m^2 definiert und über einen Zeitplan (Abbildung 14) gesteuert.

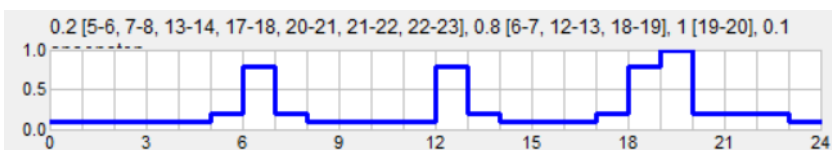


Abbildung 14: Zeitplan der Geräte; bei 1.0 ist die Elektrische- sowie die Wärmeeintragsleistung der Geräte 8.0 W/m^2 , bei 0.1 (z.B. ausserhalb der Nutzungszeit, während der Nacht) liegt diese bei 0.8 W/m^2 . Quelle: SIA Merkblatt 2024 (SIA, 2015).

3.5.5 Personenbelegung

Die Personenbelegung wurde über einen Zeitplan entsprechend der Raumnutzung (Differenzierung von Wohn- und Schlafzimmer) geregelt. Der Wohnbereich ist tagsüber mit unterschiedlichem Belegungsgrad über einen Zeitplan (Abbildung 15) und die Schlafzimmer nachts von 21:00 bis 06:00 Uhr (Abbildung 16) belegt. Diese Zeitpläne basieren teilweise auf dem Zeitplan für Wohngebäude nach SIA Merkblatt 2024 (SIA, 2015).

Es wurde angenommen, dass die Wohnung von vier Personen bewohnt wird, mit einer Person in den Schlafzimmern 1 und 3 und zwei Personen im Schlafzimmer 2. Diese Belegung stellt einen Haushalt mit 4 Personen, welche tagsüber zuhause sind, dar.

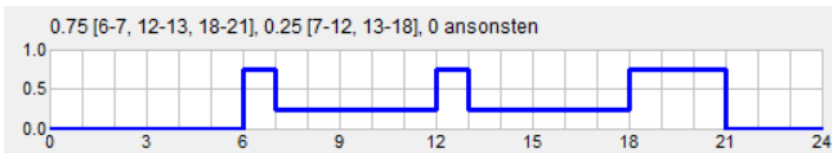


Abbildung 15: Zeitplan der Personenbelegung im Wohnbereich; bei 0.75 befinden sich 3 Personen im Wohnbereich, bei 0.25 1 Person und bei 0 gibt es keine Person im Wohnbereich. Quelle: Annahme Hochschule Luzern.

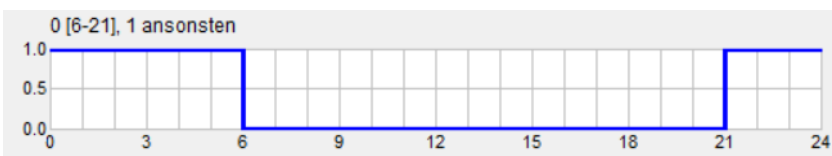


Abbildung 16: Zeitplan der Personenbelegung im Schlafzimmer; bei 1.0 sind 1 bzw. 2 Personen im Schlafzimmer (1 Person im Schlafzimmer 1 und 3, 2 Personen im Schlafzimmer 2), bei 0 gibt es keine Person im Schlafzimmer. Quelle: Annahme Hochschule Luzern.

Diese Raumebelegungspläne sind bei der Beurteilung der Behaglichkeit besonders relevant, da der Komfort eines Raumes nur während seiner Belegung (in dieser Studie, im Wohnbereich von 06:00 bis 21:00 Uhr und in den Schlafzimmern von 21:00 bis 06:00 Uhr) und nicht ständig (24 Stunden am Tag) gewährleistet werden muss.

3.5.6 Notwendigkeit einer Kühlung

Die Notwendigkeit einer Kühlung in der untersuchten Wohnung wurde gemäss dem Nachweis nach Ziffer 4.5.4.1 der Norm SIA 382/1 (SIA, 2014b) beurteilt. Die Berechnungen entsprechen den in Anhang E der oben genannten Norm festgelegten Voraussetzungen. Die berücksichtigten Voraussetzungen sind wie folgt:

- **Sonnenschutz:** Der Gesamtenergiedurchlassgrad g_{tot} des Glases zusammen mit dem beweglichen, heruntergelassenen Sonnenschutz entspricht 0.10. Der Sonnenschutz ist geschlossen, wenn die Sonnenstrahlung an der Fassade grösser als 200 W/m^2 und die empfundene Temperatur im Raum behaglich oder zu warm ist (untere Grenzkurve in Abbildung 9, gelbe Linie). Die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz sind erfüllt.
- **Interne Wärmeeinträge:** Es werden die Standard-Nutzungsbedingungen gemäss SIA Merkblatt 2024 (SIA, 2015) verwendet.
- **Aussenluft-Volumenstrom während der Betriebszeit:** Es wird ein Aussenluft-Volumenstrom pro Person von $30 \text{ m}^3/\text{h}$ gemäss SIA Merkblatt 2024 (SIA, 2015) angenommen. Bei Schlafräumen wird eine Belegung mit zwei Personen angenommen (gemäss Ziffer 2.2.6.4 der Norm SIA 382/1 (SIA, 2014b)).
- **Aussenluft-Volumenstrom ausserhalb der Betriebszeit:** Der Aussenluft-Volumenstrom wird um den Faktor 2 erhöht, falls $(T_{RAL} - T_{AUL}) > 4 \text{ K}$ und $T_{RAL} > 24 \text{ °C}$. Sonst wird der Aussenluft-Volumenstrom um $0.3 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ reduziert.

3.5.7 Kühlung und untersuchte Szenarien

In IDA ICE wurde die Kühlung mittels eines idealen Kühlelements simuliert. Die analysierten Szenarien sind in Tabelle 9 dargestellt und unterscheiden sich in Bezug auf die Art des Klimageräts und dessen Wirkungsgrad, die Anzahl der gekühlten Räume, die Solltemperatur sowie dem Zeitplan.

Die Betriebszeit für die Kühlung entspricht der Sommerperiode (vom 16. April bis 15. Oktober); ausserhalb dieses Zeitraums wurde nicht gekühlt.

Die Klimageräte wurden über die Lufttemperatur geregelt. Die Behaglichkeit eines Raumes wird jedoch mit der empfundenen Temperatur¹⁶ bewertet. Diese Temperatur wurde aus der Lufttemperatur und der Strahlungstemperatur der Umgebungsflächen berechnet. Wenn die Oberflächentemperaturen der Wände, des Bodens und der Decke höher als jene der Lufttemperatur sind, ist die empfundene Temperatur höher als die Lufttemperatur. Normalerweise ist im Sommer tagsüber die empfundene Temperatur höher als die Lufttemperatur.

Die Solltemperatur wurde unter Berücksichtigung des zulässigen Behaglichkeitsbereichs der Norm SIA 180 (SIA, 2014a) festgelegt. Im «Worst-Case» Szenario wurde eine Solltemperatur von 22 °C eingestellt. Diese Temperatur liegt an der unteren Grenze für warme Tage (Abbildung 9). In allen anderen Szenarien wurde eine Temperatur von 25.5 °C eingestellt (eine höhere Lufttemperatur könnte bewirken, dass die empfundene Temperatur 26.5 °C überschreitet und damit trotz Kühlung ausserhalb des Komfortbereichs liegt).

Beim Referenz Szenario und «Worst-Case» Szenario wurde die Wohnung mit mobilen Klimageräten unter heutigen klimatischen Bedingungen simuliert. Es wurde angenommen, dass alle Räume über ein mobiles Klimagerät verfügen, im Wohnbereich mit einer Kühlleistung von 3.5 kW und in den Schlafzimmern mit je 2 kW .

Im «Worst-Case» Szenario wurden die Räume auf 22 °C gekühlt. Die Kühlelemente wurden aktiviert, wenn die Lufttemperatur im Raum 22.5 °C überstieg. Wie im Abschnitt 1.2 erwähnt, können mobile Kompaktgeräte nicht mit einer Teilkühllast arbeiten, so dass der Kompressor ständig aus- und eingeschaltet und dabei versucht die gewünschten 22 °C im Raum bereitzustellen. Diese Funktionsweise kann jedoch zu einer Unterkühlung führen. Im Referenz Szenario wurde eine höhere Temperatur eingestellt (Solltemperatur von 25.5 °C).

¹⁶Empfundene Temperatur: «Für die thermische Behaglichkeit des Menschen massgebende Temperatur unter Berücksichtigung der Lufttemperatur am betrachteten Ort im Raum und der Strahlungstemperatur der Umgebungsflächen.

Sie ist gleich der theoretisch gleichmässigen Oberflächentemperatur eines abgeschlossenen Raumes, in dem ein Nutzer die gleiche Wärmemenge durch Strahlung und Konvektion wie im tatsächlichen ungleichmässigen Raum abgeben oder aufnehmen würde. Wird auch als operative Temperatur bezeichnet». Quelle: SIA 180 (SIA, 2014a).

Bei den Szenarien 1, 2 und 3 wurde ein umweltfreundlicherer Ansatz mit einem Multi-Split-System (Szenarien 1 und 3) und einem Split-System (Szenario 2) mit einer höheren Solltemperatur der Kühlung (wie beim Referenz Szenario) verwendet. Der Unterschied zwischen diesen Szenarien liegt in den zu klimatisierenden Räumen. In Szenario 1 wurde die gesamte Wohnung (Wohnbereich und Schlafzimmer) gekühlt, während in Szenario 2 und 3 nur der Wohnbereich bzw. die Schlafzimmer gekühlt wurden.

Der Wohnbereich wurde nur bei Belegung von 06:00 bis 21:00 Uhr gekühlt, während die Schlafzimmer von 21:00 bis 06:00 Uhr gekühlt wurden. Besteht die Möglichkeit der Nachtkühlung (in den Zeiträumen 06:00 bis 07:00 Uhr und 18:00 bis 22:00 Uhr gemäss Abschnitt 3.5.3), bleibt das Kühlsystem ausgeschaltet, es sei denn, die natürliche Lüftung kann die eingestellte Lufttemperatur für die Kühlung nicht gewährleisten. Sowohl die Eingangshalle als auch das Badezimmer gelten nicht als dauerhaft belegt und wurden daher nicht gekühlt.

Die Dimensionierung der Klimageräte (Leistung) erfolgte unter Berücksichtigung der auf dem Markt erhältlichen Geräte und des Kühlbereichs, welcher durch das System abgedeckt werden kann. Die zu simulierende Leistung beträgt 3.5 kW für den Wohnbereich und 2 kW für das Schlafzimmer.

Szenario	Gekühlte Räume	Gerätetyp	Kühlleistung	Sollwert Kühlung	Zeitplan
Worst Case	Wohnbereich	Mobile Kompaktgeräte EER: 2.6	3.5 kW	22 °C	06:00-21:00
	Schlafzimmer	3 x Mobile Kompaktgeräte EER: 2.6	2 kW	22 °C	21:00-06:00
		Total	9.5 kW		
Referenz Szenario	Wohnbereich	Mobile Kompaktgeräte EER: 2.6	3.5 kW	25.5 °C	06:00-21:00
	Schlafzimmer	3 x Mobile Kompaktgeräte EER: 2.6	2 kW	25.5 °C	21:00-06:00
		Total	9.5 kW		
Szenario 1	Wohnbereich	Multi-Split-System mit 4 Innengeräte SEER: 7.5	3.5 kW	25.5 °C	06:00-21:00
	Schlafzimmer		2 kW	25.5 °C	21:00-06:00
		Total	9.5 kW		
Szenario 2	Wohnbereich	Split-System SEER: 7.5	3.5 kW	25.5 °C	06:00-21:00
		Total	3.5 kW		
Szenario 3	Schlafzimmer	Multi-Split-Systeme mit 3 Innengeräte SEER: 7.5	2.0 kW	25.5 °C	21:00-06:00
		Total	6.0 kW		

Tabelle 9: Definition der Betriebsbedingungen des Kühlsystems in den ausgewerteten Szenarien.

3.5.8 Dämmung einzelner, zu kühlender Räume

In den Szenarien 2 und 3, in denen nur bestimmte Räume der Wohnung gekühlt wurden, wurden zwei weitere Szenarien in Betracht gezogen, bei welchen diese Räume gedämmt wurden. Zu diesem Zweck wurden die Trennwände (auf der Innenseite der Trennwand des zu kühlenden Raumes) zu den weiteren Räumen der Wohnung sowie das Dach des zu kühlenden Raumes gedämmt. Die Fassade hingegen wurde nicht isoliert, weil diese bereits einen guten U-Wert ($0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$) hat und ihre Fläche aufgrund der Fenster klein ist. Dafür wurde das Dach gedämmt, weil es eine grössere Fläche darstellt und den ganzen Tag Sonneneinstrahlung erhält.

Es wurde eine diffusionsoffene und hygroskopische Dämmung mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0.046 W/mK mit einer Dämmstärke von 8 cm angenommen. Die Dämmung wurde mit einer 1.3 cm dicken Gipskartonplatte abgedeckt.

3.6 Auswertungsparameter

Die Einrichtung eines Kühlgerätes in der Wohnung erfolgt aus Komfort- und/oder Gesundheitsgründen. Daher wurde es als unerlässlich erachtet, nicht nur den Energieverbrauch der Kälteanlage, sondern auch die in der Wohnung erzielten Komfortbedingungen zu bewerten. Zusätzlich wurde das Verfahren zur vertieften Bewertung der Notwendigkeit einer Kühlung nach Norm SIA 382/1 (SIA, 2014b) durch die Auswertung der Überhitzungsstunden durchgeführt.

Aus diesem Grund wurden Parameter ausgewertet, die eine gesamtheitliche Beurteilung des Energiebedarfs, Energieverbrauchs sowie der thermischen Behaglichkeit ermöglichen.

3.6.1 Thermische Behaglichkeit

Thermische Behaglichkeit ist gemäss SN EN ISO 7730 (SNV, 2006) «der Umstand, unter dem Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung ausgedrückt wird».

Die Betrachtung der thermischen Behaglichkeit wurde anhand der Anzahl an Überhitzungsstunden in der Sommerperiode (vom 16. April bis 15. Oktober) in den Innenräumen sowie anhand des PPD-Index¹⁷ (Predicted Percentage of Dissatisfied – erwarteter Anteil der unzufriedenen Personen) ermittelt.

Eine Überhitzungsstunde ist eine Stunde während der Nutzungszeit, in der die empfundene Raumtemperatur die obere Grenzkurve für Räume mit technischen Installationen in Betrieb (blaue Linie in Abbildung 9) nach Norm SIA 180 (SIA, 2014a) überschreitet. Gemäss Norm SIA 382/1 (SIA, 2014b) gilt für Neubauten (Abschnitt 2.2.3): «Die Notwendigkeit einer Kühlung ist nach diesem vertieften Verfahren gegeben, wenn die berechneten Stundenwerte der Raumtemperatur während der Nutzungszeit die obere Grenzkurve während mehr als 100 h pro Jahr überschreiten. Bei einer Überschreitung bis zu 100 h pro Jahr ist eine Kühlung erwünscht, ohne Überschreitung ist eine Kühlung nicht notwendig». Bei bestehenden Bauten und bei Wohnbauten mit mechanischer Lüftung, in welchen von einer erhöhten Toleranz infolge Anpassung der Nutzer ausgegangen werden kann, liegt die Grenze bei 400 h statt bei 100 h pro Jahr. In dieser Studie unterscheiden sich die Berechnungsannahmen von denen, die im Verfahren der Norm definiert sind. Dies sollte bei der Bewertung der Notwendigkeit einer Kühlung anhand der Anzahl der Überhitzungsstunden berücksichtigt werden. Der PPD-Index ist nach SN EN ISO 7730 (SNV, 2006) definiert und stellt eine quantitative Vorhersage der Anzahl der mit einem bestimmten Umgebungsklima unzufriedenen Personen dar. Dieser Anteil kann anhand des PMV-Wertes¹⁸ (Predicted Mean Vote - erwartete durchschnittliche Bewertung der thermischen Behaglichkeit) berechnet werden. Der kleinstmögliche PPD-Wert beträgt 5 %; eine überwiegend akzeptierte thermische Umgebung wird durch einen PPD-Wert von unter 10 % definiert.

¹⁷ PPD-Index: «Erwarteter prozentualer Anteil der Personen, die mit der thermischen Behaglichkeit nicht zufrieden sind und sich also ausserhalb des Behaglichkeitsbereichs (PMV unter -1 oder über + 1) befinden. Dieser Anteil kann anhand des PMV-Wertes - Erwartete durchschnittliche Bewertung der thermischen Behaglichkeit - berechnet werden». Quelle: SIA 180 (SIA, 2014a).

¹⁸ PMV-Wertes: «Vorausgesagte durchschnittliche Beurteilung der thermischen Behaglichkeit einer grossen Anzahl von Personen anhand einer von -3 (kalt) über 0 (neutral) bis +3 (heiss) abgestuften Skala. Ausgehend von objektiven physikalischen Grössen wie Tätigkeit und Bekleidung der Personen, Temperatur, Feuchte, Geschwindigkeit der Luft und der mittleren Strahlungstemperatur lässt sich der PMV-Wert mit der Fanger-Gleichung in konditionierten Räumen berechnen (SN EN ISO 7730)». Quelle: SIA 180 (SIA, 2014a).

Die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit wurden auch zur Analyse der Notwendigkeit einer Kühlung nach Norm SIA 382/1 (SIA, 2014b) verwendet.

3.6.2 Klimakältebedarf und –verbrauch

Die Quantifizierung der Betriebsenergie für die Kühlung wurde auf den Stufen Nutzenergie (Klimakältebedarf¹⁹) und Endenergie (Klimakälteverbrauch²⁰) ermittelt. Die Berechnungen weichen von denjenigen in der Norm SIA 382/2 (SIA, 2011) ab, da unterschiedliche Bedingungen festgelegt wurden (Abschnitt 4.6).

3.6.3 Potenzial einer Photovoltaikanlage ohne und mit einem Batteriespeicher

Das Potenzial einer Photovoltaikanlage ohne und mit einem Batteriespeicher zur Deckung des Stromverbrauchs für Klimakälte und des gesamten Stromverbrauchs für Klimakälte, Geräte und Beleuchtung wurde ermittelt. Dazu wurden die nachfolgenden vier Situationen betrachtet:

- Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ nach MuKE (EnDK, 2018a) dimensioniert wurde.
- Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ nach MuKE (EnDK, 2018a) dimensioniert und durch eine Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage ergänzt wurde.
- Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert wurde.
- Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert und durch eine Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage ergänzt wurde.

Das Potenzial einer Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage ist in Abschnitt 4.2.3 dargestellt.

¹⁹ Klimakältebedarf: «Wärme, die dem gekühlten Raum während der Berechnungsperiode entzogen werden muss, um den oberen Sollwert der Raumtemperatur einzuhalten. Summe der internen und solaren Wärmeeinträge und der Wärme, die dem Aussenluftvolumenstrom entzogen werden muss, um diesen auf die Raumluft-Solltemperatur abzukühlen, inkl. der damit einhergehenden Entfeuchtung». Quelle: SIA 382/2 (SIA, 2011a). Diese Studie berücksichtigt nicht die Entfeuchtung.

²⁰ Klimakälteverbrauch: Energieverbrauch der Klimaanlage (in dieser Studie das Klimagerät) zur Deckung des Klimakältebedarfs eines Gebäudes.

4. Ergebnisse

Im folgenden Kapitel wurde zuerst die Notwendigkeit einer aktiven Kühlung nach Norm SIA 382/1 (SIA, 2014b) in der analysierten Wohnung betrachtet. Anschliessend wurden, basierend auf diesen Erkenntnissen, umweltverträgliche Ansätze zur Kühlung von Wohngebäuden durch die Kombination von mobilen Klimageräten und Split-Systemen mit einer Photovoltaikanlage beurteilt. Zudem wurde das Potential einer Innenraumdämmung in einzelnen, zu kühlenden Räumen untersucht. Ebenso wurden Hinweise zur Anpassung von bestehenden Gesetzgebungen formuliert. Diese basieren sowohl auf der Analyse relevanter Vorschriften und Normen als auch auf den Ergebnissen der ersten beiden Schritte.

4.1 Notwendigkeit einer Kühlung in der untersuchten Wohnung

In einem ersten Schritt wurde die Notwendigkeit einer mechanischen Kühlung in der untersuchten Wohnung, wie in Abschnitt 3.5.6 erläutert, beurteilt.

Unter diesen Voraussetzungen ist eine Kühlung der Wohnung erforderlich, wenn die Anzahl der Überhitzungsstunden in den Aufenthaltsbereichen der Wohnung für das Medianjahr der Referenzperiode in Basel 100 Stunden überschreitet. In zwei Schlafzimmern wird sogar die Grenze von 400 Stunden, welche die Norm bei bestehenden Bauten und bei Wohnbauten mit mechanischer Lüftung vorgibt, überschritten. Dies ist auf eine unzureichende Lüftung zurückzuführen, welche die Abfuhr der internen und solaren Wärmelasten nicht gewährleistet. Die Verdoppelung des Aussenluft-Volumenstroms ausserhalb der Betriebszeit ist in Wohngebäuden unzureichend. Dies nicht nur, weil das Luftvolumen unzureichend ist, sondern auch, weil es tagsüber – wenn die Aussenlufttemperaturen höher sind – keine Belegung gibt.

Wie in der Norm SIA 382/1 (SIA, 2014b) festgelegt: «[...] Für Räume mit natürlicher Lüftung und Räume, die weder beheizt noch gekühlt sind, gilt SIA 180 (SIA, 2014a)», ist dieses Verfahren nicht für Wohngebäude ausgelegt, da die Räume natürlicher belüftet sind.

Daher wurde die Berechnung unter Berücksichtigung einer Fensteröffnung für die Nachtlüftung von 5 % der Nettogeschossfläche der Räume (gemäss dem Nachweis der Nachtauskühlung Ziffer 5.2.3 der Norm SIA 180 (SIA, 2014a) durchgeführt. Dies entspricht einem Fensteröffnungsanteil von ca. 11.1 %, 27.2 %, 17.0 % und 24.4 % in den Schlafzimmern 1, 2, 3 bzw. im Wohnzimmer. Fenster werden geöffnet, wenn die Raumlufttemperatur 22 °C überschreitet und der Aussenluftstrom tiefer liegt als die Raumlufttemperatur.

Tabelle 10 stellt die Anzahl der Überhitzungsstunden für die vier untersuchten Jahre der Stadt Basel in den Aufenthaltsbereichen der Referenzwohnung dar.

Zone	Ref. Medianjahr (2004)	Ref. wärmstes Jahr (2003)	A1B Medianjahr (2063)	A1B warmes Jahr (2068)
Schlafzimmer 1	15	258	175	750
Schlafzimmer 2	0	94	56	442
Schlafzimmer 3	0	153	100	627
Wohnbereich	0	83	51	325

Tabelle 10: Anzahl Überhitzungsstunden in den verschiedenen Räumen der Wohnung unter Berücksichtigung einer Fensteröffnung für die Nachtlüftung von 5 % der Nettogeschossfläche der Räume während der Sommerperiode für das aktuelle und zukünftige Klima in Basel.

Im Medianjahr der Referenzperiode gibt es nur 15 Überhitzungsstunden im Schlafzimmer 1. In diesem Schlafzimmer macht die Fensterfläche 45 % der Raumfläche aus, was zu höheren solaren Wärmeeinträgen führt. Im wärmsten Jahr der Referenzperiode gibt es im Schlafzimmer 1 mehr als 100 Überhitzungsstunden und im Schlafzimmer 3 100 Überhitzungsstunden. Im warmen Jahr der Periode A1B werden in allen Räumen, ausser dem Wohnbereich, 400 Überhitzungsstunden überschritten.

Bei dem derzeitigen Klima in Basel ist es möglich, die Komfortbedingungen in Wohngebäuden durch Massnahmen des sommerlichen Wärmeschutzes unter Berücksichtigung einer Nachtlüftung mit einer Fensteröffnung von 5 % der Nettogeschossfläche der Räume zu gewährleisten. In sehr warmen Jahren, wie z.B. dem Jahr 2003, werden die 100 Überhitzungsstunden jedoch überschritten. Da diese Berechnung vom in der Norm festgelegten Verfahren zur Betrachtung der natürlichen Lüftung abweicht, wird davon ausgegangen, dass eine Überschreitung von 100 Überhitzungsstunden während der Belegungszeit nicht ohne Kühlung zu bewältigen ist, da die Möglichkeiten der Anpassung des Nutzerverhaltens (das Öffnen der Fenster) bereits berücksichtigt wurde.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob die Anforderung einer freien Strömungsfläche von 5 % der Nettogeschossfläche des Raumes zukünftig ausreichend ist, um eine effektive Nachtlüftung zu gewährleisten. Dies wird besonders in Städten kritisch sein, da die Abkühlung in der Stadt nachts langsamer erfolgt als auf dem Land (Wärmeinseleffekt).

Die Ergebnisse für den Standort Lugano sind in Tabelle 11 dargestellt.

Zone	Ref. Medianjahr (2004)	Ref. wärmstes Jahr (2003)	A1B Medianjahr (2063)	A1B warmes Jahr (2068)
Schlafzimmer 1	82	786	665	1'476
Schlafzimmer 2	9	508	430	1'362
Schlafzimmer 3	34	688	574	1'448
Wohnbereich	11	322	268	1'095

Tabelle 11: Anzahl Überhitzungsstunden in den verschiedenen Räumen der Wohnung unter Berücksichtigung einer Fensteröffnung für die Nachtlüftung von 5 % der Nettogeschossfläche der Räume während der Sommerperiode für das aktuelle und zukünftige Klima in Lugano.

In Lugano gibt es im Medianjahr der Referenzperiode in allen Räumen Überhitzungsstunden, die jedoch 100 Stunden nicht überschreiten. Sowohl für das wärmste Jahr der Referenzperiode als auch für das Medianjahr der Periode A1B liegen die Überhitzungsstunden jedoch mindestens um den Faktor 9 höher. In diesem Fall wäre eine Kühlung unbedingt erforderlich. Im warmen Jahr der Periode A1B werden die 1'000 Überhitzungsstunden in allen Räumen überschritten.

Im Falle des Klimas von Lugano ist klar, dass es in Zukunft nicht möglich sein wird, Komfortbedingungen in Wohngebäuden allein durch Massnahmen des sommerlichen Wärmeschutzes unter Berücksichtigung einer Nachtlüftung mit einer Fensteröffnung von 5 % der Nettogeschossfläche der Räume zu garantieren. Nachfolgend wurde untersucht, ob die Öffnung von 100 % der Fensterfläche die Komfortbedingungen in beiden Klimazonen gewährleisten kann. Es ist jedoch zu bedenken, dass eine solche Öffnung aus Sicherheits-, Lärm- oder Behaglichkeitsgründen aufgrund von Zugluft nicht immer möglich ist.

Zone	Ref. Medianjahr (2004)	Ref. wärmstes Jahr (2003)	A1B Medianjahr (2063)	A1B warmes Jahr (2068)
Schlafzimmer 1	0	71	48	250
Schlafzimmer 2	0	8	5	145
Schlafzimmer 3	0	25	16	181
Wohnbereich	0	49	28	223

Tabelle 12: Anzahl Überhitzungsstunden in den verschiedenen Räumen der Wohnung unter Berücksichtigung einer Fensteröffnung von 100 % der Fensterfläche während der Sommerperiode für das aktuelle und zukünftige Klima in Basel.

Tabelle 12 zeigt, dass in Basel durch eine 100 % geöffnete Fensterfläche die Anzahl der Überhitzungsstunden in allen untersuchten Jahren auf unter 100 Stunden reduziert werden kann. Einzige Ausnahme gibt es im warmen Jahr der Periode A1B, welches jedoch eine geringe Eintrittswahrscheinlichkeit hat. Deshalb wird geprüft, ob die Öffnung aller Fenster während der Nacht eine mögliche Option darstellt.

Zone	Ref. Medianjahr (2004)	Ref. (2003)	A1B Medianjahr (2063)	A1B warmes Jahr (2068)
Schlafzimmer 1	6	244	266	945
Schlafzimmer 2	0	170	197	942
Schlafzimmer 3	0	200	217	954
Wohnbereich	3	232	245	953

Tabelle 13: Anzahl Überhitzungsstunden in den verschiedenen Räumen der Wohnung unter Berücksichtigung einer Fensteröffnung von 100 % der Fensterfläche während der Sommerperiode für das aktuelle und zukünftige Klima in Lugano.

In Lugano (Tabelle 13) hingegen werden sowohl im wärmsten Jahr der Referenzperiode als auch im Medianjahr der zukünftigen Periode A1B in fast allen Räumen die 200 Überhitzungsstunden überschritten, sodass die Nachtlüftung keine Komfortbedingungen garantiert. Durch zusätzliche Massnahmen, wie die Reduzierung der Fenstergrösse, die Reduzierung des Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) der Verglasung bzw. einer Verglasung mit Sonnenschutz oder die Anpassung der Steuerung des Sonnenschutzes, sollte geprüft werden, ob auf eine aktive Kühlung in Zukunft in Wohngebäuden in Lugano verzichtet werden kann.

4.1.1 Erkenntnisse

Anhand der bisherigen Ergebnisse können folgende Aussagen getroffen werden:

- Die Kühlung der untersuchten Wohnung wäre im aktuellen Klima in Basel – Medianjahr der Referenzperiode – nach dem Nachweis nach Ziffer 4.5.4.1 der Norm SIA 382/1 (SIA, 2014b) notwendig. Dies liegt unter anderem an dem grossen Glasanteil der Wohnung, an dem Sonnenschutz, der nur zu 2/3 aktiviert wird und an einer unzureichenden Lüftung, welche die Abfuhr der internen und solaren Wärmeeinträge nicht gewährleistet.
- Unter Berücksichtigung einer Fensteröffnung für die Nachtlüftung von 5 % der Nettogeschossfläche der Räume (gemäss dem Nachweis der Nachtauskühlung Ziffer 5.2.3 der Norm SIA 180 (SIA, 2014a), falls $T_{RAL} > T_{AUL}$ und $T_{RAL} > 22\text{ °C}$, gibt es im Medianjahr der Referenzperiode in Basel keine Überhitzungsstunden, ausser in einem der Schlafzimmer mit einer grossen Fensterfläche. Im Medianjahr der Periode A1B gibt es Überhitzungsstunden in zwei der Schlafzimmer. Im wärmsten Jahr der Referenzperiode gibt es in allen Räumen, ausser im Wohnbereich, mehr als 100 Überhitzungsstunden. Dies bedeutet, dass ein Aussenluft-Volumenstrom pro Nettogeschossfläche von mindestens $10\text{ m}^3/\text{hm}^2$ in der untersuchten Wohnung nicht ausreichend ist, um in Zukunft die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit in der untersuchten Wohnung zu gewährleisten.
- Durch eine Fensterlüftung mit einer Fensteröffnung von 100 % können die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit in der Wohnung unter heutigen klimatischen Bedingungen am Standort Basel erfüllt werden. Obwohl im Medianjahr der Periode A1B in einem der Schlafzimmer 50 Überhitzungsstunden und im wärmsten Jahr der Referenzperiode 80 Überhitzungsstunden erreicht werden.
- In Lugano werden unter Berücksichtigung einer Fensteröffnung von 5 % der Nettogeschossfläche der Räume etwas mehr als 75 Überhitzungsstunden in einem Schlafzimmer im aktuellen Klima erreicht. Sowohl für das wärmste Jahr der Referenzperiode als auch für das Medianjahr der Periode A1B liegen die Überhitzungsstunden jedoch mindestens um den Faktor 9 höher. Bei einer 100 %igen Fensteröffnung kommt es im aktuellen Klima nur zu 5 Überhitzungsstunden, im wärmsten Jahr der Referenzperiode sowie im Medianjahr der Periode A1B jedoch zu mehr als 200 Stunden.
- Diese Ergebnisse zeigen, dass die aktive Kühlung in Wohngebäuden bei einer breiten Bevölkerung ein immer wichtigeres Thema werden wird. Es ist daher zwingend erfor-

derlich, dass sowohl bei Neubauten als auch bei Sanierungen Massnahmen zur Vermeidung von solaren und internen Wärmegegewinnen sowie zur Abfuhr von entstandenen Wärmelasten zur Reduzierung des Kühlbedarfs berücksichtigt werden.

4.2 Umweltfreundliche Ansätze zur Kühlung

Zur Ermittlung von umweltfreundlichen Ansätzen zur Kühlung von Wohngebäuden durch die Kombination von mobilen Klimageräten und Split-Systemen mit einer Photovoltaikanlage wurden die nachfolgenden Schritte durchgeführt.

Zunächst wurden die in Abschnitt 3.6.7 definierten Szenarien unter Berücksichtigung des thermischen Komforts, des Klimakältebedarfs und –verbrauchs und des Potenzials einer Photovoltaikanlage ohne und mit Batteriespeicher im Detail analysiert.

Anschliessend wurde, unter Berücksichtigung der im ersten Schritt gewonnenen Ergebnisse, der Energieverbrauch zur Kühlung unter verschiedenen Betriebsbedingungen für das Klima in Basel und Lugano ermittelt. Auf dieser Grundlage wurden zwei neue Szenarien ausgewählt und sowohl für das Klima in Basel als auch in Lugano detailliert untersucht. Dies wurde gemacht, um weitere Empfehlungen für umweltfreundliche Ansätze zur Kühlung, unter anderen als den zuvor analysierten Umständen, zu ergänzen. Abschliessend wurde die Wirksamkeit einer Dämmung einzelner, zu kühlender Räume bei der Reduzierung des Klimakälteverbrauchs der Wohnung untersucht.

4.2.1 Untersuchte Szenarien

Wie im Abschnitt 3.5.7 erläutert wurden fünf Szenarien erstellt, bei welchen unterschiedliche Solltemperaturen sowie die Anzahl der zu kühlenden Räume mit verschiedenen Typen von Klimageräten (Kompaktgeräte und Split-Systeme) simuliert wurden.

Während in den zwei Szenarien, «Worst-Case» und Referenz Szenario mit mobilen Kompaktgeräten gekühlt wurde, wurde in den Szenarien 1, 2 und 3 mit Split-Systemen gekühlt. Die Simulationen wurden anhand des Klimas von Basel durchgeführt.

Die zwei Szenarien mit mobilen Kompaktgeräten unterscheiden sich durch ihre Solltemperatur. Im «Worst-Case» Szenario wurde eine Solltemperatur von 22 °C angenommen, während im Referenz Szenario die Solltemperatur 25.5 °C beträgt. In beiden Szenarien wurde die gesamte Wohnung entsprechend der Belegung gekühlt – mit Ausnahme von der Eingangshalle und vom Badezimmer, da diese Räume nicht dauerhaft besetzt sind. Das bedeutet, dass der Wohnbereich bei einer Belegung von 06:00 bis 21:00 Uhr gekühlt wird, während die Schlafzimmer von 21:00 bis 06:00 Uhr gekühlt wurden. Die Zimmertüren werden als geschlossen angenommen, um einen direkten Wärmeaustausch über die Luft zu verhindern. In den drei Szenarien mit Split-Systemen wurde eine Solltemperatur von 25.5 °C angenommen. Der Unterschied liegt in diesen Szenarien in der Anzahl der zu kühlenden Räume. In Szenario 1 wurde die gesamte Wohnung gekühlt (es handelt sich hierbei um das analoge Szenario zum Referenzszenario, jedoch mit Split-Systemen). In Szenario 2 wurde nur der Wohnbereich gekühlt und in Szenario 3 nur die Schlafzimmer unter Berücksichtigung der jeweiligen Belegung. Tabelle 9 gibt einen Überblick über die Betriebsbedingungen der Kühlung in den ausgewerteten Szenarien.

Die analysierten Szenarien wurden daher wie folgt angenommen:

- «Worst-Case» Szenario: Mobile Kompaktgeräte. Gesamte Wohnung, Solltemperatur: 22 °C. Kühlung bei Belegung: Wohnbereich von 06:00 bis 21:00 Uhr und Schlafzimmer von 21:00 bis 06:00 Uhr.
- Referenz Szenario: Mobile Kompaktgeräte. Gesamte Wohnung, Solltemperatur: 25.5 °C. Kühlung bei Belegung: Wohnbereich von 06:00 bis 21:00 Uhr und Schlafzimmer von 21:00 bis 06:00 Uhr.
- Szenario 1: Multi-Split-System. Gesamte Wohnung, Solltemperatur: 25.5 °C. Kühlung bei Belegung: Wohnbereich von 06:00 bis 21:00 Uhr und Schlafzimmer von 21:00 bis 06:00 Uhr.
- Szenario 2: Split-System. Wohnbereich, Solltemperatur: 25.5 °C. Kühlung bei Belegung von 06:00 bis 21:00 Uhr.
- Szenario 3: Multi-Split-System. Schlafzimmer, Solltemperatur: 25.5 °C. Kühlung bei Belegung von 21:00 bis 06:00 Uhr.

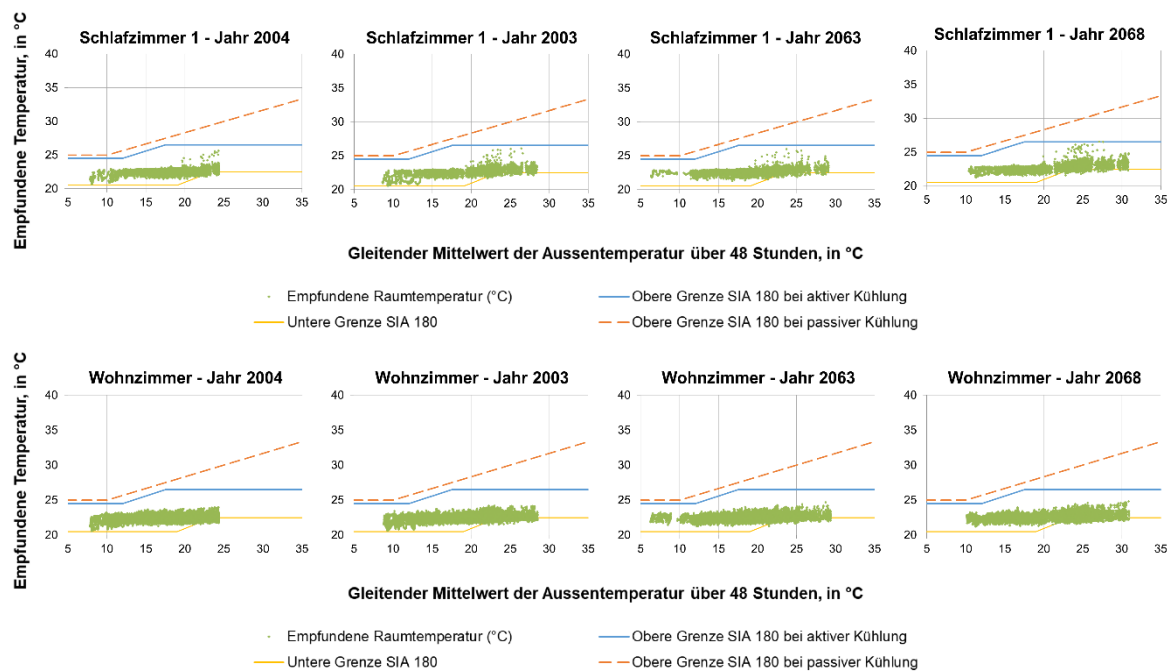
Eine detaillierte Zusammenstellung der Ergebnisse sowie deren ausführliche Analyse sind dem Anhang 8.3 zu entnehmen. Die wichtigsten Ergebnisse sind in diesem Abschnitt zusammengefasst.

4.2.1.1 *Thermische Behaglichkeit*

Die Solltemperatur von 22 °C (die Nutzung des Klimagerätes ist durch die Lufttemperatur des Raumes geregelt) ermöglicht es, die empfundene Temperatur in allen Räumen in den untersuchten Jahren innerhalb des Behaglichkeitsbereichs zu halten (Abbildung 17). Der Behaglichkeitsbereich nach Norm SIA 180 (SIA, 2014a) befindet sich, wie in Abschnitt 2.2.2 erklärt, zwischen der unteren und oberen Grenzkurve für Räume mit aktiver Kühlung. Dieser ist in Abbildung 8 als Bereich zwischen der gelben und blauen Linie dargestellt.

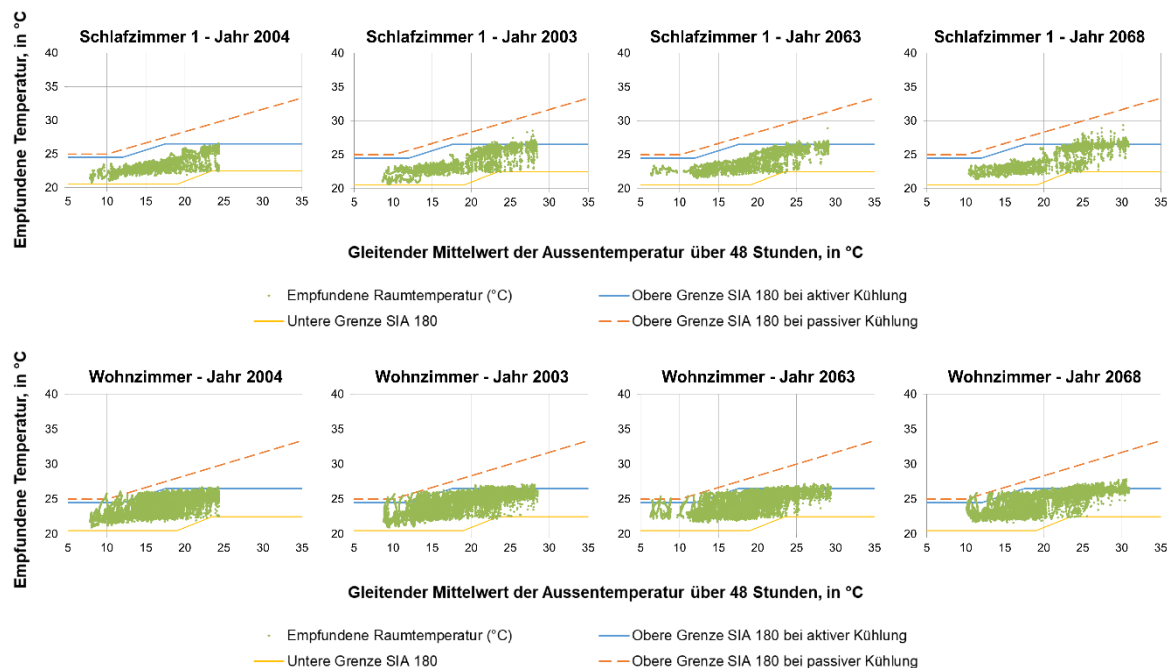
Bei einer Solltemperatur von 25.5 °C, wie im Referenz Szenario in Abbildung 18 dargestellt, wird jedoch in einigen Jahren die obere Grenzkurve für Räume mit aktiver Kühlung nach Norm SIA 180 (SIA, 2014a) überschritten. Dies zeigt sich vor allem im Wohnzimmer, da der Unterschied zwischen der Lufttemperatur und der Strahlungstemperatur der Umgebungsflächen tagsüber grösser ist. Im Schlafzimmer kommt es ebenfalls zu Überhitzungsstunden, hauptsächlich zu Beginn von Nächten, welche auf sehr hohe Tagestemperaturen folgen. Dies weil die Kühlung dann mehr Zeit benötigt, um die eingestellte Temperatur zu erreichen.

Im SIA Merkblatt 2024 (SIA, 2015) wird für die Raumlufttemperatur bei der Auslegung der Kühlung eine Temperatur von 26 °C definiert und wie folgt beschrieben: «[...] unter der Voraussetzung, dass der Unterschied zwischen der empfundenen Temperatur und der Lufttemperatur im Raum vernachlässigbar ist. Wo dies nicht der Fall ist, muss die Lufttemperatur so korrigiert werden, dass die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit gemäss SIA 180 (SIA, 2014a) eingehalten werden». In diesem Fall wäre es notwendig, die betrachtete Solltemperatur weiter zu reduzieren, um die Temperatur innerhalb der Grenzen zu halten.



«Worst-Case» Szenario: Mobile Kompaktgeräte. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 22 °C.

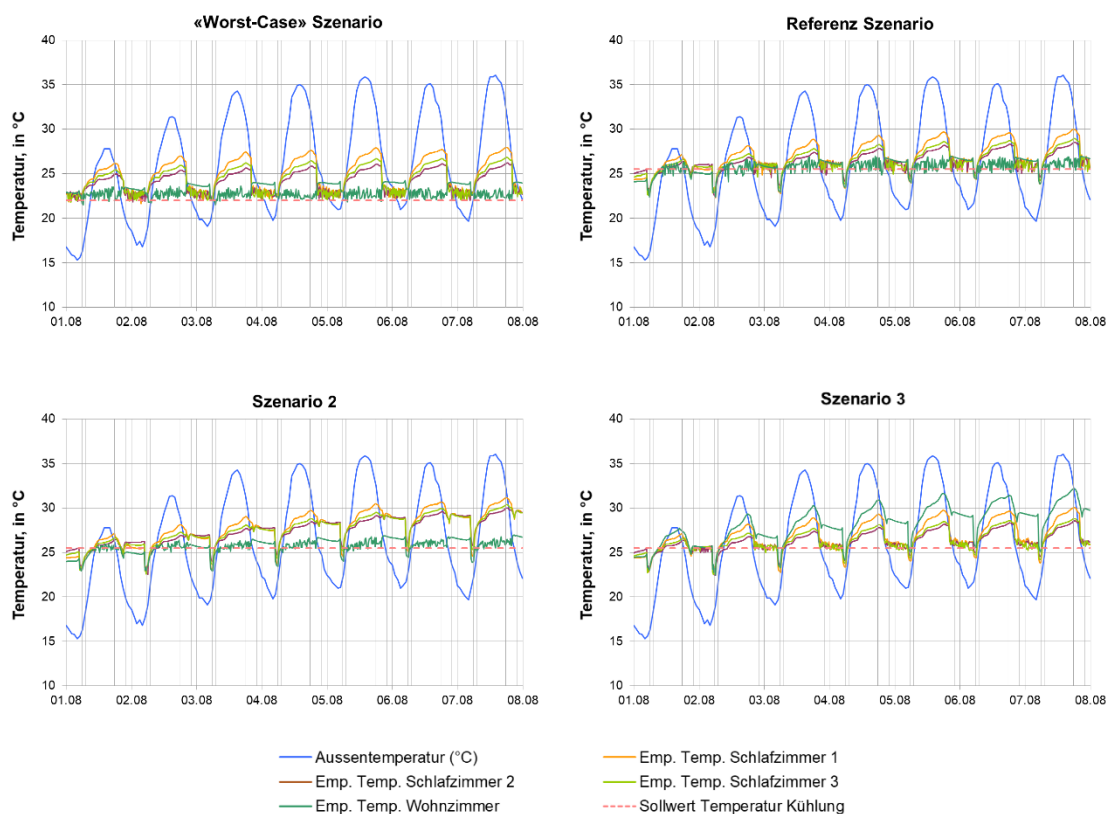
Abbildung 17: Empfundene Temperatur (15-minütiger Wert) im Schlafzimmer 1 (obere Reihe) und Wohnbereich (untere Reihe) im Zeitraum vom 15. April bis zum 16. Oktober für die vier betrachteten Jahre des «Worst-Case» Szenarios. Die Grenzwermlinien stellen den zulässigen Temperaturbereich in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwerts der Aussentemperatur gemäss Norm SIA 180 (SIA, 2014a) dar.



Referenz Szenario: Mobile Kompaktgeräte. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 25.5 °C.

Abbildung 18: Empfundene Temperatur (15-minütiger Wert) im Schlafzimmer 1 (obere Reihe) und Wohnbereich (untere Reihe) im Zeitraum vom 15. April bis zum 16. Oktober für die vier betrachteten Jahre des Referenz Szenarios. Die Grenzwermlinien stellen den zulässigen Temperaturbereich in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwerts der Aussentemperatur gemäss Norm SIA 180 (SIA, 2014a) dar.

Erwähnenswert ist auch der jeweilige Temperaturbereich in den Räumen, welcher in Abbildung 19 dargestellt ist. In den Szenarien, in denen der Wohnbereich tagsüber gekühlt wird – d.h. alle Szenarien ausser Szenario 3 – kann dessen Temperatur nachts nahe der Solltemperatur des jeweiligen Szenarios gehalten werden. Im Gegensatz dazu steigt die Temperatur in den Schlafzimmern tagsüber durch solare und interne Wärmeeinträge erheblich an und erreicht im Szenario 2, wo die Schlafzimmer nicht gekühlt werden, eine empfundene Temperatur von über 30 °C. Ebenso konnte festgestellt werden, dass die Temperatur in den Schlafzimmern während einer Hitzeperiode täglich ansteigt.



«Worst-Case» Szenario: Mobile Kompaktgeräte. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 22 °C.

Referenz Szenario: Mobile Kompaktgeräte. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 25.5 °C.

Szenario 2: Split-System. Kühlung des Wohnbereichs, Solltemperatur: 25.5 °C.

Szenario 3: Multi-Split-System. Kühlung der Schlafzimmer, Solltemperatur: 25.5 °C.

Abbildung 19: Aussentemperatur und empfundene Temperatur in den unterschiedlichen Räumen während einer besonders warmen Woche vom 1. August bis 8. August des wärmsten Jahres der Referenzperiode (2003). Die vertikalen, hellgrauen Linien entsprechen den Zeiträumen mit natürlicher Lüftung. Szenario 1 wurde nicht erfasst, da der Temperaturverlauf demjenigen des Referenz Szenarios sehr ähnlich ist.

4.2.1.2 Klimakältebedarf und -verbrauch

Unter den oben beschriebenen Betriebsbedingungen der Kühlung wurden der Klimakältebedarf und -verbrauch sowie die Leistung berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14, Abbildung 20 und Abbildung 21 dargestellt.

Die Erhöhung der Solltemperatur von 22 °C («Worst-Case» Szenario) auf 25.5 °C (Referenz Szenario und Szenario 1) bewirkte eine sehr deutliche Reduktion des Klimakältebedarfs von mehr als 80 % (Medianjahr der Referenzperiode) bzw. 70 % (Medianjahr der Periode A1B). Im wärmsten Jahr der Referenzperiode beträgt diese Reduzierung mehr als 60 % und im warmen Jahr der Periode A1B mehr als 50 %.

Die Implementierung eines effizienten Kühlsystems, Typ Split- oder Multi-Split-System, gemeinsam mit einer angemessenen Nutzung (bei einer Solltemperatur von 25.5 °C) kann den Stromverbrauch im Vergleich zur intensiven Nutzung von mobilen Kühlgeräten (bei einer Solltemperatur von 22 °C) erheblich re-

duzieren. Der Stromverbrauch kann im Vergleich zum «Worst-Case» Szenario um 80-90 % reduziert werden. Die Reduktion der gekühlten Wohnfläche senkt den Energieverbrauch in allen untersuchten Jahren weiter. Insbesondere in Szenario 3, bei dem nachts nur die Schlafzimmer gekühlt werden, sinkt der Kühlbedarf sogar unter 1 kWh/(m²a) pro Jahr.

Wie in Abbildung 19 dargestellt, gibt es jedoch viele Überhitzungsstunden mit hohen Temperaturen. Beim Vergleich von Szenario 1 und 2 ist der Unterschied beim Stromverbrauch zur Bereitstellung der Klimakälte gering, obwohl in Szenario 1 die Schlafzimmer während der Nacht gekühlt werden und somit die Anzahl der Überhitzungsstunden während der Belegung der Schlafzimmer sehr stark reduziert wird. Der Stromverbrauch liegt in Szenario 1 bei 0.5 kWh/(m²a) und 1.2 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden bzw. bei 1.8 kWh/(m²a) und 2.8 kWh/(m²a) in den warmen Jahren beider Perioden.

	«Worst-Case» Szenario				Referenz Szenario				Szenario 1				Szenario 2 (nur Wohnzimmer)				Szenario 3 (nur Schlafzimmer)			
	Bed. (kWh/(m²a))	Leist. Bed. (W/m²)	Verb. (kWh/(m²a))	elek. Leist. (W/m²)	Bed. (kWh/(m²a))	Leist. Bed. (W/m²)	Verb. (kWh/(m²a))	elek. Leist. (W/m²)	Bed. (kWh/(m²a))	Leist. Bed. (W/m²)	Verb. (kWh/(m²a))	elek. Leist. (W/m²)	Bed. (kWh/(m²a))	Leist. Bed. (W/m²)	Verb. (kWh/(m²a))	elek. Leist. (W/m²)	Bed. (kWh/(m²a))	Leist. Bed. (W/m²)	Verb. (kWh/(m²a))	elek. Leist. (W/m²)
Ref. Medianjahr (2004)	15.3	46.7	7.9	24.6	2.0	46.7	1.0	22.3	2.6	20.2	0.5	6.0	2.3	20.5	0.5	6.0	0.5	12.7	0.1	2.3
Ref. wärmstes Jahr (2003)	22.0	46.7	12.0	24.6	7.0	46.7	3.5	22.3	8.0	27.3	1.8	12.2	5.4	27.3	1.4	12.4	2.5	19.5	0.4	5.0
A1B Medianjahr (2063)	19.9	46.7	10.9	24.6	4.6	46.7	2.4	22.3	5.4	27.3	1.2	11.8	4.1	27.3	1.0	11.9	1.5	20.0	0.3	5.3
A1B warmes Jahr (2068)	26.8	46.7	15.6	24.6	11.6	46.7	6.1	22.3	11.3	27.3	2.8	14.8	8.3	27.3	2.3	14.8	4.6	31.6	0.9	9.3

«Worst-Case» Szenario: Mobile Kompaktgeräte. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 22 °C.

Referenz Szenario: Mobile Kompaktgeräte. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 25.5 °C.

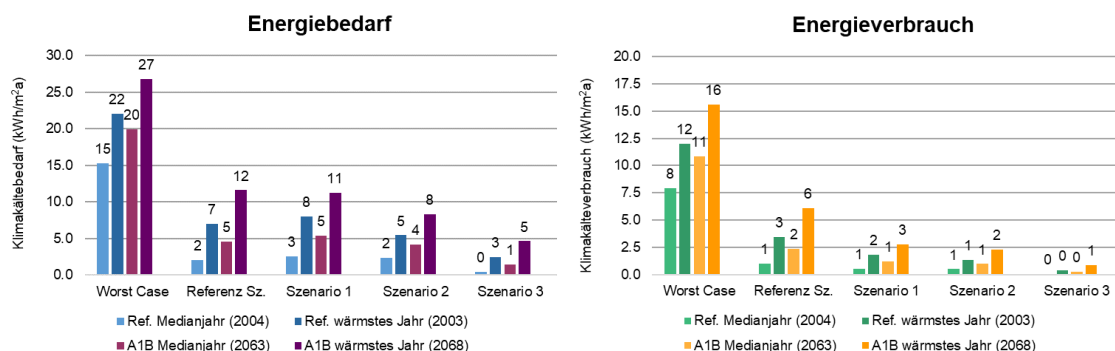
Szenario 1: Multi-Split-System. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 25.5 °C.

Szenario 2: Split-System. Kühlung des Wohnbereichs, Solltemperatur: 25.5 °C.

Szenario 3: Multi-Split-System. Kühlung der Schlafzimmer, Solltemperatur: 25.5 °C.

Tabelle 14: Klimakältebedarf, Klimakälteleistungsbedarf, Stromverbrauch und elektrische Leistung für Klimakälte der untersuchten Szenarien in den simulierten Jahren.

Abbildung 20 zeigt, inwieweit die Erhöhung der Solltemperatur, der Typ des Klimageräts, sowie die Anzahl der gekühlten Räume sich auf die Reduzierung des Klimakältebedarfs auswirken. Die Erhöhung der Solltemperatur hat eine signifikante Auswirkung, mit einer vergleichbaren Reduzierung des Klimakältebedarfs im Referenz Szenario und in Szenario 1, im Vergleich zum «Worst-Case» Szenario. Bezogen auf den Energieverbrauch ist die Reduzierung mit dem Multi-Split-System – Szenario 1 – jedoch aufgrund der höheren Effizienz dieses Klimagerätes grösser.



«Worst-Case» Szenario: Mobile Kompaktgeräte. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 22 °C.

Referenz Szenario: Mobile Kompaktgeräte. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 25.5 °C.

Szenario 1: Multi-Split-System. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 25.5 °C.

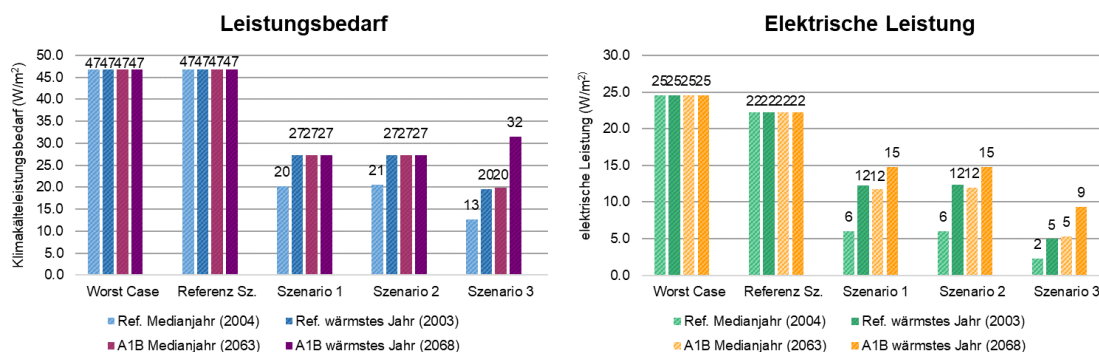
Szenario 2: Split-System. Kühlung des Wohnbereichs, Solltemperatur: 25.5 °C.

Szenario 3: Multi-Split-System. Kühlung der Schlafzimmer, Solltemperatur: 25.5 °C.

Abbildung 20: Links: Klimakältebedarf der untersuchten Szenarien in den simulierten Jahren. Rechts: Klimakälteverbrauch der untersuchten Szenarien in den simulierten Jahren.

In Bezug auf die Leistung, dargestellt in Abbildung 21, werden die Ergebnisse hauptsächlich von der für jeden Raum gewählten Leistung beeinflusst, welche 3.5 kW für den Wohnbereich und 2 kW für jedes Schlafzimmer beträgt.

Mobile Kompaktgeräte arbeiten nur unter Vollast (Absatz 1.2), so dass der Leistungsbedarf in den beiden betrachteten Szenarien gleich ist. Diese maximale Leistung erfolgt beim Betrieb der Kühlung in den Schlafzimmern, mit einer Leistung von 6 kW, was einem Klimakälteleistungsbedarf von 47 W/m² entspricht. Dies ist viel höher als der Standardwert gemäss SIA Merkblatt 2024 (SIA, 2015), welcher 12 W/m² beträgt – bezogen auf die Nettogeschossfläche anstelle der in diesem Dokument berechneten Energiebezugsfläche. In Bezug auf die elektrische Leistung gibt es einen geringen Unterschied zwischen den beiden Szenarien. Im Referenz Szenario arbeiten die Geräte etwas effizienter, weil die Solltemperatur höher ist. Mit den Split-Systemen wird in den beiden Szenarien 1 und 2 der höchste Klimakälteleistungsbedarf im Wohnbereich erreicht, mit einer Leistung von 3.5 kW (27 W/m²). In allen Jahren ausser im Medianjahr der Referenzperiode arbeitet das System unter Vollast. Im Szenario 3 arbeiten die Geräte nie unter Vollast; in den heissen Jahren ist der Leistungsbedarf höher. Bezogen auf die elektrische Leistung arbeitet das Klimagerät in Szenario 3 effizienter, da sich diese nur nachts in Betrieb befindet, wenn die Aussentemperatur niedriger ist.



«Worst-Case» Szenario: Mobile Kompaktgeräte. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 22 °C.

Referenz Szenario: Mobile Kompaktgeräte. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 25.5 °C.

Szenario 1: Multi-Split-System. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 25.5 °C.

Szenario 2: Split-System. Kühlung des Wohnbereichs, Solltemperatur: 25.5 °C.

Szenario 3: Multi-Split-System. Kühlung der Schlafzimmer, Solltemperatur: 25.5 °C.

Abbildung 21: Links: Klimakälteleistungsbedarf der untersuchten Szenarien in den simulierten Jahren. Rechts: Maximal elektrische Leistung für Klimakälte der untersuchten Szenarien in den simulierten Jahren.

4.2.1.3 Potenzial einer Photovoltaikanlage ohne und mit Batteriespeicher

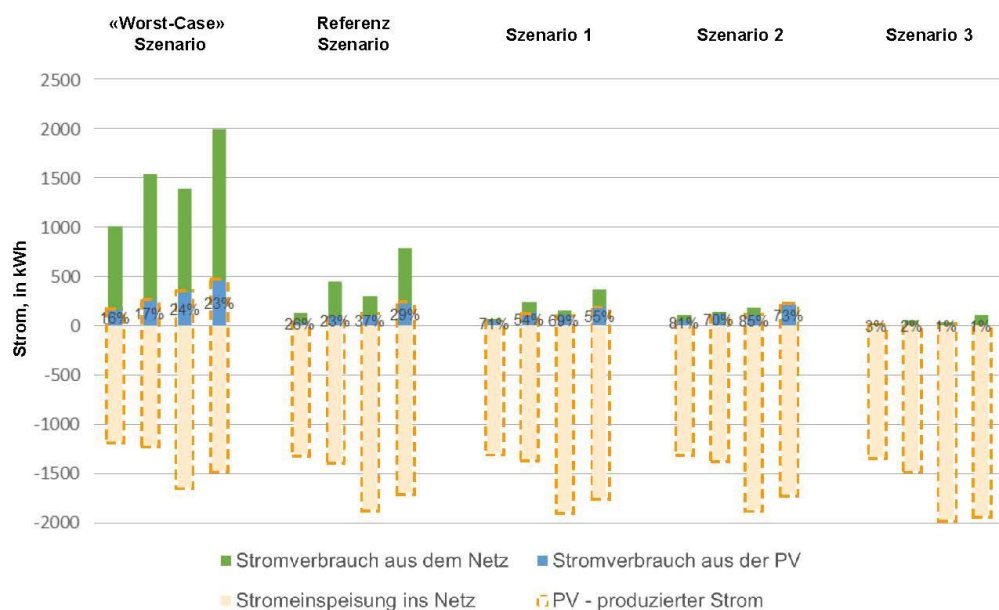
Um zu analysieren, inwieweit eine Photovoltaikanlage den Stromverbrauch für Kühlung (PV mit einer Leistung von $10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$) und den Stromverbrauch für Kühlung, Geräte und Beleuchtung (PV mit einer Leistung von $30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$) decken kann, wurden die nachfolgenden vier Varianten untersucht:

- Stromverbrauch für Kühlung:
 - Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ nach MuKE (EnDK, 2018a) dimensioniert wurde.
 - Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ nach MuKE (EnDK, 2018a) dimensioniert und durch eine Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage ergänzt wurde.
- Stromverbrauch für Kühlung, Geräte und Beleuchtung:
 - Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert wurde.
 - Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert und durch eine Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage ergänzt wurde.

Abbildung 22 zeigt den Stromverbrauch für die Kühlung der verschiedenen Szenarien im positiven Teil der y-Achse. Ein Teil davon ist durch den von der Photovoltaikanlage erzeugten Strom (blauer Balken) gedeckt, der Rest wird aus dem Netz (grüner Balken) bezogen. Der von der Photovoltaikanlage erzeugte Strom ist mit einer gelb gestrichelten Linie gekennzeichnet. Der von der Photovoltaikanlage erzeugte und ins Netz eingespeiste Strom wird durch den gelben Balken dargestellt, welcher mit negativen Werten gekennzeichnet ist. Der Prozentsatz stellt den Anteil des Stromverbrauchs für die Kühlung dar, der durch den direkten Verbrauch des von der Photovoltaikanlage erzeugten elektrischen Stroms gedeckt wird.

Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ nach MuKE (EnDK, 2018a) dimensioniert wurde (Abbildung 22), kann durch den direkten Verbrauch des von der Photovoltaikanlage erzeugten Stroms bis zu 24 % des Stromverbrauchs für die Kühlung im «Worst-Case» Szenario decken. Im Referenzszenario, in dem der Klimakälteverbrauch geringer ist, kann der Klimakälteverbrauch bis zu 37 % gedeckt werden. In den Szenarien 1 und 2 erhöht sich dieser Prozentsatz durch die weitere Reduzierung des Kühlverbrauchs.

Im Gegensatz dazu werden in Szenario 3, wo nur die Schlafzimmer nachts gekühlt werden, nur ca. 3 % des Klimakälteverbrauchs gedeckt, da der Verbrauch zu Zeiten erfolgt, wo keine Stromproduktion stattfindet. Fast der gesamte produzierte Strom wird somit direkt ins Netz eingespeist.



«Worst-Case» Szenario: Mobile Kompaktgeräte. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 22 °C.

Referenz Szenario: Mobile Kompaktgeräte. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 25.5 °C.

Szenario 1: Multi-Split-System. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 25.5 °C.

Szenario 2: Split-System. Kühlung des Wohnbereichs, Solltemperatur: 25.5 °C.

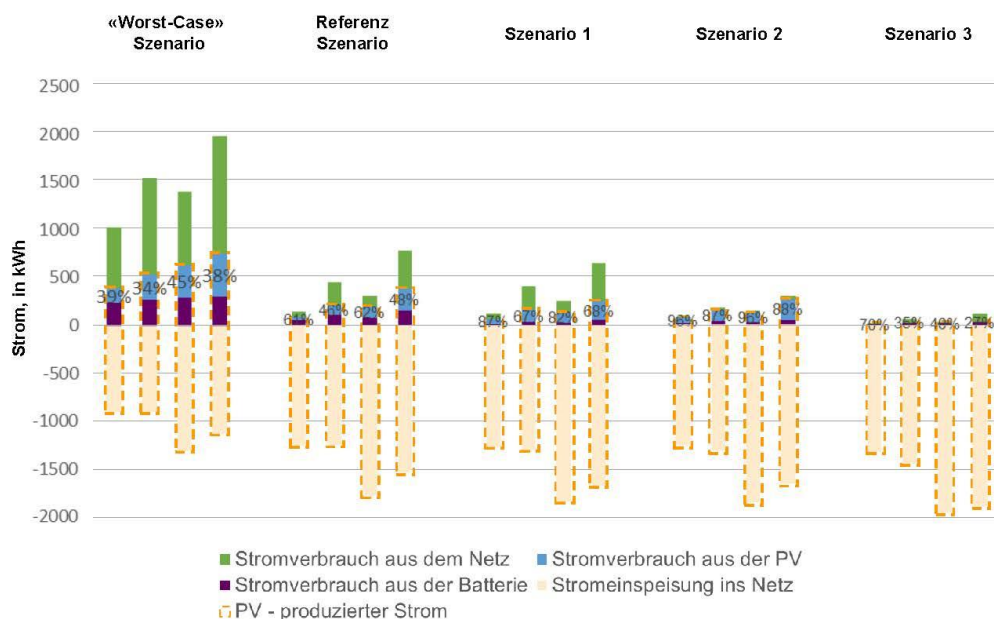
Szenario 3: Multi-Split-System. Kühlung der Schlafzimmer, Solltemperatur: 25.5 °C.

Abbildung 22: Jährlicher Strombilanz zwischen dem von der Photovoltaikanlage erzeugten Strom und dem Stromverbrauch für die Kühlung einer nach MuKEn (EnDK, 2018a) dimensionierten Photovoltaikanlage. Die Spalten für jedes Szenario entsprechen den Ergebnissen für die vier untersuchten Jahre in der folgenden Reihenfolge: Referenz Medianjahr (2004), Referenz wärmstes Jahr (2003), A1B Medianjahr (2063) und A1B warmes Jahr (2068). Der Prozentsatz stellt den Anteil des Stromverbrauchs für die Kühlung dar, der durch den direkten Verbrauch des von der Photovoltaikanlage erzeugten elektrischen Stroms gedeckt wird.

Abbildung 23 zeigt den Stromverbrauch für die Kühlung der verschiedenen Szenarien im positiven Teil der y-Achse. Ein Teil davon ist durch den von der Photovoltaikanlage erzeugten Strom (blauer Balken) gedeckt, ein anderer Teil ist durch den von der Batterie gespeicherten Strom (violetter Balken) gedeckt. Der Rest wird aus dem Netz (grüner Balken) bezogen. Der von der Photovoltaikanlage erzeugte Strom ist mit einer gelb gestrichelten Linie gekennzeichnet. Der von der Photovoltaikanlage erzeugte und ins Netz eingespeiste Strom wird durch den gelben Balken dargestellt, welcher mit negativen Werten gekennzeichnet ist. Der Prozentsatz stellt den Anteil des Stromverbrauchs für die Kühlung dar, welcher durch den direkten Verbrauch des von der Photovoltaikanlage erzeugten elektrischen Stroms und des in der Batterie gespeicherten Stroms gedeckt wird.

Durch die Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1.5 kWh (Abbildung 23) erhöht sich der Anteil des Eigenverbrauchs. In den Szenarien mit mobilen Kompaktgeräten kann die Batterie insbesondere im «Worst-Case» Szenario (bis zu 45 %) sowie im Referenz Szenario (bis zu 64 %) einen zusätzlichen Teil des Verbrauchs abdecken. In beiden Szenarien ist dieser zusätzliche Anteil geringer als der Prozentsatz, der direkt durch den von der Photovoltaikanlage erzeugten Strom gedeckt wird.

Bei den Szenarien mit Split-Systemen (Szenarien 1, 2 und 3) ist die Strommenge, die von der Batterie verbraucht wird, sehr gering. Die Installation einer Batterie ist daher nicht sinnvoll.



«Worst-Case» Szenario: Mobile Kompaktgeräte. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 22 °C.

Referenz Szenario: Mobile Kompaktgeräte. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 25.5 °C.

Szenario 1: Multi-Split-System. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 25.5 °C.

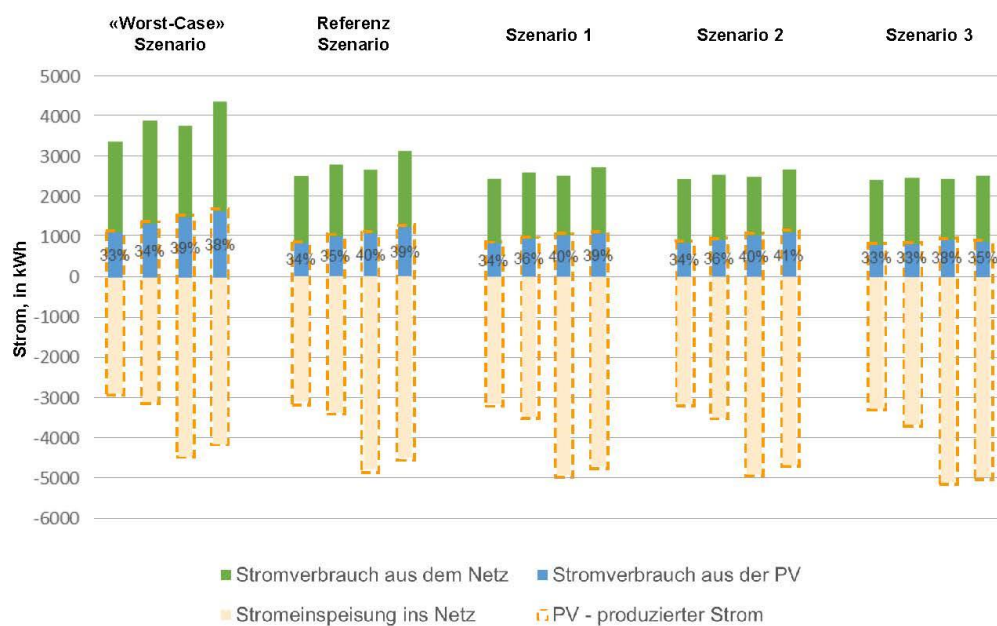
Szenario 2: Split-System. Kühlung des Wohnbereichs, Solltemperatur: 25.5 °C.

Szenario 3: Multi-Split-System. Kühlung der Schlafzimmer, Solltemperatur: 25.5 °C.

Abbildung 23: Jährliche Strombilanz zwischen dem von der Photovoltaikanlage erzeugten Strom und dem Stromverbrauch für die Kühlung einer nach MuKen (EnDK, 2018a) dimensionierten Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1.5 kWh (1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage). Die Spalten für jedes Szenario entsprechen den Ergebnissen für die vier untersuchten Jahre in der folgenden Reihenfolge: Referenz Medianjahr (2004), Referenz wärmstes Jahr (2003), A1B Medianjahr (2063) und A1B warmes Jahr (2068). Der Prozentsatz stellt den Anteil des Stromverbrauchs für die Kühlung dar, der durch den direkten Verbrauch des von der Photovoltaikanlage erzeugten elektrischen Stroms und in der Batterie gespeicherten Stroms gedeckt wird.

Zudem wurde untersucht, inwieweit eine grössere Photovoltaikanlage (Abbildung 24) mit einer Leistung von 30 W/m²_{EBF}, den elektrischen Verbrauch für Kühlung, Geräte und Beleuchtung decken kann. Der Stromverbrauch für die Geräte und Beleuchtung beträgt ca. 18.4 kWh/(m²a), was höher ist als der Verbrauch im «Worst-Case» Szenario im warmen Jahr der Periode A1B (15.6 kWh/(m²a)) und viel höher als der Stromverbrauch der anderen Szenarien, insbesondere der Szenarien 1, 2 und 3 mit Split-Systemen, liegt.

In allen untersuchten Szenarien lässt sich mit dieser Konstellation etwa ein Drittel des elektrischen Verbrauchs für Kühlung, Geräte und Beleuchtung decken. Die Ähnlichkeit zwischen allen Szenarien ist darauf zurückzuführen, dass der Stromverbrauch der Geräte und der Beleuchtung in allen Szenarien praktisch gleich ist. Wie erwähnt, ist dieser Verbrauch in allen Szenarien höher als der Klimakälteverbrauch, insbesondere in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen. Der Anteil des Eigenverbrauchs in allen Szenarien liegt bei 35-40 %.



«Worst-Case» Szenario: Mobile Kompaktgeräte. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 22 °C.

Referenz Szenario: Mobile Kompaktgeräte. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 25.5 °C.

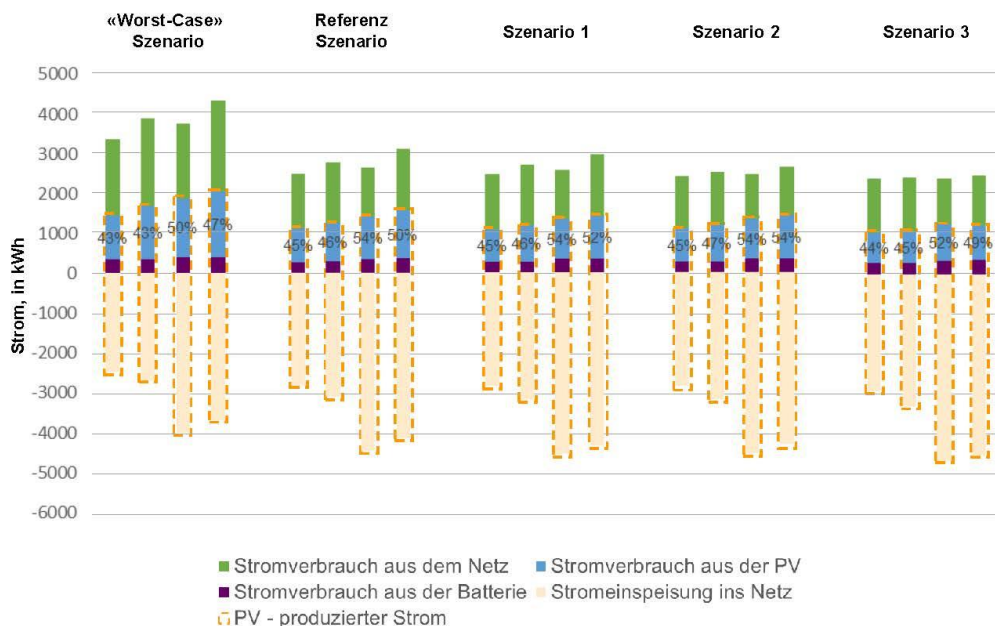
Szenario 1: Multi-Split-System. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 25.5 °C.

Szenario 2: Split-System. Kühlung des Wohnbereichs, Solltemperatur: 25.5 °C.

Szenario 3: Multi-Split-System. Kühlung der Schlafzimmer, Solltemperatur: 25.5 °C.

Abbildung 24: Jährliche Strombilanz zwischen dem von der Photovoltaikanlage erzeugten Strom und dem Stromverbrauch für Kühlung, Geräte und Beleuchtung mit einer Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 30 W/m²_{EBF}. Die Spalten für jedes Szenario entsprechen den Ergebnissen für die vier untersuchten Jahre in der folgenden Reihenfolge: Referenz Medianjahr (2004), Referenz wärmstes Jahr (2003), A1B Medianjahr (2063) und A1B warmes Jahr (2068). Der Prozentsatz stellt den Anteil des Stromverbrauchs für die Kühlung dar, der durch den direkten Verbrauch des von der Photovoltaikanlage erzeugten elektrischen Stroms gedeckt wird.

Durch die Verbindung der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 4.5 kWh (Abbildung 25) erhöht sich der Anteil des Eigenverbrauchs in allen Szenarien in einem ähnlichen Verhältnis, um etwa 10 %. Diese Konstellation deckt etwa 50 % des Gesamtverbrauchs ab.



«Worst-Case» Szenario: Mobile Kompaktgeräte. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 22 °C.

Referenz Szenario: Mobile Kompaktgeräte. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 25.5 °C.

Szenario 1: Multi-Split-System. Kühlung der gesamten Wohnung, Solltemperatur: 25.5 °C.

Szenario 2: Split-System. Kühlung des Wohnbereichs, Solltemperatur: 25.5 °C.

Szenario 3: Multi-Split-System. Kühlung der Schlafzimmer, Solltemperatur: 25.5 °C.

Abbildung 25: Jährlicher Strombilanz zwischen dem von der Photovoltaikanlage erzeugten Strom und dem Stromverbrauch für Kühlung, Geräte und Beleuchtung mit einer Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 30 W/m²_{EFF} und einer Batterie von 4.5 kWh (1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage). Die Spalten für jedes Szenario entsprechen den Ergebnissen für die vier untersuchten Jahre in der folgenden Reihenfolge: Referenz Medianjahr (2004), Referenz wärmstes Jahr (2003), A1B Medianjahr (2063) und A1B warmes Jahr (2068). Der Prozentsatz stellt den Anteil des Stromverbrauchs für die Kühlung dar, der durch den direkten Verbrauch des von der Photovoltaikanlage erzeugten elektrischen Stroms und in der Batterie gespeicherten Stroms gedeckt wird.

4.2.1.4 Erkenntnisse

Anhand der durchgeführten Analysen können folgende Aussagen getroffen werden:

- Eine Solltemperatur von 25.5 °C reicht nicht aus, um die empfundene Temperatur im Kühlbetrieb innerhalb der Komfortgrenzen gemäss SIA 180 (SIA, 2014a) zu halten. Der Unterschied zwischen der empfundenen Temperatur und der Lufttemperatur im Raum ist nicht vernachlässigbar.
- Eine Teilkühlung der Wohnung führt zu einer erheblichen Anzahl von Überhitzungsstunden in den nicht gekühlten Räumen. Die berücksichtigte natürliche Lüftung reicht nicht aus, um den Komfort zu gewährleisten. Die Temperatur in den nicht gekühlten Räumen steigt tagsüber und während einer Hitzeperiode täglich stärker an.
- Der Stromverbrauch für Kühlung kann durch eine angemessene Nutzung (bei einer Solltemperatur von 25.5 °C anstatt von 22 °C) erheblich reduziert werden. Wird zudem ein effizientes Kühlsystem implementiert, Typ Split- oder Multi-Split-System, bewirkt dies eine zusätzliche Reduzierung des Stromverbrauchs. Das Gleiche gilt für die Reduzierung der Anzahl der gekühlten Räume, insbesondere bei Schlafzimmern, die nur nachts gekühlt werden.
- Der Stromverbrauch für die Kühlung liegt im «Worst-Case» Szenario (Kühlung mit mobilen Kompaktgeräten bei einer Solltemperatur von 22 °C) bei 7.9 kWh/(m²a) und 10.9 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden bzw. bei 12.0 kWh/(m²a) und 15.6 kWh/(m²a) in den warmen Jahren beider Perioden. Durch die Erhöhung der Solltemperatur auf 25.5 °C reduziert sich der Stromverbrauch je nach untersuchtem Jahr um 50-80 % und liegt bei 1.0 kWh/(m²a) und 2.4 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden bzw. 3.5 kWh/(m²a) und 6.1 kWh/(m²a) in den warmen Jahren beider Perioden.

Durch ein Multi-Split-System reduziert sich der Stromverbrauch zusätzlich um 50 %. Dieser liegt bei 0.5 kWh/(m²a) und 1.2 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden bzw. 1.8 kWh/(m²a) und 2.8 kWh/(m²a) in den warmen Jahren beider Perioden.

- Der Klimawandel impliziert einen erheblichen Anstieg des Stromverbrauchs. Im «Worst-Case» Szenario mit einer Solltemperatur von 22°C steigt der Stromverbrauch im Vergleich zur Referenzperiode um fast 40 % im Medianjahr und um 30 % im warmen Jahr der Periode A1B an. In den Szenarien mit einer Solltemperatur von 25.5 °C steigt der Stromverbrauch prozentual gesehen noch stärker an. Im Vergleich zur Referenzperiode ist der Stromverbrauch im Medianjahr mehr als doppelt so hoch und im warmen Jahr der Periode A1B um mehr als 50 % höher.
- Eine Photovoltaikanlage zur Deckung des Stromverbrauchs für die Kühlung ist dann sinnvoll, wenn der Verbrauch hoch ist und in den Stunden mit Sonneneinstrahlung anfällt. Mit einer grösseren Photovoltaikanlage kann ein grösserer Teil des Verbrauchs gedeckt werden als mit einer grösseren Batterie, insbesondere bei kompakten Geräten deren elektrische Leistung sehr hoch ist und deren Batterie sich sehr schnell entleert. Bei Split-Systemen – wenn der Stromverbrauch nicht zu gering ist - sind sowohl eine grössere Photovoltaikanlage als auch eine grössere Batterie von Vorteil. Dies kann jedoch zu einem hohen Aufwand an grauer Energie führen. Eine Ökobilanzierung des gesamten Lebenszyklus der Anlage ermöglicht es, die angemessene Grösse der Anlage zu bestimmen.
- Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von 10 W/m²_{EBF} nach MuKE (EnDK, 2018a) dimensioniert wurde, kann durch den direkten Verbrauch des von der Photovoltaikanlage erzeugten Stroms bis zu 24 % des Stromverbrauchs für die Kühlung im «Worst-Case» Szenario decken. Mit abnehmendem Verbrauch steigt der Anteil des Direktverbrauchs und erreicht 47 % im Referenzszenario und 71 % in Szenario 1. Sowohl in Szenario 1 als auch in Szenario 2 ist der Verbrauch so gering, dass ein erheblicher Teil davon direkt mit der Photovoltaikanlage gedeckt wird. In Szenario 3, wo nur die Schlafzimmer nachts gekühlt werden, deckt die Photovoltaikanlage den Verbrauch kaum. Fast der gesamte produzierte Strom wird somit direkt ins Netz eingespeist. Durch die Verbindung der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (mit einer Kapazität von 1.5 kWh) steigt der Eigenverbrauch im «Worst-Case» Szenario auf 45 %, im Referenzszenario auf 64 % und im Szenario 1 auf 87 %. In den Szenarien 2 und 3 ist der Verbrauch so gering, dass der Anstieg des Eigenverbrauchs zwar prozentual signifikant, aber absolut gesehen sehr gering ist.
- Wenn der Verbrauch für die Kühlung gering ist, macht eine Photovoltaikanlage nur dann Sinn, wenn sie zur Deckung des weiteren Stromverbrauchs im Gebäude für Elektrogeräte und Beleuchtung eingesetzt oder ins Netz eingespeist wird. Ebenso wäre es interessant, die Nutzung der Photovoltaikanlage zur Deckung des Heizwärmeverbrauchs mittels Wärmepumpe zu evaluieren.
- Eine grössere Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 30 W/m²_{EBF}, die den elektrischen Verbrauch von Kühlung, Geräten und Beleuchtung deckt, ermöglicht einen Eigenverbrauch von 35-40 % des Stromverbrauchs in allen Szenarien. Durch die Verbindung der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (mit einer Kapazität von 4.5 kWh) erhöht sich der Anteil des Eigenverbrauchs in allen Szenarien in einem ähnlichen Verhältnis, um etwa 10 %. Diese Konstellation kann etwa 50 % des Gesamtverbrauchs decken.

4.2.2 Klimakälteverbrauch unter verschiedenen Betriebsbedingungen der Kühlung

In Anbetracht der in den untersuchten Szenarien erzielten Ergebnissen, wurden zusätzliche Simulationen durchgeführt. Das Ziel dieser weiteren Simulationen ist es, den Stromverbrauch zur Kühlung unter verschiedenen Betriebsbedingungen des Kühlsystems, sowohl für das Klima in Basel als auch in Lugano, zu berechnen.

Wie in Abschnitt 4.2.1.1 erläutert, garantiert eine Solltemperatur von 25.5 °C nicht, dass die empfundene Temperatur während der gesamten Betriebszeit der Klimageräte im Komfortbereich gehalten wird. Aus diesem Grund wurde eine niedrigere Solltemperatur von 24 °C berücksichtigt. Diese Solltemperatur ermöglicht die empfundene Temperatur innerhalb des Behaglichkeitsbereichs in der untersuchten Wohnung während der Betriebszeit zu halten.

Zusätzlich wurden die Wohnung bzw. die Räume als ganztägig gekühlt betrachtet, so dass die Lufttemperatur zu keinem Zeitpunkt die Solltemperatur überschreitet. Diese Situation stellt eine Wohnung dar, deren Räume den ganzen Tag belegt sind.

Die folgenden Parameter wurden kombiniert:

- Gerätetyp: mobile Kompaktgeräte und Split-Systeme.
- Standort: Basel und Lugano.
- Solltemperatur: 22 °C, 24 °C und 25.5 °C.
- Anzahl gekühlter Räume: ganze Wohnung, Wohnbereich und Schlafzimmer.
- Betriebszeit der Kühlung: während des ganzen Tages und bei Belegung (der Wohnbereich wird bei Belegung von 06:00 bis 21:00 Uhr gekühlt, während die Schlafzimmer von 21:00 bis 06:00 Uhr gekühlt werden).

4.2.2.1 Klimakälteverbrauch für das Klima in Basel

Die Ergebnisse für das Klima in Basel sind in Tabelle 15 und Abbildung 26 für die mobilen Kompaktgeräte und in Tabelle 16 und Abbildung 27 für die Split-Systeme dargestellt.

Mobile Kompaktgeräte

Die Ergebnisse zeigen die Variabilität des Klimakälteverbrauchs in Abhängigkeit von den betrachteten Bedingungen. Im Medianjahr der Referenzperiode liegt der Klimakälteverbrauch zwischen 0.2 kWh/(m²a) für die Schlafzimmer bei einer Kühlung nur bei Belegung bei einer Solltemperatur von 25.5 °C und bei 9.1 kWh/(m²a) für die ganze Wohnung mit einer 24-Stunden-Kühlung bei einer Solltemperatur von 22 °C. Dieser Klimakälteverbrauch wird im Medianjahr der Periode A1B deutlich zunehmen. Abhängig von den Solltemperaturen von 22 °C, 24 °C und 25.5 °C erhöht sich der Verbrauch um 40 %, 80 % und 140 % im Vergleich zum Medianjahr der Referenzperiode.

Im warmen Jahr der Periode A1B kann der Stromverbrauch für die Kühlung bis zu 18.4 kWh/(m²a) ausmachen.

Eine Solltemperatur von 24 °C führt zu einer Reduzierung des Klimakälteverbrauchs von 40-60 % im Vergleich zu einer Solltemperatur von 22 °C. Im Vergleich zu einer Solltemperatur von 25.5 °C verdoppelt oder verdreifacht sich der Klimakälteverbrauch in den Medianjahren beider Perioden und steigt in den warmen Jahren beider Perioden um ca. 70-100 % an.

Die ganztägige Kühlung der Wohnung im Vergleich zu einer Kühlung nur bei Belegung bedeutet für alle betrachteten Jahre und Solltemperaturen eine Erhöhung des Klimakälteverbrauchs von ca. 20 %. Dieser Anstieg ist vor allem auf den Umstand zurückzuführen, dass die Schlafzimmer den ganzen Tag gekühlt werden und nicht nur während der Nachtstunden, wenn der Kühlbedarf gering ist.

Bei der Kühlung im Wohnbereich fällt dieser Unterschied mit etwa 5 % deutlich geringer aus. Das liegt daran, dass während der Nacht der Kühlbedarf dieses Raumes sehr gering ist, nachdem er den ganzen Tag bereits gekühlt wurde.

Bei der Kühlung der Schlafzimmer ist die Erhöhung abhängig vom betrachteten Jahr sowie der Solltemperatur und ist in vielen Fällen höher als 50 %. Wie in Szenario 3 in Abbildung 19 dargestellt, ist die Temperatur tagsüber in den Schlafzimmern hoch, was einen erheblichen Energieverbrauch erfordert, um diese am Abend auf die gewünschte Temperatur zu kühlen.

Der Klimakälteverbrauch des Wohnbereichs und der Schlafzimmer bei ganztägiger Kühlung ist sehr ähnlich, wobei dieser im Wohnbereich etwas höher ausfällt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in beiden Szenarien eine ähnliche Fläche gekühlt wird. Die Schlafzimmer sind nach Nordosten und der Wohnbereich ist nach Südwesten orientiert, wobei ein grosser Teil der Wohnbereich-Fassade durch eine Loggia verschattet wird.

	Ref. Medianjahr (2004)			Ref. wärmstes Jahr (2003)			A1B Medianjahr (2063)			A1B warmes Jahr (2068)		
	22 °C	24 °C	25.5 °C	22 °C	24 °C	25.5 °C	22 °C	24 °C	25.5 °C	22 °C	24 °C	25.5 °C
Wohnung – ganzer Tag	9.1	3.8	1.1	14.0	7.9	4.1	12.7	6.4	2.8	18.4	11.8	7.0
Wohnbereich – ganzer Tag	4.8	2.1	0.9	7.7	4.4	2.3	6.8	3.7	1.8	10.1	6.8	3.7
Schlafzimmer – ganzer Tag	4.5	1.6	0.4	7.1	4.0	1.9	6.5	2.9	1.3	9.8	5.7	3.6
Wohnung – bei Belegung	7.9	2.9	1.0	12.0	6.7	3.5	10.9	5.3	2.4	15.6	9.8	6.1
Wohnbereich – bei Belegung	4.6	2.1	0.8	7.3	4.2	2.2	6.6	3.4	1.6	9.7	6.3	3.4
Schlafzimmer – bei Belegung	3.2	0.7	0.2	4.7	2.4	1.1	4.6	1.5	0.6	6.6	3.7	2.3

Tabelle 15: Stromverbrauch für Klimakälte (in kWh/(m²a)) der simulierten Kombinationen mit mobilen Kompaktgeräten für das aktuelle und zukünftige Klima in Basel. Der Stromverbrauch für Klimakälte der Szenarien «Worst-Case» und «Referenz» sind jeweils fett markiert.

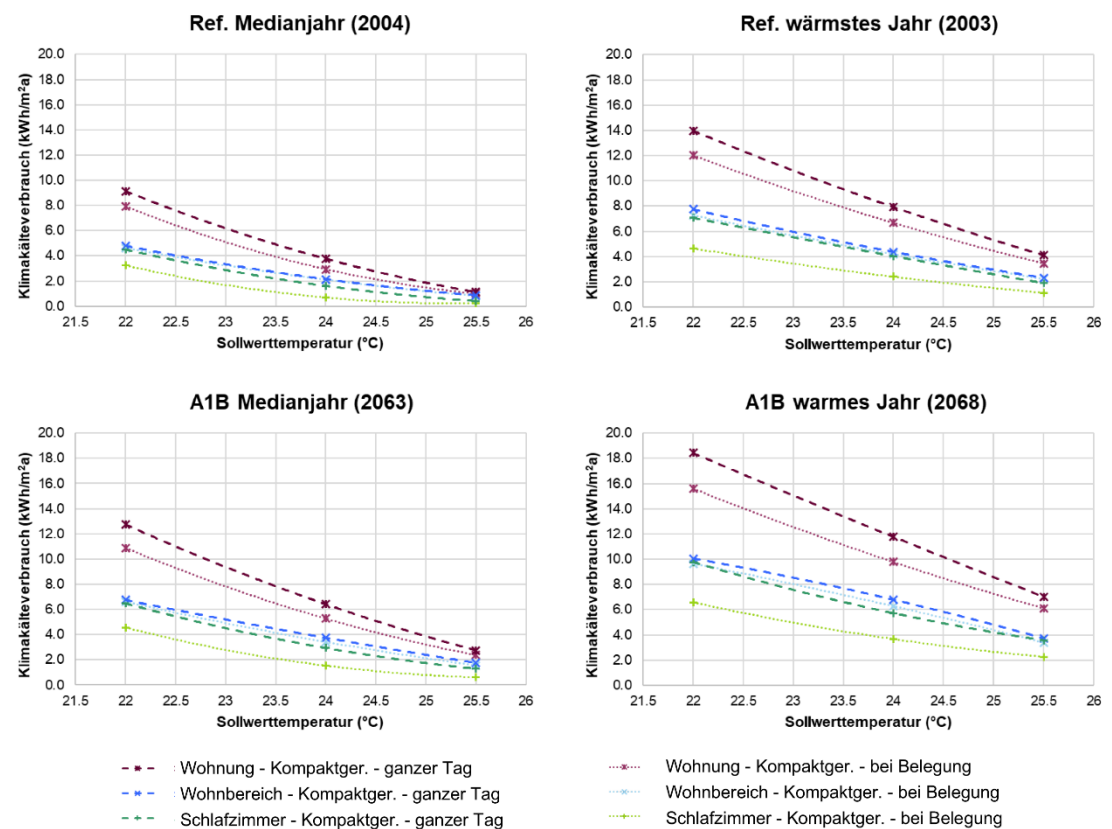


Abbildung 26: Graphische Darstellung des Stromverbrauchs für Klimakälte der simulierten Kombinationen mit mobilen Kompaktgeräten für das aktuelle und zukünftige Klima in Basel.

Split-Systeme

Der Klimakälteverbrauch der Split-Systeme ist deutlich geringer als derjenige von Kompaktgeräten und beträgt grösstenteils weniger als die Hälfte.

Im Medianjahr der Referenzperiode liegt der Klimakälteverbrauch zwischen 0.1 kWh/(m²a) für die Schlafzimmer bei einer Kühlung nur bei Belegung bei einer Solltemperatur von 25.5 °C und bei 4.0 kWh/(m²a) für die ganze Wohnung bei einer 24-Stunden-Kühlung bei einer Solltemperatur von 22 °C.

Dieser Klimakälteverbrauch wird im Medianjahr der Periode A1B deutlich zunehmen. Abhängig von den Solltemperaturen von 22 °C, 24 °C und 25.5 °C erhöht sich dieser um 45 %, 90 % und 140 % im Vergleich zum Medianjahr der Referenzperiode. Im warmen Jahr der Periode A1B kann der Stromverbrauch für die Kühlung bis zu 8.5 kWh/(m²a) ausmachen.

Eine Solltemperatur von 24 °C führt zu einer ähnlichen Reduzierung des Klimakälteverbrauchs wie bei mobilen Kompaktgeräten. Diese Reduzierung beträgt 40-70 % im Vergleich zu einer Solltemperatur von 22 °C. Im Vergleich zu einer Solltemperatur von 25.5 °C verdoppelt sich der Klimakälteverbrauch in den Medianjahren beider Perioden und steigt in den warmen Jahren beider Perioden um ca. 60-80 % an.

Die ganztägige Kühlung der Wohnung im Vergleich zu einer Kühlung nur bei Belegung bedeutet für alle betrachteten Jahre und Solltemperaturen eine Erhöhung des Klimakälteverbrauchs von ca. 30 %. Bei der Kühlung im Wohnbereich ist dieser Unterschied mit etwa 5 % deutlich geringer – wie bei den Kompaktgeräten.

Bei einer Kühlung der Schlafzimmer ist die Erhöhung abhängig vom betrachteten Jahr und der Solltemperatur. Jedoch verdoppelt sich der Klimakälteverbrauch in fast allen Fällen.

Wie bei den mobilen Kompaktgeräten, ist der Klimakälteverbrauch des Wohnbereichs und der Schlafzimmer bei ganztägiger Kühlung sehr ähnlich, wobei dieser im Wohnbereich etwas höher ausfällt.

	Ref. Medianjahr (2004)			Ref. wärmstes Jahr (2003)			A1B Medianjahr (2063)			A1B warmes Jahr (2068)		
	22 °C	24 °C	25.5 °C	22 °C	24 °C	25.5 °C	22 °C	24 °C	25.5 °C	22 °C	24 °C	25.5 °C
Wohnung – ganzer Tag	4.0	1.8	0.7	6.4	4.2	2.4	5.7	3.2	1.7	8.5	6.2	3.6
Wohnbereich – ganzer Tag	2.2	1.1	0.5	3.6	2.6	1.4	3.2	2.0	1.0	5.0	3.7	2.4
Schlafzimmer – ganzer Tag	2.0	0.8	0.3	3.1	1.9	1.0	2.7	1.4	0.7	4.1	2.8	1.8
Wohnung – bei Belegung	2.9	1.3	0.5	4.9	3.2	1.8	4.3	2.4	1.2	6.8	4.9	2.8
Wohnbereich – bei Belegung	2.1	1.1	0.5	3.6	2.4	1.4	3.0	1.9	1.0	4.7	3.6	2.3
Schlafzimmer – bei Belegung	0.9	0.2	0.1	1.6	0.9	0.4	1.4	0.6	0.3	2.3	1.5	0.9

Tabelle 16: Stromverbrauch für Klimakälte (in kWh/(m²a)) der simulierten Kombinationen mit Split-Systemen für das aktuelle und zukünftige Klima in Basel. Der Stromverbrauch für Klimakälte der Szenarien 1, 2 und 3 sind jeweils fett markiert.

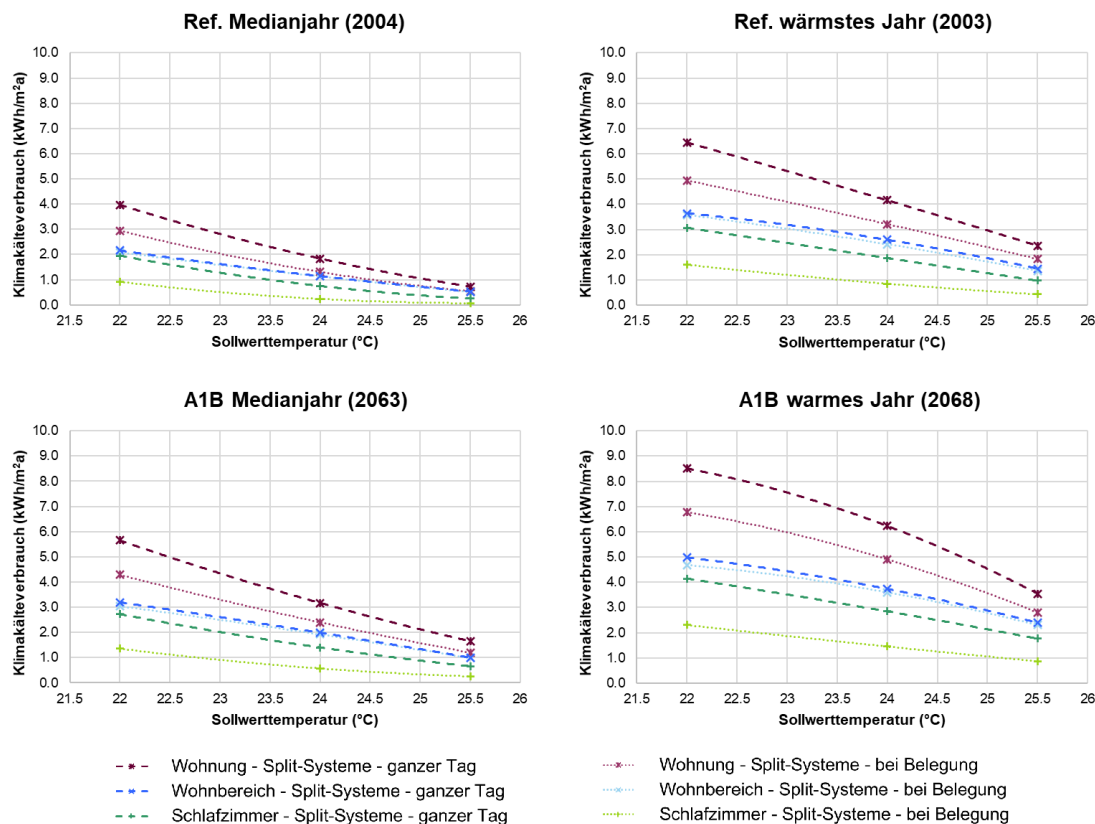


Abbildung 27: Graphische Darstellung des Stromverbrauchs für Klimakälte der simulierten Kombinationen mit Split-Systemen für das aktuelle und zukünftige Klima in Basel.

4.2.2.2 Klimakälteverbrauch für das Klima in Lugano

Die Ergebnisse für das Klima in Lugano sind in Tabelle 17 und Abbildung 28 für die mobilen Kompaktgeräte und in Tabelle 18 und Abbildung 29 für die Split-Systeme dargestellt.

Die Ergebnisse für die Kompaktgeräte und Split-Systeme für das Klima in Lugano sind analog zu jenen des Klimas in Basel, wobei der Stromverbrauch für Klimakälte in Lugano deutlich höher ist. Dies ist in den Grafiken der Abbildung 26 und Abbildung 27 bzw. Abbildung 28 und Abbildung 29 gut erkennbar und vergleichbar.

Mobile Kompaktgeräte

Im Medianjahr der Referenzperiode liegt der Klimakälteverbrauch bei 0.5 kWh/(m²a) für die Schlafzimmer mit einer Kühlung nur bei Belegung bei einer Solltemperatur von 25.5 °C und bei 11.8 kWh/(m²a) für die Wohnung mit einer 24-Stunden-Kühlung bei einer Solltemperatur von 22 °C.

Dieser Klimakälteverbrauch wird im Medianjahr der Periode A1B deutlich zunehmen. Abhängig von den Solltemperaturen von 22 °C, 24 °C und 25.5 °C erhöht sie dieser um 40 %, 80 % und 200 % im Vergleich zum Medianjahr der Referenzperiode.

Im warmen Jahr der Periode A1B kann der Stromverbrauch für die Kühlung bis zu 22.8 kWh/(m²a) ausmachen.

Eine Solltemperatur von 24 °C führt zu einer ähnlichen Reduzierung des Klimakälteverbrauchs wie für das Klima in Basel. Diese Reduzierung beträgt 50-70 % im Vergleich zu einer Solltemperatur von 22 °C. Im Vergleich zu einer Solltemperatur von 25.5 °C verdoppelt oder verdreifacht sich der Klimakälteverbrauch beinahe in den Medianjahren beider Perioden und steigt in den warmen Jahren beider Perioden um ca. 50-60 % an.

Die ganztägige Kühlung der Wohnung im Vergleich zu einer Kühlung nur bei Belegung bedeutet für alle betrachteten Jahre und Solltemperaturen eine Erhöhung des Klimakälteverbrauchs von ca. 25 %. Bei der Kühlung vom Wohnbereich ist dieser Unterschied mit etwa 5 % deutlich geringer – wie bei den Kompaktgeräten.

Bei einer Kühlung der Schlafzimmer ist die Erhöhung abhängig vom betrachteten Jahr und der Solltemperatur und beträgt mehr als 60 % in allen Fällen.

Der Klimakälteverbrauch des Wohnbereichs und der Schlafzimmer ist bei ganztägiger Kühlung sehr ähnlich, wobei dieser im Wohnbereich etwas höher ausfällt.

	Ref. Medianjahr (2004)			Ref. wärmstes Jahr (2003)			A1B Medianjahr (2063)			A1B warmes Jahr (2068)		
	22 °C	24 °C	25.5 °C	22 °C	24 °C	25.5 °C	22 °C	24 °C	25.5 °C	22 °C	24 °C	25.5 °C
Wohnung – ganzer Tag	11.8	6.1	2.2	16.3	10.1	6.0	15.9	10.0	5.8	22.8	16.4	11.0
Wohnbereich – ganzer Tag	6.4	3.5	1.4	8.9	5.6	3.4	8.3	5.5	3.3	12.9	9.5	5.9
Schlafzimmer – ganzer Tag	6.3	2.8	1.0	8.3	5.3	3.4	8.1	5.1	3.1	11.7	8.2	6.3
Wohnung – bei Belegung	10.2	4.6	2.0	14.1	8.5	5.1	13.6	8.4	4.8	20.3	14.2	9.5
Wohnbereich – bei Belegung	6.0	3.4	1.4	8.2	5.5	3.2	8.0	5.2	3.1	12.4	9.0	5.6
Schlafzimmer – bei Belegung	4.1	1.5	0.5	6.1	3.2	1.8	5.9	3.0	2.0	8.7	5.9	4.0

Tabelle 17: Stromverbrauch für Klimakälte (in kWh/(m²a)) der simulierten Kombinationen mit mobilen Kompaktgeräten für das aktuelle und zukünftige Klima in Lugano.

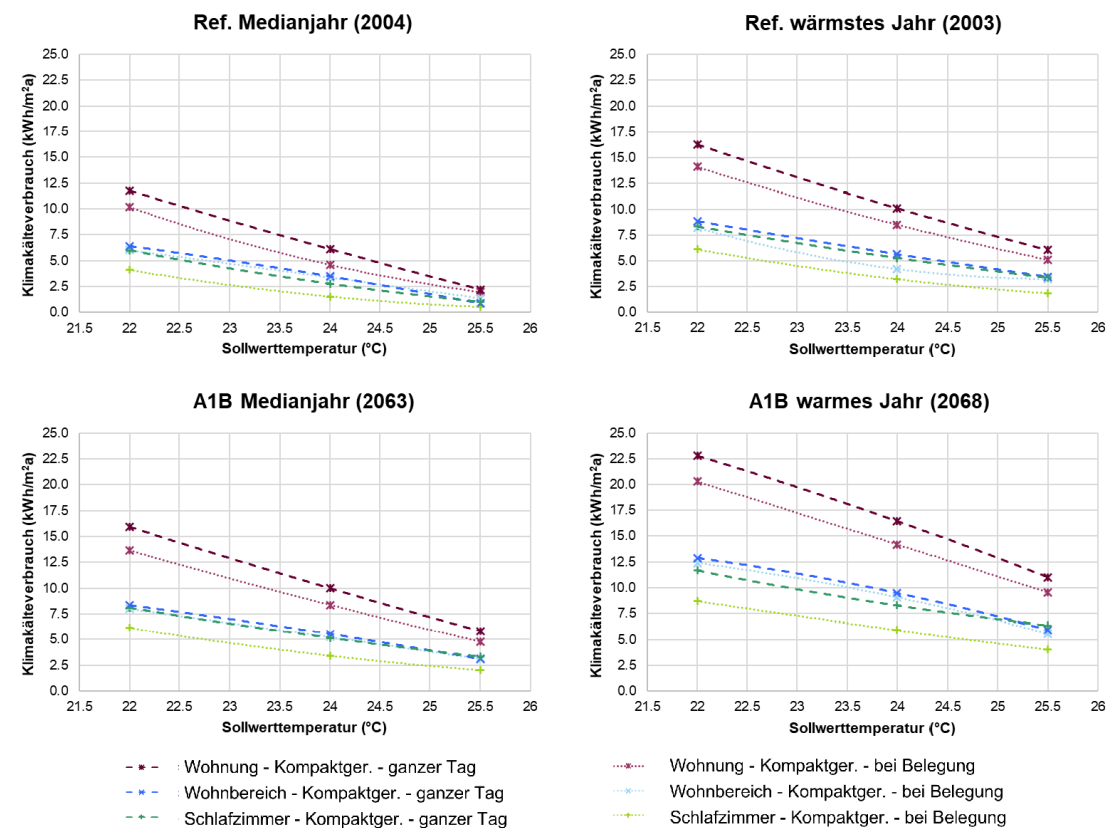


Abbildung 28: Graphische Darstellung des Stromverbrauchs für Klimakälte der simulierten Kombinationen mit mobilen Kompaktgeräten für das aktuelle und zukünftige Klima in Lugano.

Split-Systeme

Der Klimakälteverbrauch der Split-Systeme ist, wie für das Klima in Basel, deutlich geringer als derjenige von Kompaktgeräten und beträgt grösstenteils etwas weniger als die Hälfte.

Im Medianjahr der Referenzperiode liegt der Klimakälteverbrauch bei 0.2 kWh/(m²a) für die Schlafzimmer mit einer Kühlung nur bei Belegung bei einer Solltemperatur von 25.5 °C und bei 5.3 kWh/(m²a) für die ganze Wohnung bei einer 24-Stunden-Kühlung bei einer Solltemperatur von 22 °C.

Dieser Klimakälteverbrauch wird im Medianjahr der Periode A1B deutlich zunehmen. Abhängig von den Solltemperaturen von 22 °C, 24 °C und 25.5 °C erhöht sich dieser um 45 %, 80 % und 160 % im Vergleich zum Medianjahr der Referenzperiode.

Im warmen Jahr der Periode A1B kann der Stromverbrauch für die Kühlung bis zu 11.2 kWh/(m²a) ausmachen.

Eine Solltemperatur von 24 °C führt zu einer ähnlichen Reduzierung des Klimakälteverbrauchs wie bei mobilen Kompaktgeräten. Diese Reduzierung beträgt 50-80 % im Vergleich zu einer Solltemperatur von 22 °C. Im Vergleich zu einer Solltemperatur von 25.5 °C verdoppelt sich der Klimakälteverbrauch im Medianjahr der Referenzperiode und steigt im Medianjahr der Periode A1B und den warmen Jahren beider Perioden um ca. 50-70 % an.

Die ganztägige Kühlung der Wohnung im Vergleich zu einer Kühlung nur bei Belegung bedeutet für alle betrachteten Jahre und Solltemperaturen eine Erhöhung des Klimakälteverbrauchs von ca. 25 %. Wird nur der Wohnbereich gekühlt, ist dieser Unterschied mit etwa 5 % deutlich geringer – wie bei den Kompaktgeräten.

Bei einer Kühlung der Schlafzimmer ist die Erhöhung abhängig vom betrachteten Jahr und der Solltemperatur, wobei sich der Klimakälteverbrauch in fast allen Fällen verdoppelt.

Wie bei den mobilen Kompaktgeräten, ist der Klimakälteverbrauch des Wohnbereichs und der Schlafzimmer bei einer ganztägigen Kühlung sehr ähnlich und beträgt mehr als 60 % in allen Fällen.

	Ref. Medianjahr (2004)			Ref. wärmstes Jahr (2003)			A1B Medianjahr (2063)			A1B warmes Jahr (2068)		
	22 °C	24 °C	25.5 °C	22 °C	24 °C	25.5 °C	22 °C	24 °C	25.5 °C	22 °C	24 °C	25.5 °C
Wohnung – ganzer Tag	5.3	2.8	1.3	7.8	5.3	3.2	7.4	5.0	3.0	11.2	8.8	6.0
Wohnbereich – ganzer Tag	3.0	1.7	0.8	4.5	3.2	2.0	4.2	3.0	1.8	6.7	5.3	3.6
Schlafzimmer – ganzer Tag	2.4	1.2	0.5	3.7	2.4	1.5	3.5	2.2	1.3	5.4	4.1	2.8
Wohnung – bei Belegung	4.1	2.1	1.0	6.2	4.1	2.5	5.9	3.9	2.4	9.4	7.2	4.9
Wohnbereich – bei Belegung	2.9	1.7	0.8	4.2	3.0	1.9	4.0	2.8	1.8	6.4	5.1	3.4
Schlafzimmer – bei Belegung	1.3	0.5	0.2	2.2	1.3	0.7	2.1	1.2	0.7	3.5	2.5	1.7

Tabelle 18: Stromverbrauch für Klimakälte (in kWh/(m²a)) der simulierten Kombinationen mit Split-Systemen für das aktuelle und zukünftige Klima in Lugano.

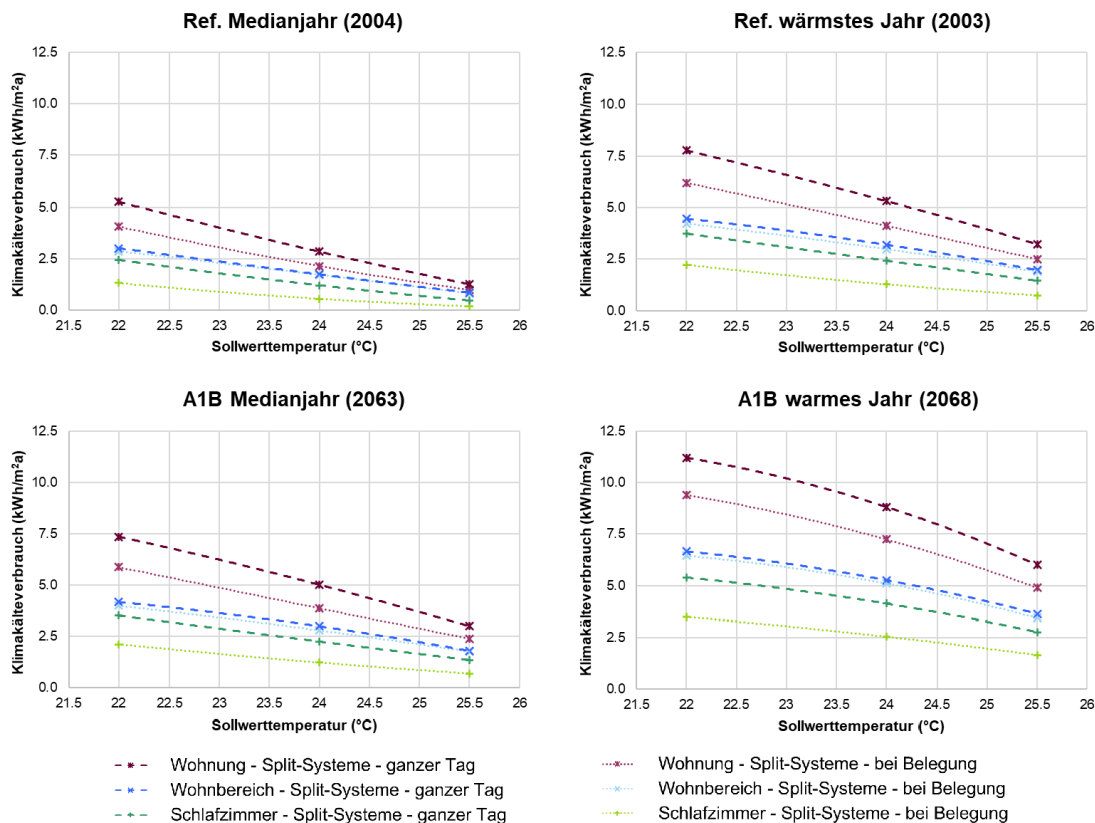


Abbildung 29: Graphische Darstellung des Stromverbrauchs für Klimakälte der simulierten Kombinationen mit Split-Systemen für das aktuelle und zukünftige Klima in Lugano.

Der Klimakälteverbrauch für das Klima in Lugano liegt bei einer Solltemperatur von 22 °C, 24 °C und 25.5 °C in den Medianjahren beider Perioden etwa 30 %, 70 % und 100 % höher als der Klimakälteverbrauch von Basel. Dieser Verbrauchsanstieg ist in den wärmeren Jahren etwas geringer und beträgt je nach Solltemperatur von 22 °C, 24 °C bzw. 25.5 °C im wärmsten Jahr der Referenzperiode 20 %, 30 % bzw. 50 % und im warmen Jahr der Periode A1B 30 %, 50 % und 70 %.

4.2.2.3 Erkenntnisse

Zusammenfassend können folgende Aussagen formuliert werden:

- Bezogen auf die Betriebsbedingungen der Klimageräte, haben sowohl der Gerätetyp, die Solltemperatur als auch die Anzahl der gekühlten Räume einen sehr wichtigen Einfluss auf den Verbrauch des Klimagerätes.
- Bei Split-Systemen liegt der Stromverbrauch bei einer Solltemperatur von 24 °C ungefähr halb so hoch wie bei mobilen Kompaktgeräten. Bei einer Solltemperatur von 22 °C kann der Verbrauch um 50-60 % an beiden Klimastandorten reduziert werden. Bei einer Solltemperatur von 24 °C liegt diese Reduktion bei 44-55 % und bei einer Solltemperatur von 25.5 °C bei 40-50 %.
- Der Klimakälteverbrauch in Abhängigkeit der Solltemperatur variiert je nach Klimastandort. Im Klima von Basel führt die Einstellung einer Solltemperatur von 24 °C gegenüber 22 °C zu einer Reduktion des Verbrauchs von 30 bis 60 %. Eine Solltemperatur von 25.5 °C reduziert den Verbrauch zwischen 60 und 90 % im Vergleich zu einer Solltemperatur von 22 °C. Im Klima von Lugano ist die Reduktion des Klimakälteverbrauchs etwas geringer, da allgemein von einem höheren Energieverbrauch ausgegangen wird. Die Einstellung einer Solltemperatur von 24 °C gegenüber 22 °C bewirkt eine Reduktion des Verbrauchs von 20 bis 55 %. Eine Solltemperatur von 25.5 °C reduziert den Verbrauch zwischen 45 und 85 % im Vergleich zu einer Solltemperatur von 22 °C.
- Wird ausschliesslich der Wohnbereich gekühlt, dann kann der Klimakälteverbrauch um 40-45 % reduziert werden im Vergleich zur Kühlung der gesamten Wohnung. Bei einer Kühlung nur bei Belegung ist diese Reduktion etwas kleiner und liegt bei 25-35 %. Bei einer Kühlung der Schlafzimmer ist diese Reduktion etwas höher und liegt bei 50-55 % für eine Kühlung während des ganzen Tages sowie bei 60-75 % bei einer Kühlung nur bei Belegung.
- Eine Kühlung nur bei Belegung der Wohnung führt zu einer Reduktion des Klimakälteverbrauchs von ca. 10-30 % im Vergleich zu einer ganztägigen Kühlung. Bei einer Kühlung des Wohnbereichs ist dieser Unterschied geringer und liegt bei 5-10 %. Bei einer Kühlung der Schlafzimmer ist die Reduktion abhängig vom betrachteten Jahr, von der Solltemperatur und vom Anlagentyp. Bei mobilen Kompaktgeräten wird der Klimakälteverbrauch um 25-55 % reduziert und bei Split-Systemen halbiert sich dieser in fast allen Fällen, vor allem im Klima von Basel. Diese Reduktion ist grösser, da bei einer Kühlung nur bei Belegung in den Schlafzimmern nur nachts gekühlt wird, wenn die Aussen- und Innentemperaturen niedriger sind. Die Sicherstellung der gewünschten Temperatur über den ganzen Tag würde zu einem wesentlich höheren Verbrauch führen.
- Vergleicht man das warme Klima in der Südschweiz, wie z.B. in Lugano, mit einem Schweizer Mittelland Klima, wie z.B. in Basel, so ist der Anstieg des Klimakälteverbrauchs beträchtlich. Je nach eingestellter Solltemperatur erhöht sich der Klimakälteverbrauch für ein Medianjahr um ca. 25-40 %, 55-65 % bzw. 70-110 % bei einer Solltemperatur von 22 °C, 24 °C und 25.5 °C. In den warmen Jahren beider Perioden ist der Anstieg des Stromverbrauchs prozentual betrachtet etwas geringer.
- Durch den Klimawandel steigt der Stromverbrauch in Abhängigkeit von der Solltemperatur und dem Klima unterschiedlich stark an. Bei einer Solltemperatur von 22 °C steigt der Stromverbrauch im Medianjahr der Periode A1B für das Klima in Basel und Lugano um ca. 40-50 % an, wobei der Stromverbrauch im warmen Jahr der Periode A1B sich im Vergleich zum Medianjahr der Referenzperiode verdoppelt. Bei einer Solltemperatur von 24 °C erhöht sich der Stromverbrauch im Medianjahr für beide Standorte um ca. 70-85 % und im warmen Jahr für das Klima in Basel um 50 % und für das Klima in Lugano um 60-85 %. Bei einer Solltemperatur von 25.5 °C erhöht sich der

Verbrauch im Medianjahr um das 2-2.5-fache für das Klima in Basel bzw. das 2.0-2.7-fache für das Klima in Lugano. Im warmen Jahr ist dieser Anstieg im Vergleich zum Medianjahr der Referenzperiode viel höher und liegt bei mehr als das 5-fache für das Klima in Basel bzw. mehr als das 4.5-fache für das Klima in Lugano.

4.2.3 Ergänzende Szenarien

Zwei zusätzliche Szenarien wurden sowohl für das Klima in Basel als auch für das Klima in Lugano analysiert, um die in den Abschnitten 4.2.1 und 4.2.2 erworbenen Erkenntnisse zu konsolidieren. Durch diese zusätzlichen Szenarien konnte die Strombilanz für eine Kühlung während des ganzen Tages mit einer Kühlung, welche nur bei Belegung stattfindet, verglichen werden.

Bei einer 24-Stunden-Kühlung fällt der Grossteil des Stromverbrauchs tagsüber an, d.h. genau dann, wenn auch Strom durch die Photovoltaikanlage erzeugt werden kann.

Im Gegensatz dazu fällt bei einer Kühlung, welche nur bei Belegung aktiviert wird, der Stromverbrauch differenzierter an. Bei der Kühlung der Schlafzimmer fällt der Stromverbrauch nur während der Nacht an, wobei in dieser Zeit kein Strom über die Photovoltaikanlage erzeugt werden kann. Für die Kühlung des Wohnzimmers fällt der Strombedarf wiederum tagsüber an, d.h. dass i.d.R. ein direkter Strombezug aus der Photovoltaikanlage in dieser Zeit möglich ist.

Es stellt sich die Frage, ob die Kühlung während des ganzen Tages zu einem geringeren Stromverbrauch aus dem Netz führen kann, als wenn nur während der Belegungszeit gekühlt wird. Zur Beantwortung dieser Frage wurden zwei zusätzliche Szenarien untersucht.

In beiden Szenarien wurden die Multi-Split-Systeme bei einer Solltemperatur von 24 °C eingestellt (um sicherzustellen, dass die empfundene Temperatur innerhalb des Behaglichkeitsbereichs während der Betriebszeit bleibt) und die gesamte Wohnung gekühlt. Bei einem der Szenarien wurde die gesamte Wohnung während des ganzen Tages gekühlt, beim anderen Szenario wurde die gesamte Wohnung entsprechend der Belegung gekühlt (der Wohnbereich wird von 06:00 bis 21:00 Uhr und die Schlafzimmer von 21:00 bis 06:00 Uhr gekühlt).

Diese Solltemperatur kann als Kompromiss zwischen Komfort und Energieverbrauch betrachtet werden. Sie ermöglicht, dass die empfundene Temperatur den Behaglichkeitsbereich der Norm SIA 180 (SIA, 2014a) einhält, ohne auf eine zu niedrige Temperatur zurückzugreifen.

Zudem wurden die bereits analysierten Szenarien zum Vergleich der ergänzenden Szenarien herangezogen. Zu den bereits analysierten Szenarien gehören dabei das «Worst-Case» Szenario – hier bezeichnet als Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung» – für das Klima in Basel (wie bereits in Abschnitt 4.2.1 untersucht) und in Lugano sowie zwei ergänzende Szenarien mit mobilen Kompaktgeräten bei einer Solltemperatur von 24 °C für die gesamte Wohnung während des ganzen Tages.

Die analysierten Szenarien können daher wie folgt definiert werden:

- Basel – Mobil 22 °C bei Belegung: Mobile Kompaktgeräte. Gesamte Wohnung, Solltemperatur: 22 °C. Kühlung bei Belegung: Wohnbereich von 06:00 bis 21:00 Uhr und Schlafzimmer von 21:00 bis 06:00 Uhr. Klima von Basel.
- Basel – Mobil 24 °C ganzer Tag: Mobile Kompaktgeräte. Gesamte Wohnung, Solltemperatur: 24 °C. Kühlung während des ganzen Tages. Klima von Basel.
- Basel – Split 24 °C ganzer Tag: Multi-Split-System. Gesamte Wohnung, Solltemperatur: 24 °C. Kühlung während des ganzen Tages. Klima von Basel.
- Basel – Split 24 °C bei Belegung: Multi-Split-System. Gesamte Wohnung. Solltemperatur: 24 °C. Kühlung bei Belegung: Wohnbereich von 06:00 bis 21:00 Uhr und Schlafzimmer von 21:00 bis 06:00 Uhr. Klima von Basel.
- Lugano – Mobil 22 °C bei Belegung: Mobile Kompaktgeräte. Gesamte Wohnung, Solltemperatur: 22 °C. Kühlung bei Belegung: Wohnbereich von 06:00 bis 21:00 Uhr und Schlafzimmer von 21:00 bis 06:00 Uhr. Klima von Lugano.
- Lugano – Mobil 24 °C ganzer Tag: Mobile Kompaktgeräte. Gesamte Wohnung, Solltemperatur: 24 °C. Kühlung während des ganzen Tages. Klima von Lugano.
- Lugano – Split 24 °C ganzer Tag: Multi-Split-System. Gesamte Wohnung, Solltemperatur: 24 °C. Kühlung während des ganzen Tages. Klima von Lugano.
- Lugano – Split 24 °C bei Belegung: Multi-Split-System. Gesamte Wohnung, Solltemperatur: 24 °C. Kühlung bei Belegung: Wohnbereich von 06:00 bis 21:00 Uhr und Schlafzimmer von 21:00 bis 06:00 Uhr. Klima von Lugano.

4.2.3.1 Thermische Behaglichkeit

Die Solltemperatur von 24 °C ermöglicht es, die empfundene Temperatur in allen Räumen in den untersuchten Jahren innerhalb des Behaglichkeitsbereichs zu halten. Abbildung 30 und Abbildung 31 stellen die empfundene Temperatur der Szenarien «Basel – Mobil 24 °C bei Belegung» bzw. «Basel – Mobil 24 °C ganzer Tag» dar.

Im Szenario «Basel – Mobil 24 °C ganzer Tag», bei dem die Kühlung den ganzen Tag in Betrieb ist, liegt die empfundene Temperatur viel näher an der Solltemperatur von 24 °C als im Szenario «Basel – Mobil 24 °C bei Belegung». Das liegt daran, dass die Raumtemperatur beim Einschalten der Klimageräte hoch ist und es einige Zeit dauert, bis die gewünschte Temperatur erreicht wird.

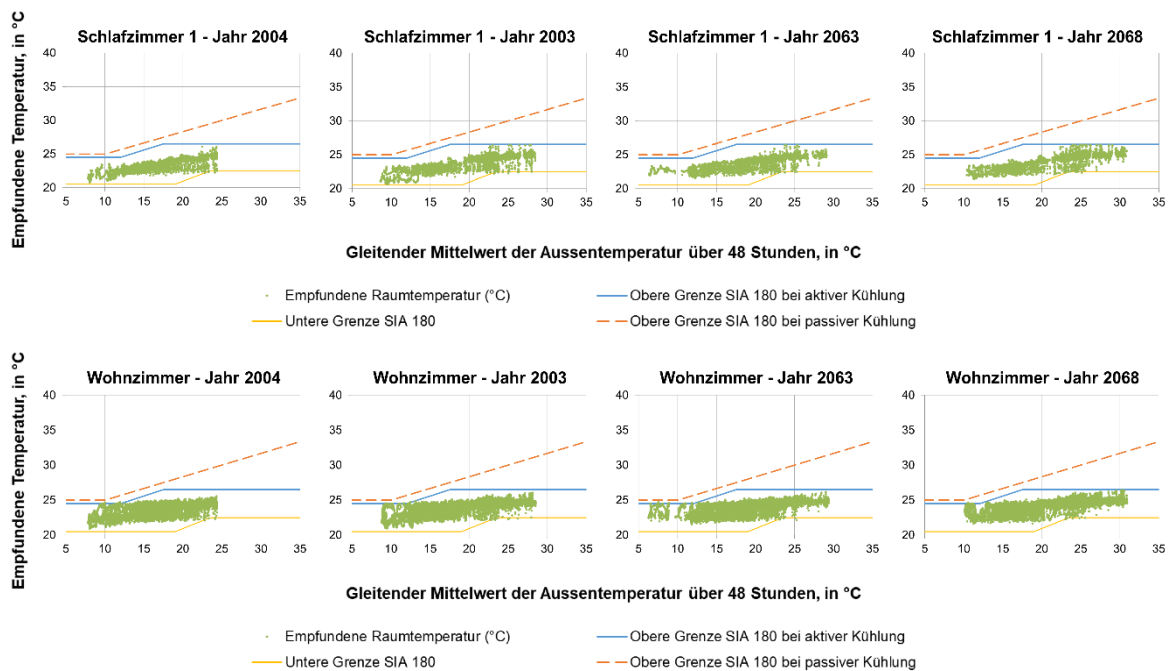


Abbildung 30: Empfundene Temperatur (15-minütiger Wert) im Schlafzimmer 1 (obere Reihe) und Wohnbereich (untere Reihe) im Zeitraum vom 15. April bis zum 16. Oktober für die vier betrachteten Jahre des Szenarios «Basel – Mobil 24 °C bei Belegung». Die Grenzwerlinien stellen den zulässigen Temperaturbereich in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwerts der Aussentemperatur gemäss Norm SIA 180 (SIA, 2014a) dar.

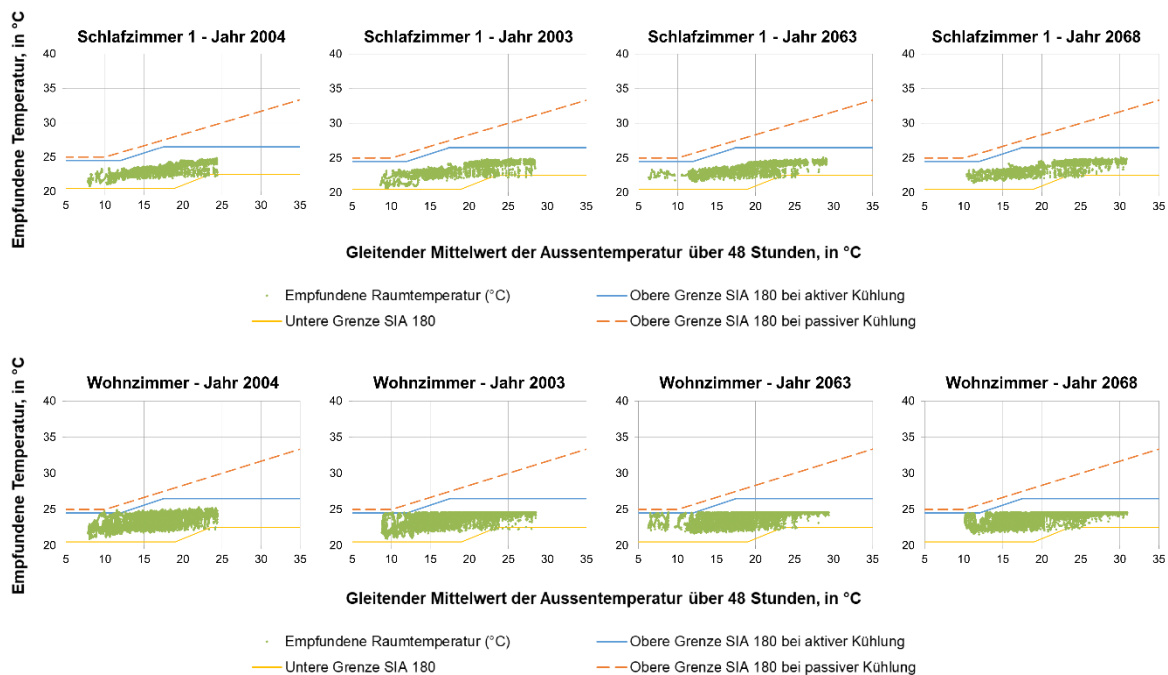


Abbildung 31: Empfundene Temperatur (15-minütiger Wert) im Schlafzimmer 1 (obere Reihe) und Wohnbereich (untere Reihe) im Zeitraum vom 15. April bis zum 16. Oktober für die vier betrachteten Jahre des Szenarios «Basel – Mobil 24 °C ganzer Tag». Die Grenzwerlinien stellen den zulässigen Temperaturbereich in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwerts der Aussentemperatur gemäss Norm SIA 180 (SIA, 2014a) dar.

Die Temperaturverläufe in den verschiedenen Räumen im wärmsten Jahr der Referenzperiode ist für die neuen Szenarien in Abbildung 32 dargestellt. In den Szenarien, in welchen die Kühlung den ganzen Tag in Betrieb ist, wird die empfundene Temperatur bei etwa 24 °C gehalten, wenn keine natürliche Lüftung möglich ist. Werden die Räume belüftet, führt dies zu einer schnellen Reduzierung der Temperatur. In den Szenarien «bei Belegung» wird die gesamte Wohnung entsprechend der Belegung gekühlt. In den Schlafzimmern steigt die Temperatur tagsüber stark an. Dabei schwankt die Temperatur im Wohnbereich weniger stark als die Temperatur im Schlafzimmer. Dies ist damit zu begründen, dass es während der Nacht nicht zu solaren Wärmeeinträgen, zu weniger Wärmeeinträgen durch Geräte und zu keinen Wärmeeinträgen durch Personen (keine Belegung) im Wohnbereich kommt.

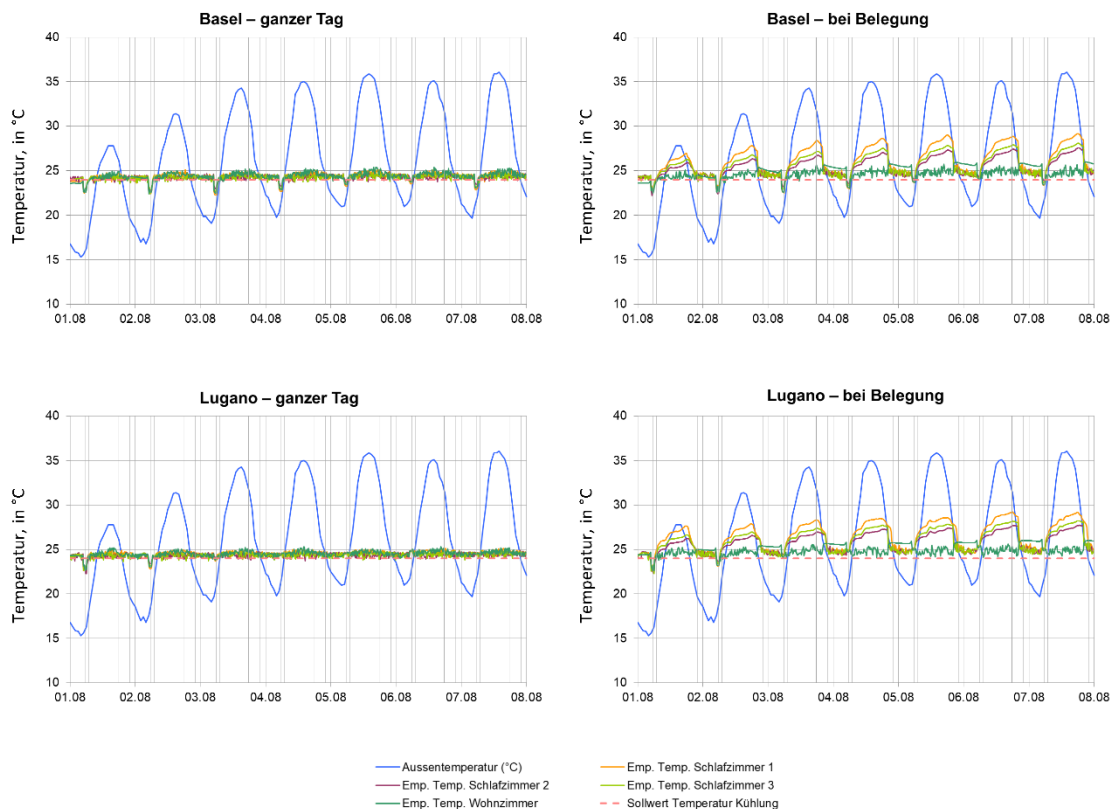


Abbildung 32: Aussentemperatur und empfundene Temperatur in den unterschiedlichen Räumen während einer besonders warmen Woche vom 1. August bis 8. August des wärmsten Jahres der Referenzperiode (2003). Die vertikalen, hellgrauen Linien entsprechen den Zeiträumen mit natürlicher Lüftung. Szenario 1 wurde nicht erfasst, da der Temperaturverlauf demjenigen des Referenz Szenarios sehr ähnlich ist.

4.2.3.2 Klimakältebedarf und –verbrauch

Die Ergebnisse in Bezug auf den Klimakältebedarf und –verbrauch sind in Tabelle 19, Abbildung 33 und Abbildung 34 dargestellt.

Im Klima von Basel beträgt der Klimakältebedarf für das Szenario «Basel – Mobil 22 °C bei Belegung» im Medianjahr der Referenzperiode und der Periode A1B 15.3 kWh/(m²a) bzw. 19.9 kWh/(m²a). Dieser Klimakältebedarf steigt im warmen Jahr der Periode A1B auf 26.8 kWh/(m²a) an. Durch eine Solltemperatur von 24 °C (statt 22 °C) und einer ganztägigen Kühlung (statt einer Kühlung nur bei Belegung) mit Kompaktgeräten, wie im «Basel – Mobil 24 °C ganzer Tag», reduziert sich der Klimakältebedarf je nach untersuchtem Jahr um 20 bis 50 %. Im Szenario «Basel – Mobil 24 °C ganzer Tag», bei dem ein Multi-Split-System (anstatt von Kompaktgeräten) unter den gleichen Bedingungen berücksichtigt wurde, reduziert sich der Klimakältebedarf je nach untersuchtem Jahr ebenso um 20 bis 50 % im Vergleich zum Szenario «Basel – Mobil 22 °C bei Belegung». Der Klimakältebedarf kann unter den zuvor beschriebenen Betriebsbedingungen zusätzlich um 10-15 % reduziert werden, wenn die Kühlung nur bei Belegung stattfindet (Szenario «Basel – Mobil 24 °C bei Belegung»). Der Klimakältebedarf für das Szenario «Basel – Mobil 24

°C bei Belegung» liegt im Medianjahr der Referenzperiode und der Periode A1B bei 5.6 kWh/(m²a) bzw. 9.4 kWh/(m²a) und erhöht sich im warmen Jahr der Periode A1B auf 16.8 kWh/(m²a).

Im Klima von Lugano beträgt der Klimakältebedarf für das Szenario «Lugano – Mobil 22 °C bei Belegung» im Medianjahr der Referenzperiode und der Periode A1B 19.4 kWh/(m²a) bzw. 24.5 kWh/(m²a). Im warmen Jahr der Periode A1B steigt der Klimakältebedarf auf 30.2 kWh/(m²a) an. In den Szenarien «Lugano – Mobil 24 °C ganzer Tag» und «Lugano – Mobil 24 °C bei Belegung» ist die Reduzierung des Klimakältebedarfs geringer als am Standort Basel und liegt je nach untersuchtem Jahr um 5 bis 40 % tiefer. Der Klimakältebedarf sinkt um 15-20 %, wenn die Kühlung nur bei Belegung stattfindet (Szenario «Lugano – Mobil 24 °C bei Belegung»). Der Klimakältebedarf für das Szenario «Basel – Mobil 24 °C bei Belegung» liegt im Medianjahr der Referenzperiode und der Periode A1B bei 5.6 kWh/(m²a) bzw. 9.4 kWh/(m²a). Im warmen Jahr der Periode A1B steigt der Klimakältebedarf auf 16.8 kWh/(m²a) an.

Im Klima von Basel beträgt der Stromverbrauch für die Kühlung für das Szenario «Basel – Mobil 22 °C bei Belegung» im Medianjahr der Referenzperiode und der Periode A1B 7.9 kWh/(m²a) bzw. 10.9 kWh/(m²a). Dieser Klimakältebedarf erhöht sich auf 15.6 kWh/(m²a) im warmen Jahr der Periode A1B. Im Szenario «Basel – Mobil 24 °C ganzer Tag» reduziert sich der Stromverbrauch für die Kühlung je nach untersuchtem Jahr um 25-50 % im Vergleich zum «Worst-Case-Szenario». Im Medianjahr der Referenzperiode und der Periode A1B beträgt der Klimakälteverbrauch 3.8 kWh/(m²a) bzw. 7.2 kWh/(m²a). Im Szenario «Basel – Split 24 °C ganzer Tag» reduziert sich der Stromverbrauch für die Kühlung je nach untersuchtem Jahr um 60-80 % im Vergleich zum «Worst-Case-Szenario». Im Medianjahr der Referenzperiode und der Periode A1B beträgt der Klimakälteverbrauch 1.8 kWh/(m²a) bzw. 3.2 kWh/(m²a).

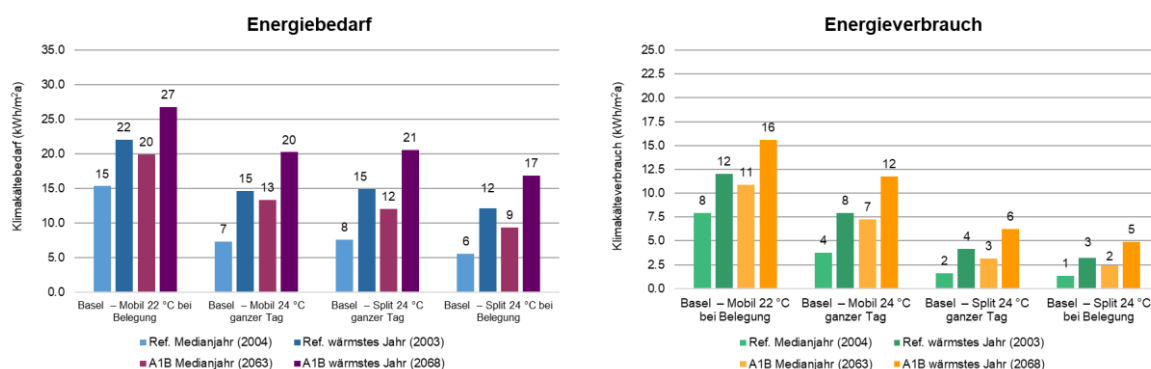
Der Klimakälteverbrauch im Klima von Lugano ist 20-30 % höher als im Klima von Basel. Im Klima von Lugano beträgt der Stromverbrauch für die Kühlung für das Szenario «Lugano – Mobil 22 °C bei Belegung» im Medianjahr der Referenzperiode und der Periode A1B 10.2 kWh/(m²a) bzw. 13.6 kWh/(m²a) und steigt auf 20.3 kWh/(m²a) im warmen Jahr der Periode A1B an. Im Szenario «Lugano – Mobil 24 °C ganzer Tag» reduziert sich der Stromverbrauch für die Kühlung je nach untersuchtem Jahr um 20-40 % im Vergleich zum «Worst-Case-Szenario». Im Medianjahr der Referenzperiode und der Periode A1B beträgt der Klimakälteverbrauch 6.1 kWh/(m²a) bzw. 10.0 kWh/(m²a). Im Szenario «Lugano – Split 24 °C ganzer Tag» ist die Reduzierung des Stromverbrauchs für die Kühlung etwas geringer als im analogen Szenario für das Klima in Basel. Im Vergleich zum «Worst-Case-Szenario» sinkt der Stromverbrauch um 55-70 % je nach untersuchtem Jahr. Im Medianjahr der Referenzperiode und der Periode A1B beträgt der Klimakälteverbrauch 2.8 kWh/(m²a) bzw. 5.0 kWh/(m²a) und steigt auf 8.8 kWh/(m²a) im warmen Jahr der Periode A1B.

Die Kühlung während der Belegungszeit ermöglicht sowohl im Klima von Basel als auch im Klima von Lugano eine Reduzierung des Klimakälteverbrauchs von 20 %, verglichen mit einer Kühlung während des ganzen Tages (Szenarien «bei Belegung» im Vergleich zu den Szenarien «ganzer Tag» mit Multi-Split-Systemen). Der Stromverbrauch für die Kühlung variiert zwischen 1.3 kWh/(m²a) und 2.4 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel und zwischen 2.1 kWh/(m²a) und 3.8 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Lugano.

		Mobil 22 °C bei Belegung				Mobil 24 °C ganzer Tag				Split 24 °C ganzer Tag				Split 24 °C bei Belegung			
		Bed. (kWh/m ² a)	Leist. Bed. (W/m ²)	Verb. (kWh/m ² a)	elek. Leist. (kW/m ²)	Bed. (kWh/m ² a)	Leist. Bed. (W/m ²)	Verb. (kWh/m ² a)	elek. Leist. (kW/m ²)	Bed. (kWh/m ² a)	Leist. Bed. (W/m ²)	Verb. (kWh/m ² a)	elek. Leist. (kW/m ²)	Bed. (kWh/m ² a)	Leist. Bed. (W/m ²)	Verb. (kWh/m ² a)	elek. Leist. (kW/m ²)
BASEL	Ref. Medianjahr (2004)	15.3	46.7	7.9	24.6	7.3	81.8	3.8	38.9	7.6	50.1	1.8	17.5	5.6	23.7	1.3	8.7
	Ref. wärmstes Jahr (2003)	22.0	46.7	12.0	24.6	14.6	81.8	7.9	38.9	14.9	77.3	4.2	36.6	12.1	28.6	3.2	15.4
	A1B Medianjahr (2063)	19.9	46.7	10.9	24.6	13.3	81.8	7.2	38.9	12.0	65.2	3.2	29.8	9.4	29.7	2.4	14.6
	A1B warmes Jahr (2068)	26.8	46.7	15.6	24.6	20.2	81.8	11.8	38.9	20.6	77.1	6.2	36.8	16.8	32.5	4.9	18.3
LUGANO	Ref. Medianjahr (2004)	19.4	46.7	10.2	24.6	11.6	81.8	6.1	38.9	11.9	41.5	2.8	14.7	9.2	23.1	2.1	8.4
	Ref. wärmstes Jahr (2003)	25.9	46.7	14.1	24.6	18.7	81.8	10.1	38.9	19.6	53.7	5.3	21.2	15.7	30.0	4.1	13.1
	A1B Medianjahr (2063)	24.5	46.7	13.6	24.6	17.9	81.8	10.0	38.9	18.7	71.0	5.0	28.4	14.8	29.0	3.9	12.5
	A1B warmes Jahr (2068)	30.2	46.7	20.3	24.6	28.5	81.8	16.4	38.9	28.8	74.5	8.8	33.3	24.2	31.6	7.2	15.6

Tabelle 19: Klimakältebedarf, Klimakälteleistungsbedarf, Stromverbrauch und elektrische Leistung für Klimakälte der untersuchten Szenarien in den simulierten Jahren.

Basel



Lugano

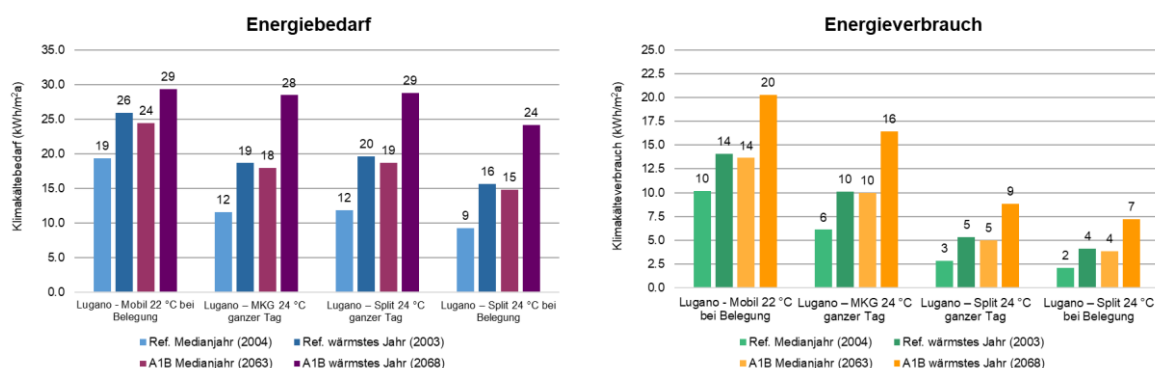


Abbildung 33: Links: Klimakältebedarf der untersuchten Szenarien in den simulierten Jahren an den Standorten Basel (oben) und Lugano (unten). Rechts: Klimakälteverbrauch der untersuchten Szenarien in den simulierten Jahren an den Standorten Basel (oben) und Lugano (unten).

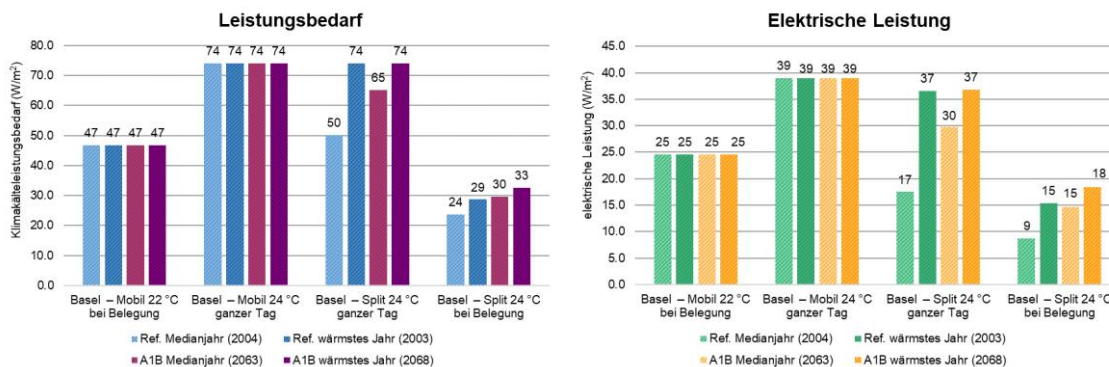
Abbildung 34 zeigt, dass die Szenarien mit einer 24-Stunden-Kühlung einen höheren Klimakälteleistungsbedarf als die Szenarien «Mobil 22 °C bei Belegung» haben. Das liegt daran, dass die gesamte Wohnung gleichzeitig gekühlt wird (im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung» erfolgt keine gleichzeitige Kühlung von Wohnbereich und Schlafzimmern). In den Szenarien, bei denen die Kühlung entsprechend der Belegung erfolgt, ist der Klimakälteleistungsbedarf geringer.

In den Szenarien «Mobil 22 °C bei Belegung» und «Mobil 24 °C ganzer Tag» arbeiten die mobilen Kompaktgeräte ausschliesslich unter Volllast, sodass der Leistungsbedarf am Standort Basel als auch am Standort Lugano gleichauf liegt. Bei einer Belegung wird für den Kühlbetrieb in den Schlafzimmern eine maximale Leistung von 6 kW benötigt, was einem Klimakälteleistungsbedarf von 47 W/m² entspricht. Eine

ganztägige Kühlung benötigt zu bestimmten Zeiten die maximal installierte Leistung von 9.5 kW, was einem Klimakälteleistungsbedarf von 74 W/m² entspricht. Multi-Split-Systeme arbeiten nicht ständig unter Volllast, sodass die maximal installierte Leistung nur in einigen Jahren erreicht wird, und zwar in den warmen Jahren der Referenzperiode und der Periode A1B am Standort Basel als auch für das warme Jahr der Periode A1B am Standort Lugano. Am Standort von Lugano ist deutlich erkennbar, dass der Leistungsbedarf für die Kühlung der Wohnung während des ganzen Tages in der zukünftigen Periode A1B viel höher liegt als in der Referenzperiode (im Medianjahr um 70 % und im warmen Jahr um 40 %).

Bezogen auf die elektrische Leistung benötigen die Szenarien «ganzer Tag» in den meisten Fällen eine höhere Leistung als die Szenarien «Mobil 22 °C bei Belegung», da die gesamte Wohnung als gleichzeitig gekühlt angenommen wird (analog Klimakälteleistungsbedarf). Bei Multi-Split-Systemen liegt die elektrische Leistung für die Kühlung in den Szenarien «ganzer Tag» fast immer 50 % höher als für die Szenarien «bei Belegung».

Basel



Lugano

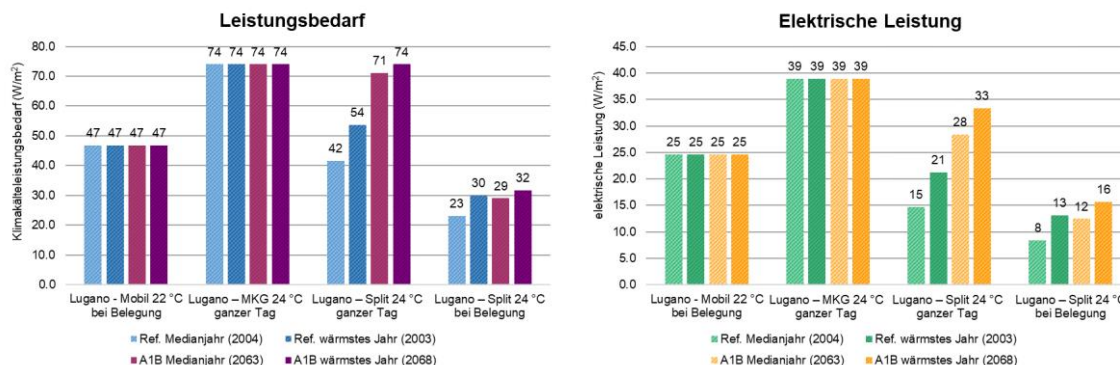


Abbildung 34: Links: Klimakältebedarf der untersuchten Szenarien in den simulierten Jahren an den Standorten Basel (oben) und Lugano (unten). Rechts: Klimakälteverbrauch der untersuchten Szenarien in den simulierten Jahren an den Standorten Basel (oben) und Lugano (unten).

4.2.3.3 Potenzial einer Photovoltaikanlage ohne und mit Batteriespeicher

Um zu analysieren, inwieweit eine Photovoltaikanlage den Stromverbrauch für Kühlung (PV mit einer Leistung von 10 W/m²_{EBF}) und den Stromverbrauch für Kühlung, Geräte und Beleuchtung (PV mit einer Leistung von 30 W/m²_{EBF}) decken kann, wurden die nachfolgenden vier Optionen untersucht:

- Stromverbrauch für Kühlung:
 - Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von 10 W/m²_{EBF} nach MuKE (EnDK, 2018a) dimensioniert wurde.
 - Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von 10 W/m²_{EBF} nach MuKE (EnDK, 2018a) dimensioniert und durch eine Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage ergänzt wurde.

- Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ nach MuKE (EnDK, 2018a) dimensioniert und durch eine Batterie mit einer Kapazität von $1/333$ der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage ergänzt wurde.
- Stromverbrauch für Kühlung, Geräte und Beleuchtung:
 - Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert wurde.
 - Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert und durch eine Batterie mit einer Kapazität von $1/1'000$ der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage ergänzt wurde.
 - Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert und durch eine Batterie mit einer Kapazität von $1/333$ der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage ergänzt wurde.

Abbildung 35 zeigt den Stromverbrauch für die Kühlung der verschiedenen Szenarien im positiven Teil der y-Achse. Ein Teil davon ist durch den von der Photovoltaikanlage erzeugten Strom (blauer Balken) gedeckt, der Rest wird aus dem Netz (grüner Balken) bezogen. Der von der Photovoltaikanlage erzeugte Strom ist mit einer gelb gestrichelten Linie gekennzeichnet. Der von der Photovoltaikanlage erzeugte und ins Netz eingespeiste Strom wird durch den gelben Balken dargestellt, welcher mit negativen Werten gekennzeichnet ist. Der Prozentsatz stellt den Anteil des Stromverbrauchs für die Kühlung dar, der durch den direkten Verbrauch des von der Photovoltaikanlage erzeugten elektrischen Stroms gedeckt wird.

Der prozentuale Anteil des Stromverbrauchs (Abbildung 35), der durch den direkten Verbrauch des von der Photovoltaikanlage erzeugten Stroms gedeckt wird, ist für das Klima von Basel und Lugano sehr ähnlich. Die höhere Solarproduktion in Lugano gleicht den höheren Kälteverbrauch in diesem Klima aus.

Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ nach MuKE (EnDK, 2018a) dimensioniert wurde (Abbildung 35), ermöglicht bei einer Kühlung mit Kompaktgeräten nur bei Belegung und einer Solltemperatur von 22°C einen Eigenverbrauch von 20 % des Stromverbrauchs der Kühlung in beiden «Mobil 22°C bei Belegung» Szenarien, d.h. für das Klima an den Standorten Basel und Lugano. Bei einer Solltemperatur von 24°C (statt 22°C) und einer ganztägigen Kühlung (statt einer Kühlung nur bei Belegung) mit Kompaktgeräten wie im Szenario «Basel – Mobil 24°C ganzer Tag» kann die Photovoltaikanlage zwischen 25 und 40 % des Stromverbrauchs für die Kühlung decken. In den Szenarien mit Multi-Split-Systemen «Split 24°C ganzer Tag» deckt die Photovoltaikanlage je nach untersuchtem Jahr zwischen 45 und 70 % des Stromverbrauchs für die Kühlung ab. Während in den Szenarien «Split 24°C bei Belegung» die Photovoltaikanlage je nach untersuchtem Jahr zwischen 45 und 65 % des Stromverbrauchs für die Kühlung deckt.

Obwohl die Szenarien mit Kühlung bei Belegung einen geringeren elektrischen Verbrauch haben, ist der Anteil des Eigenverbrauchs geringer. Das liegt daran, dass in den Szenarien, in denen während des ganzen Tages gekühlt wird, die Kühlung hauptsächlich dann in Betrieb ist, wenn die Photovoltaikanlage Strom erzeugt. Im Gegensatz dazu werden die Schlafzimmer in den Szenarien «bei Belegung» nur nachts gekühlt.

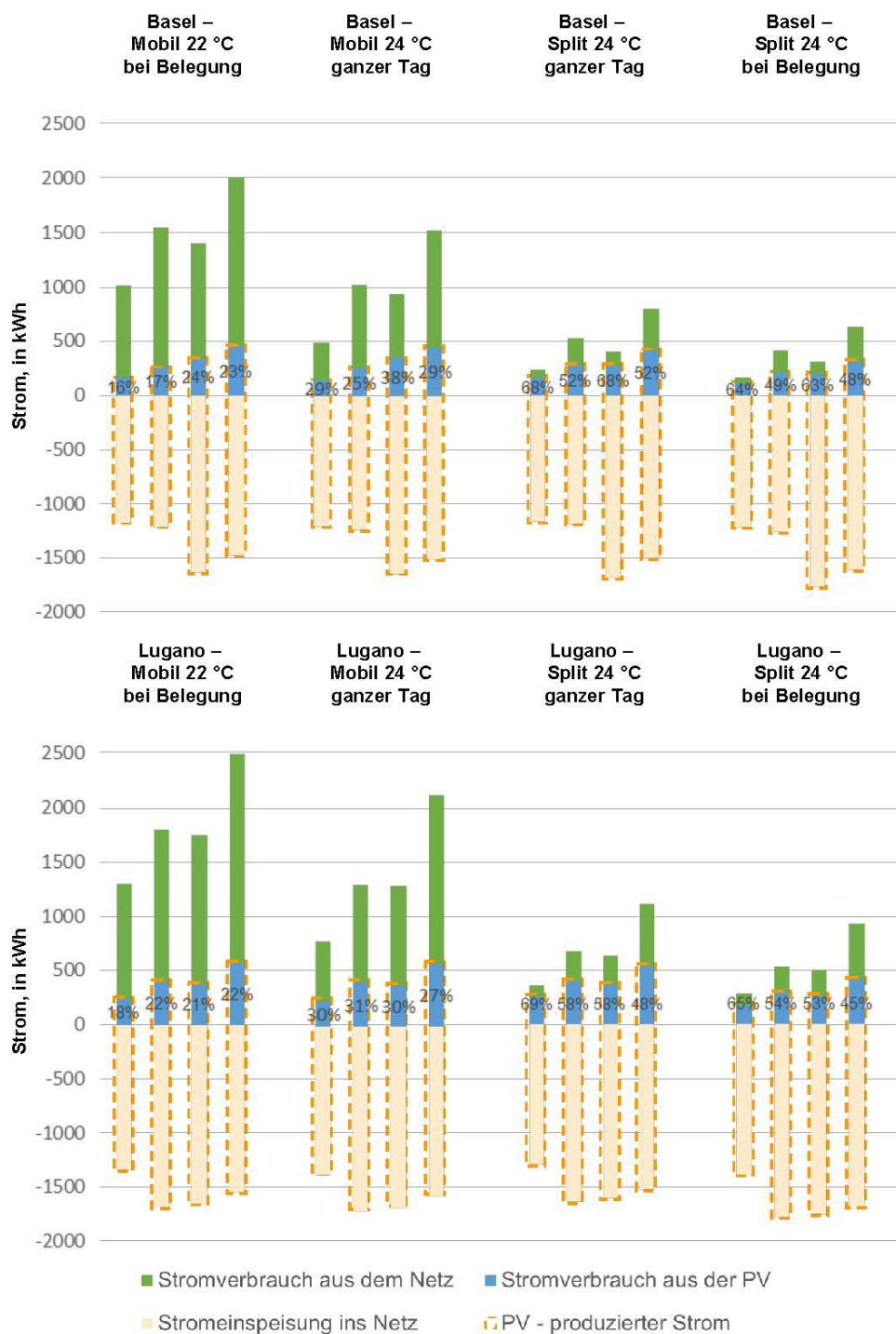


Abbildung 35: Jährliche Strombilanz zwischen dem von der Photovoltaikanlage erzeugten Strom und dem Stromverbrauch für die Kühlung einer nach MuKEn (EnDK, 2018a) dimensionierten Photovoltaikanlage für das Klima in Basel (oben) und Lugano (unten). Die Spalten für jedes Szenario entsprechen den Ergebnissen für die vier untersuchten Jahre in der folgenden Reihenfolge: Referenz Medianjahr (2004), Referenz wärmstes Jahr (2003), A1B Medianjahr (2063) und A1B warmes Jahr (2068). Der Prozentsatz stellt den Anteil des Stromverbrauchs für die Kühlung dar, der durch den direkten Verbrauch des von der Photovoltaikanlage erzeugten elektrischen Stroms gedeckt wird.

Abbildung 36 zeigt den Stromverbrauch für die Kühlung der verschiedenen Szenarien im positiven Teil der y-Achse. Ein Teil davon ist durch den von der Photovoltaikanlage erzeugten Strom (blauer Balken) gedeckt, ein anderer Teil ist durch den von der Batterie gespeicherten Strom (violetter Balken) gedeckt. Der Rest wird aus dem Netz (grüner Balken) bezogen. Der von der Photovoltaikanlage erzeugte Strom ist mit einer gelb gestrichelten Linie gekennzeichnet. Der von der Photovoltaikanlage erzeugte und ins Netz eingespeiste Strom wird durch den gelben Balken dargestellt, welcher mit negativen Werten gekennzeichnet ist. Der Prozentsatz stellt den Anteil des Stromverbrauchs für die Kühlung dar, welcher durch den direkten Verbrauch des von der Photovoltaikanlage erzeugten elektrischen Stroms und des in der Batterie gespeicherten Stroms gedeckt wird.

Durch die Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage – mit einer Kapazität von 1.5 kWh – (Abbildung 36) erhöht sich der Anteil des Eigenverbrauchs um 15-25 % bei einer Kühlung mit Kompaktgeräten und um 10 % bei einer Kühlung mit Multi-Split-Systemen im Vergleich zur gleichen Installation ohne Batterie. In den Szenarien «Mobil 22 °C bei Belegung» deckt die Photovoltaikanlage je nach untersuchtem Jahr zwischen 15 und 25 % des Stromverbrauchs für die Kühlung mit Kompaktgeräten ab. Durch die Batterie kann dieser Anteil auf 35 bzw. 45 % des gesamten Stromverbrauchs der Photovoltaikanlage erhöht werden. Bei einer Solltemperatur von 24 °C (statt 22 °C) und einer ganztägigen Kühlung (statt einer Kühlung nur bei Belegung) mit Kompaktgeräten wie im Szenario «Basel – Mobil 24 °C ganzer Tag» deckt die Photovoltaikanlage je nach untersuchtem Jahr zwischen 25 und 40 % des Stromverbrauchs für die Kühlung ab. Die Batterie erhöht diesen Anteil auf 40 bzw. 60 % des gesamten Stromverbrauchs der Photovoltaikanlage.

In den Szenarien mit Multi-Split-Systemen «MMS 24 °C ganzer Tag» und «MMS 24 °C bei Belegung» in dem Klima von Basel sowie Lugano deckt die Photovoltaikanlage, je nach untersuchtem Jahr, zwischen 55 und 80 % des Stromverbrauchs für die Kühlung ab. In diesen Szenarien ist der Stromverbrauch über die Batterie somit sehr gering, da der Stromverbrauch für die Kühlung auch gering ist. Die Installation einer Batterie ist daher unter dem reinen Aspekt der Kühlung nicht sinnvoll.

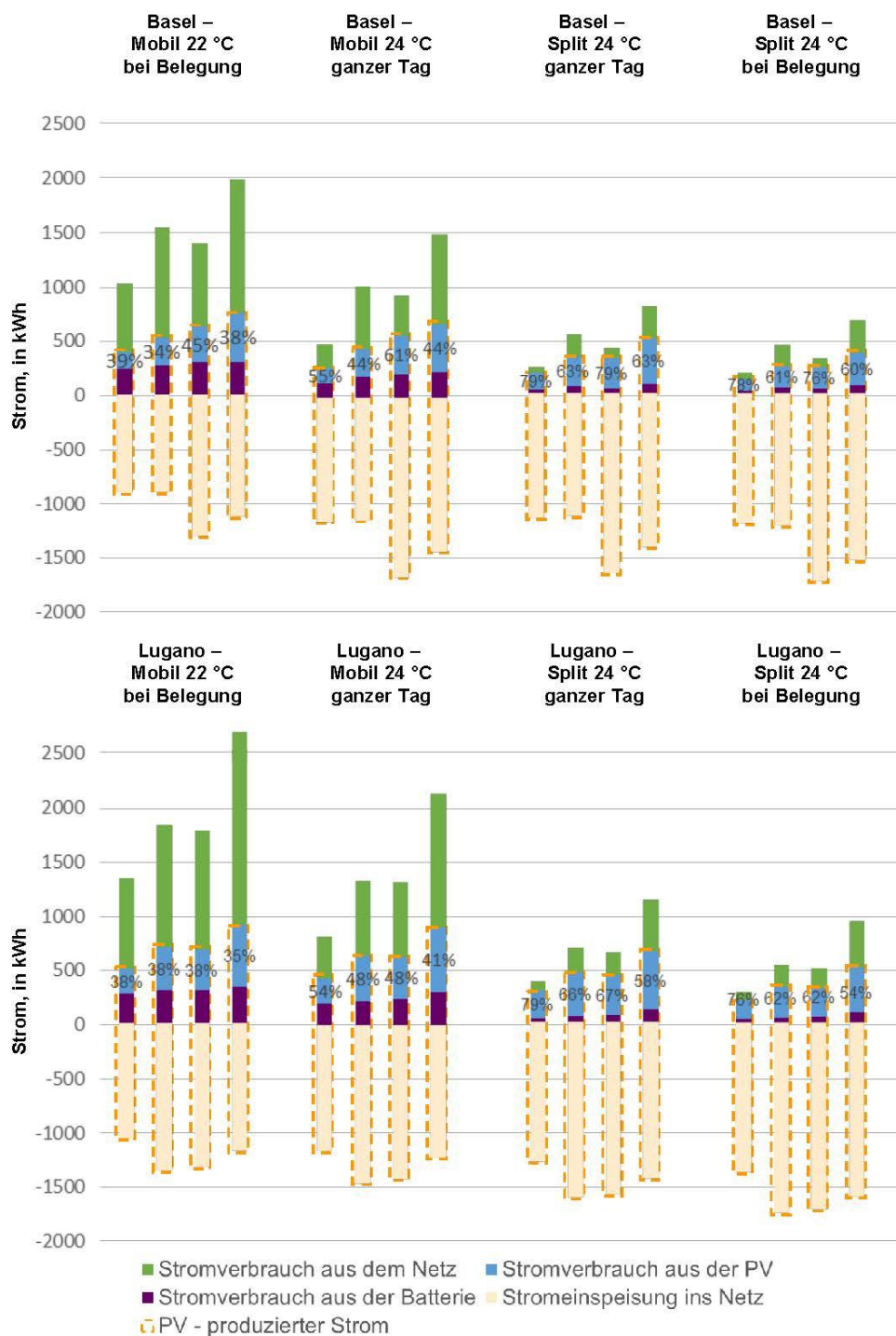


Abbildung 36: Jährliche Strombilanz zwischen dem von der Photovoltaikanlage erzeugten Strom und dem Stromverbrauch für die Kühlung einer nach MuKEn (EnDK, 2018a) dimensionierten Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1.5 kWh (1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage) für das Klima in Basel (oben) und Lugano (unten). Die Spalten für jedes Szenario entsprechen den Ergebnissen für die vier untersuchten Jahre in der folgenden Reihenfolge: Referenz Medianjahr (2004), Referenz wärmstes Jahr (2003), A1B Medianjahr (2063) und A1B warmes Jahr (2068). Der Prozentsatz stellt den Anteil des Stromverbrauchs für die Kühlung dar, der durch den direkten Verbrauch des von der Photovoltaikanlage erzeugten elektrischen Stroms und in der Batterie gespeicherte Strom gedeckt wird.

Durch die Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer dreimal grösseren Kapazität – mit einer Kapazität von 4.5 kWh – (Abbildung 37) erhöht sich der Anteil des Eigenverbrauchs zwischen 7 % und 15 %. Bei einer Kühlung mit Kompaktgeräten erhöht sich der Anteil des Eigenverbrauchs zwischen 20 % und 40 % und bei einer Kühlung mit Multi-Split-Systemen um 20-25 % im Vergleich zur gleichen Installation ohne Batterie.

In den Szenarien «Mobil 22 °C bei Belegung» deckt die Kombination der Photovoltaikanlage mit Batterie je nach untersuchtem Jahr zwischen 40 % und 55 % des Stromverbrauchs für die Kühlung mit Kompaktgeräten. Bei einer Solltemperatur von 24 °C (statt 22 °C) und einer ganztägigen Kühlung (statt

einer Kühlung nur bei Belegung) mit Kompaktgeräten wie im Szenario «Basel – Mobil 24 °C ganzer Tag» liegt dieser Anteil zwischen 50 % und 70 %. In den Szenarien mit Multi-Split-Systemen «MMS 24 °C ganzer Tag» und «MMS 24 °C bei Belegung» am Standort Basel sowie Lugano deckt diese Kombination, je nach untersuchtem Jahr, zwischen 60 % und 90 % des Stromverbrauchs für die Kühlung ab.

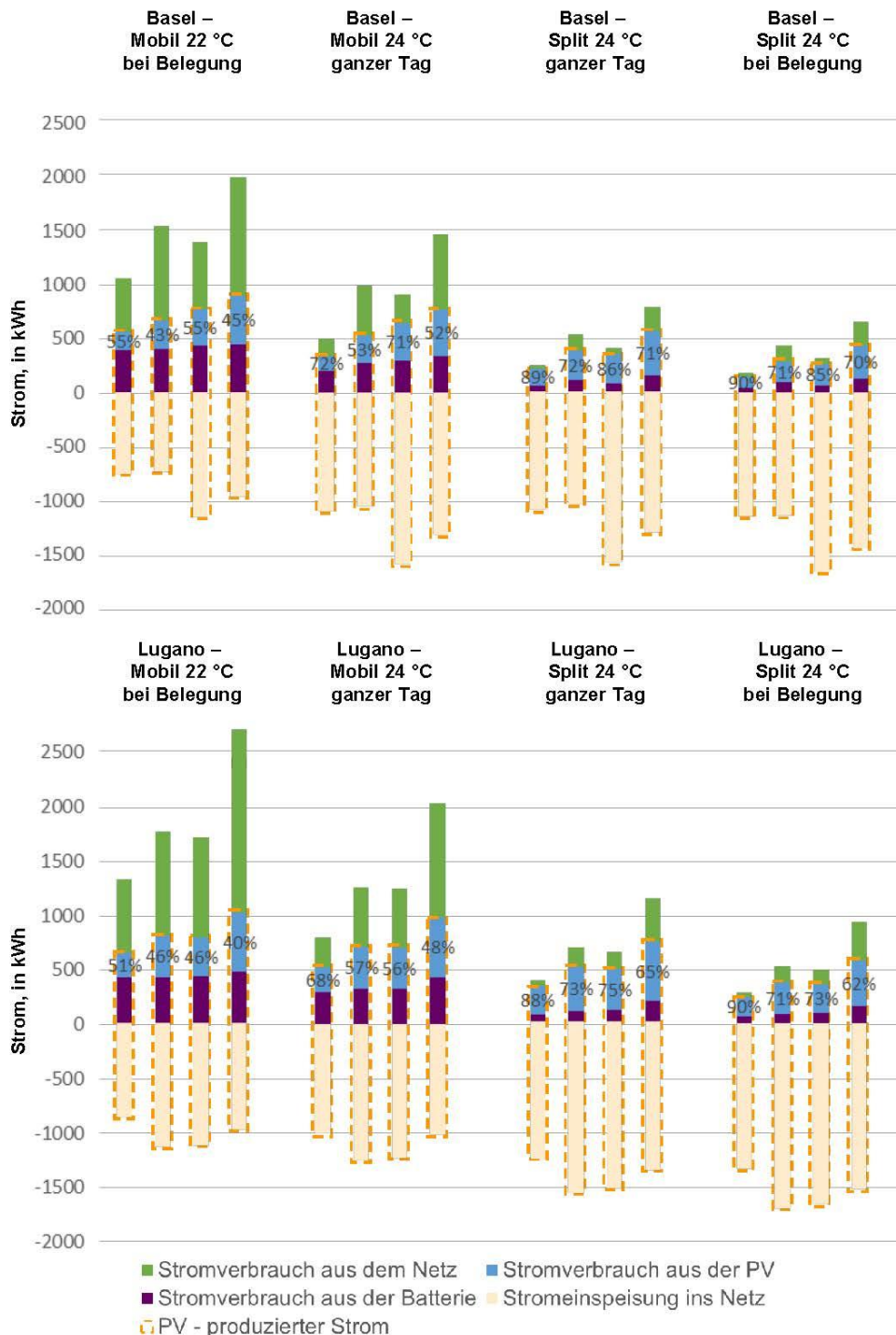


Abbildung 37: Jährliche Strombilanz zwischen dem von der Photovoltaikanlage erzeugten Strom und dem Stromverbrauch für die Kühlung einer nach MuKE (EnDK, 2018a) dimensionierten Photovoltaikanlage mit einer Kapazität von 4.5 kWh (1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage) für das Klima in Basel (oben) und Lugano (unten). Die Spalten für jedes Szenario entsprechen den Ergebnissen für die vier untersuchten Jahre in der folgenden Reihenfolge: Referenz Median-jahr (2004), Referenz wärmstes Jahr (2003), A1B Medianjahr (2063) und A1B warmes Jahr (2068). Der Prozentsatz stellt den Anteil des Stromverbrauchs für die Kühlung dar, der durch den direkten Verbrauch des von der Photovoltaikanlage erzeugten elektrischen Stroms und in der Batterie gespeicherten Stroms gedeckt wird.

Zudem wurde untersucht inwieweit eine grössere Photovoltaikanlage (Abbildung 38), dimensioniert mit einer Leistung von 30 W/m²_{EBF}, den elektrischen Verbrauch für Kühlung, Geräte und Beleuchtung zusätz-

lich decken kann. Wie in Abschnitt 4.2.1.3 erwähnt, beträgt der Stromverbrauch für die Geräte und Beleuchtung ca. 18.4 kWh/(m²a), was höher ist als der Verbrauch des Szenarios «Basel – Mobil 22 °C bei Belegung» im warmen Jahr der Periode A1B (15.6 kWh/(m²a)) und viel höher als der Stromverbrauch der anderen Szenarien, insbesondere der Szenarien mit Multi-Split-Systemen.

In allen untersuchten Szenarien lässt sich mit dieser Konstellation zwischen 30 und 45 % des elektrischen Verbrauchs für Kühlung, Geräte und Beleuchtung decken. Die Ähnlichkeit zwischen allen Szenarien ist darauf zurückzuführen, dass der Stromverbrauch der Geräte und der Beleuchtung in allen Szenarien praktisch gleich ist. Wie erwähnt ist dieser Verbrauch in allen Szenarien höher als der Klimakälteverbrauch, insbesondere in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen («Split 24°C ganzer Tag» und «Split 24°C bei Belegung»).

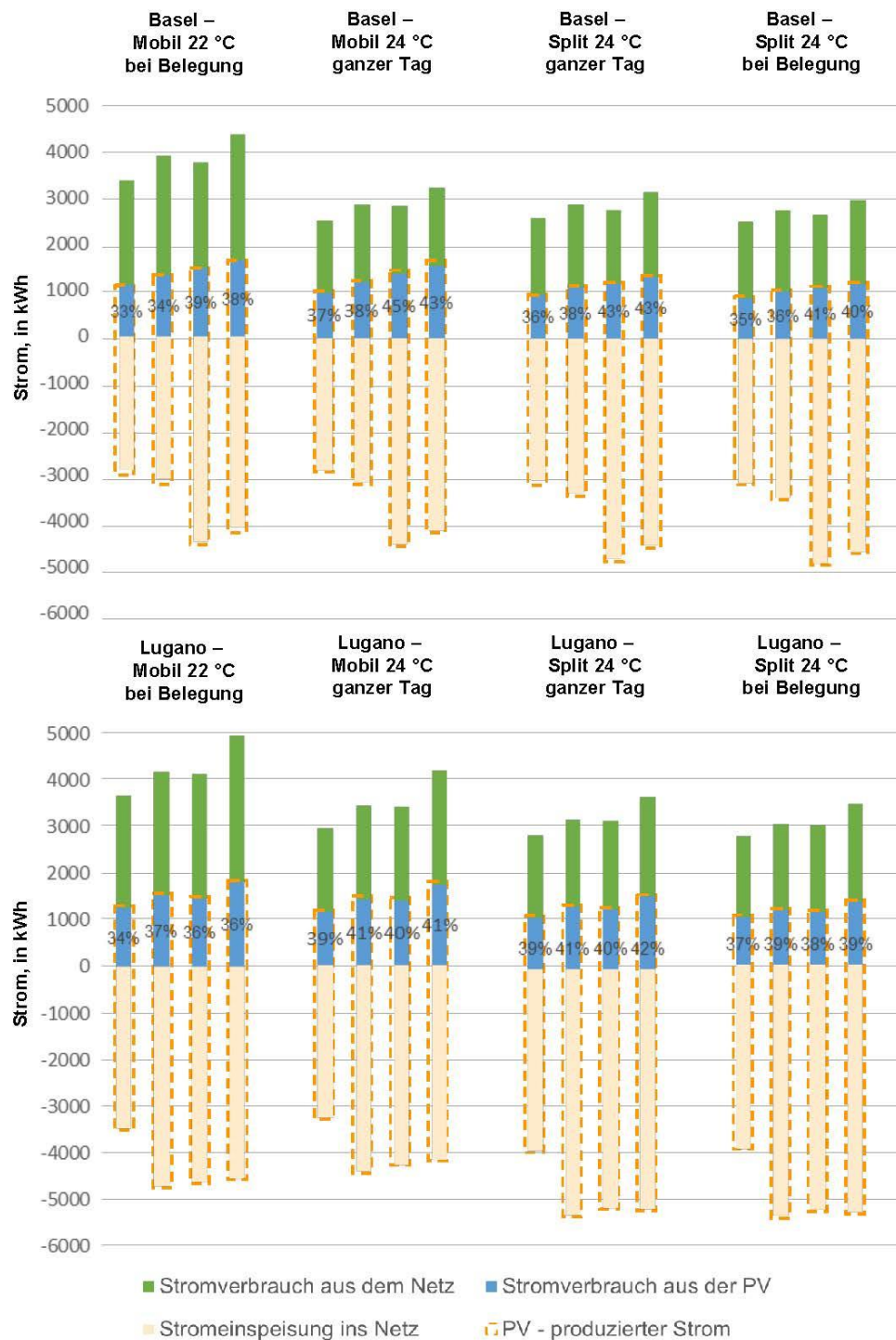


Abbildung 38: Jährliche Strombilanz zwischen dem von der Photovoltaikanlage erzeugten Strom und dem Stromverbrauch für die Kühlung, Geräte und Beleuchtung mit einer Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 30 W/m²_{EBF} für das Klima in Basel (oben) und Lugano (unten). Die Spalten für jedes Szenario entsprechen den Ergebnissen für die vier untersuchten Jahre in der folgenden Reihenfolge: Referenz Medianjahr (2004), Referenz wärmstes Jahr (2003), A1B Medianjahr (2063) und A1B warmes Jahr (2068). Der Prozentsatz stellt den Anteil des Stromverbrauchs für die Kühlung dar, der durch den direkten Verbrauch des von der Photovoltaikanlage erzeugten elektrischen Stroms gedeckt wird.

Durch die Verbindung der Photovoltaikanlage mit einer Batterie – mit einer Kapazität von 4.5 kWh – (Abbildung 39) erhöht sich der Anteil des Eigenverbrauchs in allen Szenarien in einem ähnlichen Verhältnis, um etwa 10 %. Diese Konstellation deckt etwa 40-55 % des Gesamtverbrauchs ab.

Durch die Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer dreimal grösseren Kapazität – mit einer Kapazität von 13.5 kWh – (Abbildung 40) erhöht sich der Anteil des Eigenverbrauchs zwischen 10 % und 25 % und zwischen 20 % und 35 % im Vergleich zur gleichen Installation ohne Batterie. Diese Kombination deckt zwischen 55 % und 75 % des Gesamtverbrauchs ab.

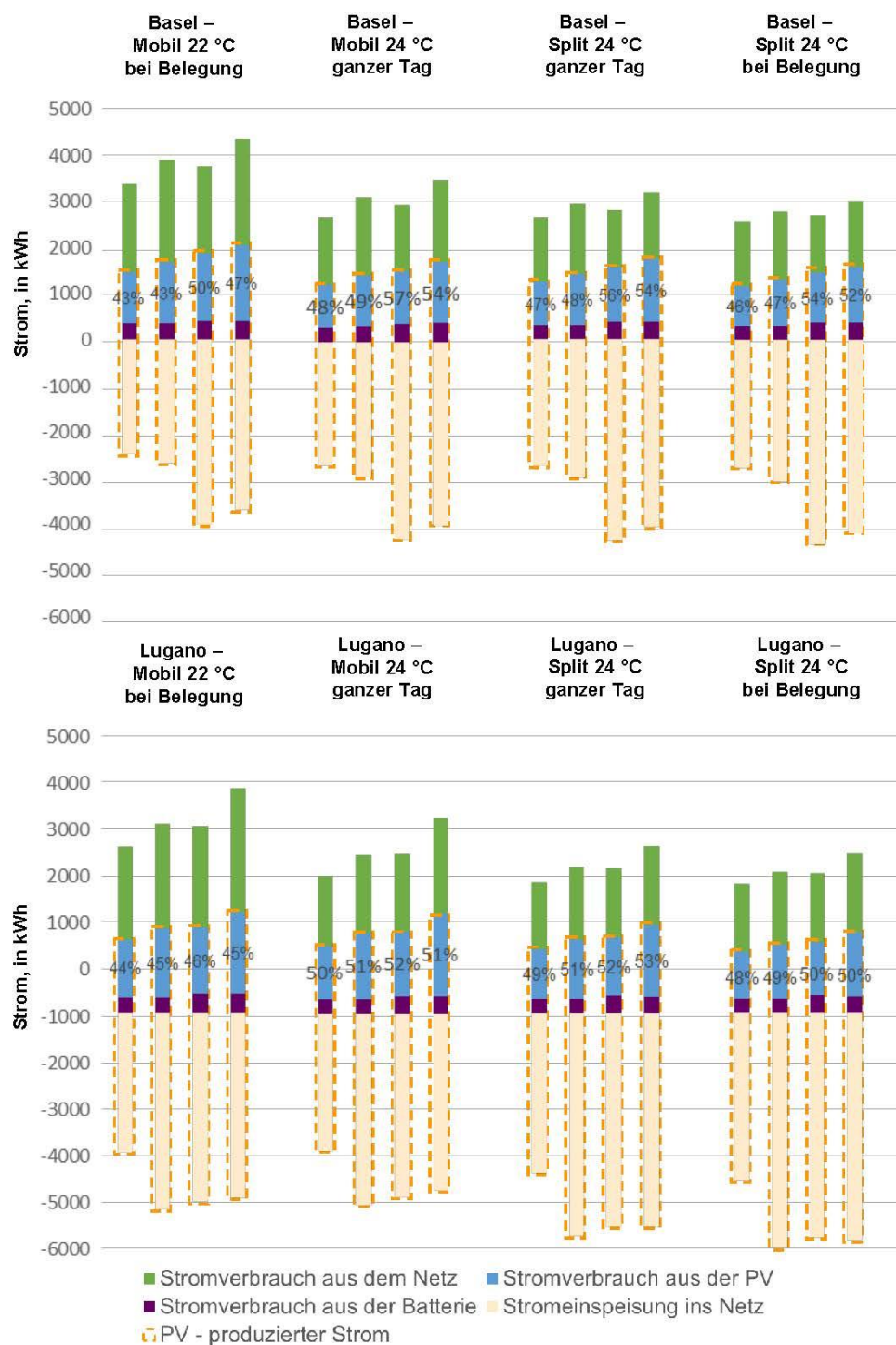


Abbildung 39: Jährliche Strombilanz zwischen dem von der Photovoltaikanlage erzeugten Strom und dem Stromverbrauch für die Kühlung, Geräte und Beleuchtung mit einer Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 30 W/m²_{EBF} und einer Batterie von 4.5 kWh (1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage) für das Klima in Basel (oben) und Lugano (unten). Die Spalten für jedes Szenario entsprechen den Ergebnissen für die vier untersuchten Jahre in der folgenden Reihenfolge: Referenz Medianjahr (2004), Referenz wärmstes Jahr (2003), A1B Medianjahr (2063) und A1B warmes Jahr (2068). Der Prozentsatz stellt den Anteil des Stromverbrauchs für die Kühlung dar, der durch den direkten Verbrauch des von der Photovoltaikanlage erzeugten elektrischen Stroms und in der Batterie gespeicherten Stroms gedeckt wird.

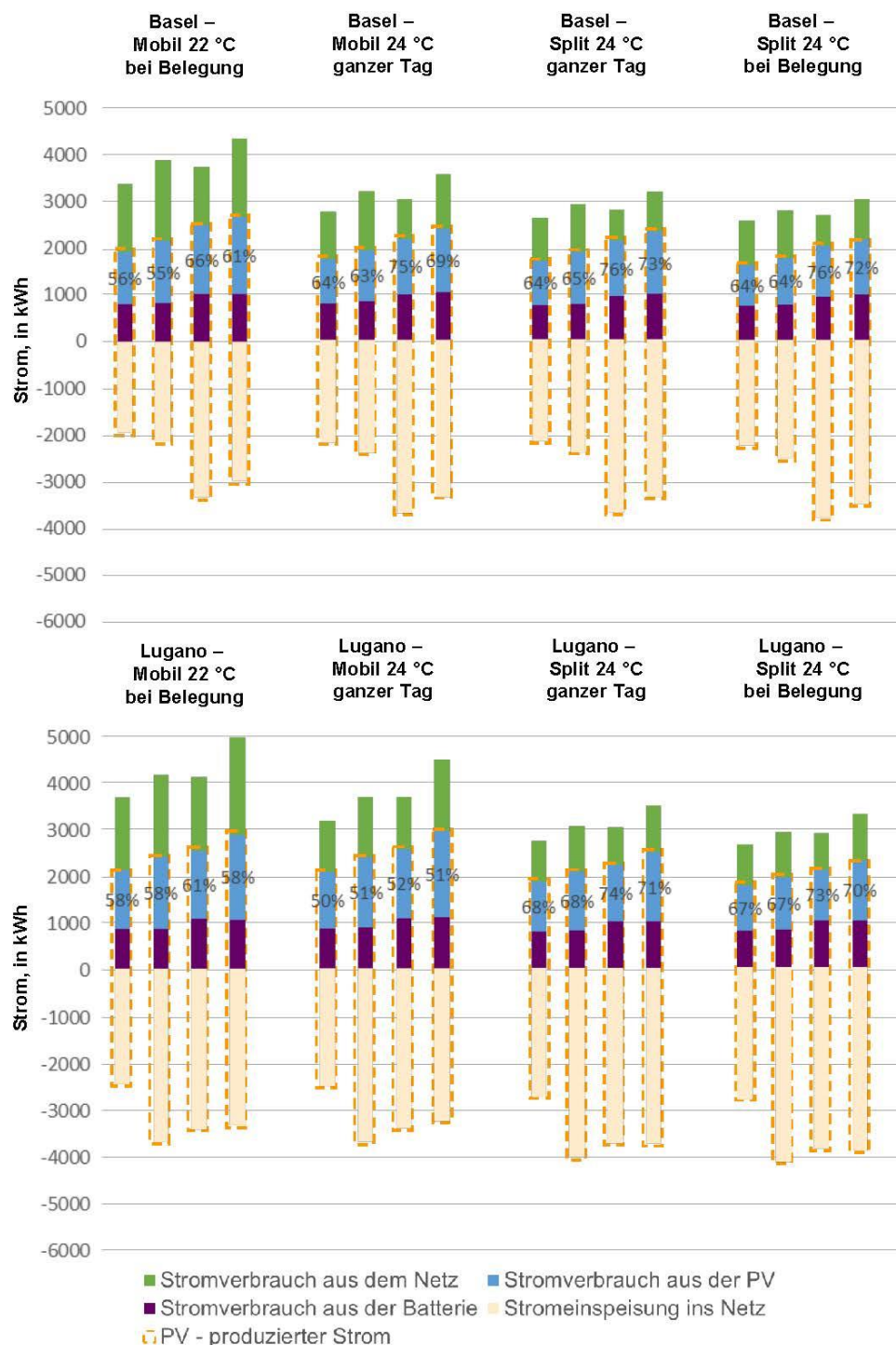


Abbildung 40: Jährliche Strombilanz zwischen dem von der Photovoltaikanlage erzeugten Strom und dem Stromverbrauch für die Kühlung, Geräte und Beleuchtung mit einer Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 30 W/m²_{EBF} und einer Batterie von 13.5 kWh (1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage) für das Klima in Basel (oben) und Lugano (unten). Die Spalten für jedes Szenario entsprechen den Ergebnissen für die vier untersuchten Jahre in der folgenden Reihenfolge: Referenz Median-jahr (2004), Referenz wärmstes Jahr (2003), A1B Medianjahr (2063) und A1B warmes Jahr (2068). Der Prozentsatz stellt den Anteil des Stromverbrauchs für die Kühlung dar, der durch den direkten Verbrauch des von der Photovoltaikanlage erzeugten elektrischen Stroms und in der Batterie gespeicherten Stroms gedeckt wird.

Die zuvor analysierten Photovoltaikanlagen werden mit weiteren Varianten ergänzt: einer Photovoltaikanlage mit höherer Leistung (30 W/m²_{EBF}) mit und ohne Batterie (mit einer Kapazität von 1/1'000 und 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage) zur Deckung des Stromverbrauchs für die Kühlung sowie einer Photovoltaikanlage mit geringerer Leistung (10 W/m²_{EBF}) mit und ohne Batterie (mit einer Kapazität von 1/1'000 und 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage) zur Deckung des Stromverbrauchs für Kühlung, Geräte und Beleuchtung.

Der prozentuale Anteil des Stromverbrauchs, der von den verschiedenen PV-Anlagen für Kühlung und für Kühlung, Geräte und Beleuchtung gedeckt wird, ist in Tabelle 20 bzw. Tabelle 21 dargestellt. Die Spanne der Werte entspricht dem minimalen und maximalen Prozentsatz des abgedeckten Stromverbrauchs für die vier untersuchten Jahre. Der Stromverbrauch der verschiedenen Szenarien ist in Tabelle 19 dargestellt.

Wenn die PV-Anlage nur den Stromverbrauch für die Kühlung decken soll (Tabelle 20), hängt der Prozentsatz des gedeckten Stromverbrauchs vom jeweiligen Szenario ab, wie vorstehend beschrieben. Eine Photovoltaikanlage zur Deckung des Stromverbrauchs für die Kühlung, die mit einer Leistung von $10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ nach MuKE (EnDK, 2018) dimensioniert wurde, deckt den Stromverbrauch für die Kühlung im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung» zu ca. 15-25 %, im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» zu ca. 25-40 % und in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen zu ca. 50-70 %. Der Stromverbrauch, welcher direkt mit der Photovoltaikanlage gedeckt wird, liegt im Szenario «Basel – Mobil 24 °C ganzer Tag» bei $1.1 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ und $2.8 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ in den Medianjahren beider Perioden. Ähnlich sieht es beim Szenario «Basel – Split 24 °C ganzer Tag» aus, bei dem der Stromverbrauch bei $1.2 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ und $2.2 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ liegt. Für das Klima in Lugano liegt der Stromverbrauch, welcher direkt über die Photovoltaikanlage gedeckt wird, etwas höher - beide Szenarien sind dabei sehr ähnlich. Für das Szenario «Lugano – Mobil 24 °C ganzer Tag» liegt dieser bei $1.8 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ und $3.0 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ in den Medianjahren beider Perioden und für das Szenario «Lugano – Split 24 °C ganzer Tag» bei $2.0 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ und $2.9 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ in den Medianjahren beider Perioden.

Durch die Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie, mit einer Kapazität von $1/1'000$ der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 1.5 kWh), erhöht sich der Anteil des Eigenverbrauchs um 10–20 % bei einer Kühlung mit Kompaktgeräten und um 10 % bei einer Kühlung mit Multi-Split-Systemen im Vergleich zur gleichen Installation ohne Batterie. Diese Kombination deckt ca. 35-45 % des Stromverbrauchs für die Kühlung im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», ca. 40-60 % im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und ca. 55-80 % in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen. Der Stromverbrauch aus der Batterie im Szenario «Basel – Mobil 24 °C ganzer Tag» liegt bei $1.0 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ und $1.7 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ in den Medianjahren beider Perioden. Beim Szenario «Basel – Split 24 °C ganzer Tag» liegt der Stromverbrauch aus der Batterie bei $0.2 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ und $0.3 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$. Der Beitrag der Batterie zur Deckung des Eigenverbrauchs ist dabei sehr gering, da der Stromverbrauch für die Kühlung bereits durch ein effizienteres System reduziert wird. Für das Klima in Lugano liegt der Deckungsanteil der Photovoltaikanlage mit einer Batterie und der Stromverbrauch aus der Batterie etwas höher. Für das Szenario «Lugano – Mobil 24 °C ganzer Tag» liegt der Stromverbrauch aus der Batterie bei $1.5 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ und $1.8 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ in den Medianjahren beider Perioden und für das Szenario «Lugano – Split 24 °C ganzer Tag» bei $0.3 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ und $0.4 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ in den Medianjahren beider Perioden.

Durch die Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer dreimal grösseren Kapazität ($1/333$ der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage, Kapazität von 4.5 kWh) erhöht sich zusätzlich der Anteil des Eigenverbrauchs zwischen 7 % und 15 %. Die Deckung des Stromverbrauchs für die Kühlung liegt bei 40-55 % im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», bei ca. 50-70 % im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und bei ca. 60-90 % in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen. Der Stromverbrauch aus der Batterie im Szenario «Basel – Mobil 24 °C ganzer Tag» liegt bei $1.6 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ und $2.4 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ in den Medianjahren beider Perioden. Beim Szenario «Basel – Split 24 °C ganzer Tag» liegt der Stromverbrauch aus der Batterie bei $0.4 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ und $0.6 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$. In diesem Fall wird doppelt so viel Strom aus der Batterie genutzt, der absolute Energiebeitrag der Batterie ist jedoch gering. Für das Klima in Lugano liegt der Deckungsanteil der Photovoltaikanlage mit einer Batterie und der Stromverbrauch aus der Batterie etwas höher. Für das Szenario «Lugano – Mobil 24 °C ganzer Tag» liegt der Stromverbrauch aus der Batterie bei $2.4 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ und $2.6 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ in den Medianjahren beider Perioden und für das Szenario «Lugano – Split 24 °C ganzer Tag» bei $0.5 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ und $0.8 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ in den Medianjahren beider Perioden.

Durch eine Photovoltaikanlage mit einer dreimal grösseren Leistung ($30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$) erhöht sich der Anteil des Eigenverbrauchs um 20-25 % im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», um 30 % im Szenario «Split

24 °C ganzer Tag» und um 10-15 % in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen im Vergleich zur eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von 10 W/m²_{EBF} dimensioniert wurde. Diese Anlage deckt ca. 35-45 % des Stromverbrauchs für die Kühlung im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», ca. 40-60 % im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und ca. 55-80 % in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen. Der Stromverbrauch aus der Photovoltaikanlage des Szenarios «Basel – Mobil 24 °C ganzer Tag» liegt bei 2.3 kWh/(m²a) und 5.0 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden. Beim Szenario «Basel – Split 24 °C ganzer Tag» liegt der Stromverbrauch aus der Photovoltaikanlage bei 1.5 kWh/(m²a) und 2.6 kWh/(m²a). Für das Klima in Lugano ist der Stromverbrauch aus der Photovoltaikanlage etwas höher. Für das Szenario «Lugano – Mobil 24 °C ganzer Tag» liegt dieser bei 3.6 kWh/(m²a) und 5.5 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden und für das Szenario «Lugano – Split 24 °C ganzer Tag» bei 2.3 kWh/(m²a) und 3.5 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden.

Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von 30 W/m²_{EBF} dimensioniert wurde, deckt somit einen höheren Anteil des Eigenstromverbrauchs für die Kühlung als eine Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 10 W/m²_{EBF} in Kombination mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 1.5 kWh). Diese Anlage wird zudem das ganze Jahr über mehr Strom erzeugen, der im Gebäude selbst genutzt oder ins Netz eingespeist werden kann.

Durch die Kombination der Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von 30 W/m²_{EBF} dimensioniert wurde, mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 4.5 kWh) erhöht sich der Anteil des Eigenverbrauchs um ca. 10-15 % im Vergleich zur Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 10 W/m²_{EBF} in Kombination mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 4.5 kWh) und deckt bis zu 95 % des Stromverbrauchs für die Kühlung in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen. Der Stromverbrauch aus der Batterie liegt im Szenarios «Basel – Mobil 24 °C ganzer Tag» bei 0.9 kWh/(m²a) und 1.1 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden und im Szenario «Basel – Split 24 °C ganzer Tag» bei 0.3 kWh/(m²a) und 0.4 kWh/(m²a). Beim Szenario «Lugano – Mobil 24 °C ganzer Tag» liegt der Stromverbrauch aus der Batterie bei 1.3 kWh/(m²a) und 1.5 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden und beim Szenario «Lugano – Split 24 °C ganzer Tag» bei 0.4 kWh/(m²a) und 0.7 kWh/(m²a).

Durch die Kombination der Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von 30 W/m²_{EBF} dimensioniert wurde, mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 13.5 kWh) kann bis zu 90 % des Stromverbrauchs für die Kühlung im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», bis zu 95 % im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und bis zu 100 % in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen gedeckt werden. In diesem Fall liegt der Stromverbrauch aus der Batterie im Szenarios «Basel – Mobil 24 °C ganzer Tag» bei 1.3 kWh/(m²a) und 1.8 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden und im Szenario «Basel – Split 24 °C ganzer Tag» bei 0.4 kWh/(m²a) und 0.4 kWh/(m²a). Beim Szenario «Lugano – Mobil 24 °C ganzer Tag» liegt der Stromverbrauch aus der Batterie bei 2.1 kWh/(m²a) und 2.6 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden und beim Szenario «Lugano – Split 24 °C ganzer Tag» bei 0.7 kWh/(m²a) und 1.3 kWh/(m²a).

	Szenario	Leistung PV 10 W/m ² _{EBF}			Leistung PV 30 W/m ² _{EBF}		
		ohne Batterie	Batterie Kapazität 1/1'000 (1.5 kWh)	Batterie Kapazität 1/333 (4.5 kWh)	ohne Batterie	Batterie Kapazität 1/1'000 (4.5 kWh)	Batterie Kapazität 1/333 (13.5 kWh)
BASEL / LUGANO	Mobil 22 °C bei Belegung	15-25 %	35-45 %	40-55 %	40-45 %	55-65 %	65-90 %
	Mobil 24 °C ganzer Tag	25-40 %	40-60 %	50-70 %	55-70 %	65-85 %	75-95 %
	Split 24 °C ganzer Tag	50-70 %	60-80 %	65-90 %	65-80 %	75-95 %	90-100 %
	Split 24 °C bei Belegung	45-65 %	55-80 %	60-90 %	60-75 %	70-95 %	90-100 %

Tabelle 20: Deckungsgrad des Stromverbrauchs für Klimakälte mit einer Photovoltaikanlage ohne Batterie, mit einer Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage und mit einer Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage für die untersuchten Szenarien (Leistung PV 10 W/m²_{EBF} und 30 W/m²_{EBF}).

Der Deckungsgrad des Stromverbrauchs für Klimakälte, Geräte und Beleuchtung mit einer Photovoltaikanlage mit und ohne Batterie gleicht sich in den verschiedenen Szenarien an (Tabelle 21). Der Stromverbrauch für die Geräte und Beleuchtung beträgt ca. 18.4 kWh/(m²a), was höher ist als der Verbrauch für die Kühlung des vorgestellten Szenarios, ausser im warmen Jahr der Periode A1B für das Klima in Lugano. Der Stromverbrauch für die Geräte und Beleuchtung wird somit im Vergleich zum Verbrauch für die Kühlung dominierend. Für das Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung» sind die Deckungsanteile etwas niedriger, weil der Stromverbrauch für die Kühlung etwas höher ist.

Eine Photovoltaikanlage zur Deckung des Stromverbrauchs für Kühlung, Geräte und Beleuchtung, die mit einer Leistung von 10 W/m²_{EBF} nach MuKE (EnDK, 2018) dimensioniert wurde, deckt den Stromverbrauch für die Kühlung im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung» zu ca. 20-25 % und in den anderen Szenarien zu ca. 25-30 %. Der Stromverbrauch aus der Photovoltaikanlage im Szenario «Basel – Mobil 24 °C ganzer Tag» liegt bei 5.1 kWh/(m²a) und 7.3 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden. Ähnlich sieht es beim Szenario «Basel – Split 24 °C ganzer Tag» aus, bei dem der Stromverbrauch bei 5.4 kWh/(m²a) und 7.0 kWh/(m²a) liegt. Für das Klima in Lugano ist der Stromverbrauch aus der Photovoltaikanlage etwas höher und in beiden Szenarien sehr ähnlich. Für das Szenario «Lugano – Mobil 24 °C ganzer Tag» liegt dieser bei 6.0 kWh/(m²a) und 7.3 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden und für das Szenario «Lugano – Split 24 °C ganzer Tag» bei 6.3 kWh/(m²a) und 7.4 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden.

Durch die Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 1.5 kWh) erhöht sich der Anteil des Eigenverbrauchs um 5 % im Vergleich zur gleichen Installation ohne Batterie. Die Deckung des Stromverbrauchs für Kühlung, Geräte und Beleuchtung liegt bei ca. 30-35 % im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», bei ca. 35-40 % in den Szenarien «Mobil 24 °C ganzer Tag» und «Split 24 °C bei Belegung Tag» und bei ca. 35-45 % im Szenario «Split 24 °C ganzer Tag». Der Stromverbrauch aus der Batterie im Szenario «Basel – Mobil 24 °C ganzer Tag» liegt bei 1.3 kWh/(m²a) und 2.0 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden. Beim Szenario «Basel – Split 24 °C ganzer Tag» liegt der Stromverbrauch aus der Batterie bei 0.8 kWh/(m²a) und 1.0 kWh/(m²a). Der Beitrag der Batterie zur Deckung des Eigenverbrauchs ist dabei geringer, da der Stromverbrauch für die Kühlung bereits durch ein effizienteres System reduziert wird. Für das Klima in Lugano liegt der Deckungsanteil der Batterie etwas höher. Für das Szenario «Lugano – Mobil 24 °C ganzer Tag» liegt dieser bei 1.7 kWh/(m²a) und 2.1 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden und für das Szenario «Lugano – Split 24 °C ganzer Tag» bei 0.8 kWh/(m²a) und 1.1 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden.

Durch die Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer dreimal grösseren Kapazität, mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 4.5 kWh), erhöht sich zusätzlich der Anteil des Eigenverbrauchs um 5 %. Die Deckung des Stromverbrauchs für Kühlung, Geräte und Beleuchtung liegt bei ca. 30-35 % im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», bei ca. 35-40 % in den Szenarien «Mobil 24 °C ganzer Tag» und «Split 24 °C bei Belegung Tag» und bei ca. 35-45 % im Szenario «Split 24 °C ganzer Tag». Der Stromverbrauch aus der Batterie liegt im Szenario «Basel – Mobil 24 °C ganzer Tag» bei 2.4 kWh/(m²a) und 3.5 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden. Beim Szenario «Basel – Split 24 °C ganzer Tag» liegt der Stromverbrauch aus der Batterie bei 1.7 kWh/(m²a) und 2.3 kWh/(m²a). Für das Klima in Lugano liegt der Deckungsanteil der Batterie etwas höher. Für das Szenario «Lugano – Mobil 24 °C ganzer Tag» liegt dieser bei 3.0 kWh/(m²a) und 3.8 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden und für das Szenario «Lugano – Split 24 °C ganzer Tag» bei 1.8 kWh/(m²a) und 2.5 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden.

Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von 30 W/m²_{EBF} dimensioniert wurde, deckt mindestens den gleichen oder sogar einen höheren Anteil des Eigenstromverbrauchs für Kühlung, Geräte und Beleuchtung als eine Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 10 W/m²_{EBF} in Kombination mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 4.5 kWh). Der Deckungsanteil des Stromverbrauchs für Kühlung, Geräte und Beleuchtung liegt bei ca. 35-40 % in den Szenarien mit einer Kühlung nur bei Belegung und bei ca. 35-45 % in den Szenarien mit einer

ganztägigen Kühlung. Der Stromverbrauch aus der Photovoltaikanlage im Szenario «Basel – Mobil 24 °C ganzer Tag» liegt bei 8.1 kWh/(m²a) und 11.5 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden und somit ähnlich wie im Szenario «Basel – Split 24 °C ganzer Tag» mit 7.3 kWh/(m²a) und 9.3 kWh/(m²a). Für das Klima in Lugano ist der Stromverbrauch aus der Photovoltaikanlage etwas höher. Diese Anlage wird zudem das ganze Jahr über mehr Strom erzeugen, der im Gebäude selbst genutzt oder ins Netz eingespeist werden kann.

Durch die Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 4.5 kWh) erhöht sich der Anteil des Eigenverbrauchs um 45-55 % im Vergleich zu einer Installation ohne Batterie und liegt somit bei ca. 45-50 % im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», bei ca. 50-55% im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und bei ca. 45-55 % in den anderen Szenarien. Der Stromverbrauch aus der Batterie liegt im Szenario «Basel – Mobil 24 °C ganzer Tag» bei 2.5 kWh/(m²a) und 3.0 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden und somit ähnlich wie im Szenario «Basel – Split 24 °C ganzer Tag» mit 2.2 kWh/(m²a) und 2.8 kWh/(m²a).

Durch die Kombination der Photovoltaikanlage mit einer grösseren Batterie mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 13.5 kWh) erhöht sich der Anteil des Eigenverbrauchs zusätzlich um 15-20 % und liegt bei 65-75 %, ausser im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung» mit einem Eigenverbrauchsanteil von 55-65 %. Mit der grösseren Batterie liegt der Stromverbrauch aus der Batterie im Szenario «Basel – Mobil 24 °C ganzer Tag» bei 6.0 kWh/(m²a) und 7.7 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden und somit ähnlich wie im Szenario «Basel – Split 24 °C ganzer Tag» mit 5.7 kWh/(m²a) und 7.1 kWh/(m²a).

Deshalb kann durch die Installation einer Photovoltaikanlage mit einer grösseren Leistung (30 W/m²_{EBF}) ein höherer Eigenverbrauch gedeckt werden als durch eine Photovoltaikanlage mit einer geringeren Leistung (10 W/m²_{EBF}) in Kombination mit einer Batterie. Dabei erhöht sich nicht nur der Anteil des Eigenverbrauchs, sondern auch der Stromanteil, welcher ganzjährig aus erneuerbaren Energien erzeugt werden kann – Dies ist insbesondere im Winter vorteilhaft, wenn der Stromgewinn aus erneuerbaren Energien i.d.R. geringer ist. In diesem Fall ist eine grössere Batterie (mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion) ebenfalls von Vorteil im Vergleich zu einer kleineren Batterie (mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion). Eine Ökobilanzierung des gesamten Lebenszyklus der Anlage (inklusive Winter) ermöglicht es, eine angemessene Grösse der Anlage zu dimensionieren.

	Szenario	Leistung PV 10 W/m² _{EBF}			Leistung PV 30 W/m² _{EBF}		
		ohne Batterie	Batterie Kapazität 1/1'000 (1.5 kWh)	Batterie Kapazität 1/333 (4.5 kWh)	ohne Batterie	Batterie Kapazität 1/1'000 (4.5 kWh)	Batterie Kapazität 1/333 (13.5 kWh)
BASEL / LUGANO	Mobil 22 °C bei Belegung	20-25 %	25-30 %	30-35 %	35-40 %	45-50 %	55-65 %
	Mobil 24 °C ganzer Tag	25-30 %	30-35 %	35-40 %	35-45 %	50-55 %	65-75 %
	Split 24 °C ganzer Tag	25-30 %	30-35 %	35-45 %	35-45 %	45-55 %	65-75 %
	Split 24 °C bei Belegung	25-30 %	30-35 %	35-40 %	35-40 %	45-55 %	65-75 %

Tabelle 21: Deckungsgrad des Stromverbrauchs für Klimakälte, Geräte und Beleuchtung mit einer Photovoltaikanlage ohne Batterie, mit einer Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage und mit einer Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage für die untersuchten Szenarien (Leistung PV 10 W/m²_{EBF} und 30 W/m²_{EBF}).

4.2.3.4 Erkenntnisse

Anhand der durchgeführten Analysen können folgende Aussagen festgehalten werden:

- Der Stromverbrauch für die Kühlung bei Belegung der Wohnung mit Kompaktgeräten bei einer Solltemperatur von 22 °C liegt bei 7.9 kWh/(m²a) und 10.9 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel bzw. bei 10.2 kWh/(m²a) und 13.6 kWh/(m²a) für das Klima in Lugano. Der Klimawandel führt somit zu einem Anstieg des Stromverbrauchs für die Kühlung um mehr als 30 %. Im wärmsten Jahr der Referenzperiode erhöht sich der Stromverbrauch für die Kühlung auf 15.6 kWh/(m²a) für das Klima in Basel und auf 20.3 kWh/(m²a) für das Klima in Lugano. Dies bedeutet

einen fast doppelt so hohen Stromverbrauch im Vergleich zu den Medianjahren der Referenzperiode.

- Durch eine Solltemperatur von 24 °C (statt 22 °C) und einer ganztägigen Kühlung (statt einer Kühlung nur bei Belegung) mit Kompaktgeräten, wie im Szenario «Basel – Mobil 24 °C ganzer Tag», reduziert sich der Klimakältebedarf je nach untersuchtem Jahr um 25-50 % im Klima von Basel und um 20-40 % im Klima von Lugano. Diese Reduktion ist aufgrund des Klimawandels etwas geringer. In den beiden Jahren der Referenzperiode reduziert sich der Klimakältebedarf um ca. 35-50 % für das Klima in Basel und um ca. 30-40 % für das Klima in Lugano. In den beiden Jahren der zukünftigen Periode A1B reduziert sich der Klimakältebedarf um ca. 25-35 % bzw. 20-30 % für das Klima in Basel bzw. in Lugano. Der Stromverbrauch für die Kühlung liegt in diesem Szenario bei 3.8 kWh/(m²a) und 7.2 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel bzw. bei 6.1 kWh/(m²a) und 10.0 kWh/(m²a) für das Klima in Lugano. Der Klimawandel führt somit zu einem Anstieg des Stromverbrauchs für die Kühlung um mehr als 90 % für das Klima in Basel und um mehr als 60 % für das Klima in Lugano. Im wärmsten Jahr der Referenzperiode erhöht sich der Stromverbrauch für die Kühlung auf 11.8 kWh/(m²a) für das Klima in Basel und auf 16.4 kWh/(m²a) für das Klima in Lugano. Das bedeutet einen 3-fach höheren Stromverbrauch für das Klima in Basel und einen 2.5-fach höheren für das Klima in Lugano im Vergleich zu den Medianjahren der Referenzperiode.
- Die Kühlung bei Belegung der Wohnung mit einem Multi-Split-System bei einer Solltemperatur von 24 °C reduziert den Klimakälteverbrauch im Vergleich zu einer Kühlung bei Belegung der Wohnung mit mobilen Kompaktgeräten bei einer Solltemperatur von 22 °C um 70-85 % im Klima von Basel und um 65-80 % im Klima von Lugano. Der Stromverbrauch für die Kühlung liegt in diesem Szenario bei 1.3 kWh/(m²a) und 2.4 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel bzw. bei 2.1 kWh/(m²a) und 3.9 kWh/(m²a) für das Klima in Lugano. Der Klimawandel führt somit zu einem Anstieg des Stromverbrauchs für die Kühlung um 80% an beiden Klimastandorten. Im wärmsten Jahr der Referenzperiode erhöht sich der Stromverbrauch für die Kühlung auf 4.9 kWh/(m²a) für das Klima in Basel und auf 7.2 kWh/(m²a) für das Klima in Lugano. Dies entspricht einem mehr als 3-fach höheren Stromverbrauch im Vergleich zu den Medianjahren der Referenzperiode.
- Die ganztägige Kühlung der Wohnung im Vergleich zu einer Kühlung nur bei Belegung mit einem Multi-Split-System bewirkt eine Erhöhung des Klimakälteverbrauchs von ca. 30 % bei einer Solltemperatur von 24 °C für das Klima in Basel und Lugano. Neben der Erhöhung des Stromverbrauchs für Kühlung ergibt sich ebenso eine Erhöhung der elektrischen Leistung für die Kühlung zwischen 100-140 % im Klima von Basel und zwischen 60-130 % im Klima von Lugano. Durch dieses Szenario kann sichergestellt werden, dass die Temperatur in der ganzen Wohnung jederzeit in einem komfortablen Bereich gehalten wird. Der Stromverbrauch für die Kühlung liegt in diesem Szenario (ganztägige Kühlung) bei 1.8 kWh/(m²a) und 3.2 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel bzw. bei 2.8 kWh/(m²a) und 5.0 kWh/(m²a) für das Klima in Lugano. Im wärmsten Jahr der Referenzperiode erhöht sich der Stromverbrauch für die Kühlung auf 6.2 kWh/(m²a) für das Klima in Basel und auf 8.8 kWh/(m²a) für das Klima in Lugano.
- Eine Kühlung «bei Belegung» ist einer Kühlung über den ganzen Tag vorzuziehen und kann durch die Kombination mit einer bedarfsgerechten Fensterlüftung zusätzlich positiv beeinflusst werden.
- Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von 10 W/m²_{EBF} nach MuKE n (EnDK, 2018) dimensioniert wurde, kann den Stromverbrauch für die Kühlung zu ca. 15-25 % im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», zu ca. 25-40 % im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und zu ca. 45-70 % in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen decken.

Durch die Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage – mit einer Kapazität von 1.5 kWh – erhöht sich der Anteil des Eigenverbrauchs bei einer Kühlung mit Kompaktgeräten um 15-20 % und bei einer Kühlung mit Multi-Split-Systemen um 10-15 % im Vergleich zur gleichen Installation ohne Batterie. Diese Kombination deckt ca. 35-45 % des Stromverbrauchs für die Kühlung beim Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», ca. 40-60 % beim Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und ca. 55-80 % bei den Szenarien mit Multi-Split-Systemen. Durch die Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer dreimal grösseren Kapazität, mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage – mit einer Kapazität von 4.5 kWh – erhöht sich zusätzlich der Anteil des Eigenverbrauchs zwischen 5 % und 10 %. Die Deckung des Stromverbrauchs für die Kühlung liegt bei 40-55 % im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», bei ca. 50-70 % im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und bei ca. 60-90 % in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen.

- Durch eine Photovoltaikanlage mit einer dreimal grösseren Leistung ($30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$) erhöht sich der Anteil des Eigenverbrauchs um 20-25 % im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», um 30 % im Szenario «Split 24 °C ganzer Tag» und um 10-15 % in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen im Vergleich zur eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert wurde. Diese Anlage deckt ca. 40-45 % des Stromverbrauchs für die Kühlung im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», ca. 55-70 % im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und ca. 60-80 % in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen. Daher deckt eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert wurde, einen höheren Anteil des Eigenstromverbrauchs für die Kühlung als eine Photovoltaikanlage mit einer Leistung von $10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ in Kombination mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 1.5 kWh). Die leistungsstärkere Photovoltaikanlage ist für die Szenarien mit mobilen Kompaktgeräten effektiver, da die benötigte elektrische Leistung höher als bei den Multi-Split-Systemen ist. Diese Anlage wird zudem das ganze Jahr über mehr Strom erzeugen, der im Gebäude selbst genutzt oder ins Netz eingespeist werden kann. Durch die Kombination der Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert wurde, mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 13.5 kWh) kann bis zu 90 % des Stromverbrauchs für die Kühlung im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», bis zu 95 % im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und bis zu 100 % in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen gedeckt werden.
- Der Anteil des Eigenverbrauchs in den Szenarien mit einer ganztägigen Kühlung und einer Kühlung nur bei Belegung mit Multi-Split-Systemen ist sehr ähnlich. Jedoch führt die Kühlung der Wohnung nur bei Belegung zu einem geringeren Stromverbrauch aus dem Netz sowie einer geringeren elektrischen Leistung.
- Wird mit der Photovoltaikanlage ebenso der Stromverbrauch für Geräte und Beleuchtung gedeckt, dann gleicht sich der Anteil des Eigenverbrauchs in den verschiedenen Szenarien an. Das liegt daran, da der Stromverbrauch für Geräte und Beleuchtung mit ca. $18.4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ im Vergleich zum Stromverbrauch für Kühlung deutlich höher liegt und in allen Szenarien praktisch gleich ist. In den Szenarien mit Multi-Split-Anlagen liegt dieser Anteil jedoch deutlich höher.
- Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert wurde, deckt zwischen 20-30 % des Stromverbrauchs für Kühlung, Geräte und Beleuchtung. Durch die Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 4.5 kWh) erhöht sich dieser Anteil um 5 % und liegt bei ca. 25-35 %. Durch die Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/333

der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 13.5 kWh) erhöht sich der Eigenverbrauchsanteil um 10 % im Vergleich zu einer Installation ohne Batterie. Der Eigenverbrauch liegt somit bei ca. 30-45 %.

- Eine grössere Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert wurde, deckt zwischen 35-45 % des Stromverbrauchs für Kühlung, Geräte und Beleuchtung. Durch die Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 4.5 kWh) erhöht sich dieser Anteil um 10 % und liegt bei ca. 45-55 %. Durch die Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 13.5 kWh) erhöht sich der Eigenverbrauchsanteil um 20-30 % im Vergleich zu einer Installation ohne Batterie. Der Eigenverbrauch liegt bei ca. 55-75 %.

4.2.4 Dämmung einzelner, zu kühlender Räume

Zur Ermittlung der Wirksamkeit einer Dämmung einzelner, zu kühlender Räume gegenüber anderen ungekühlten Räumen in der Wohnung werden die Szenarien 2 und 3 betrachtet, in welchen der Wohnbereich bzw. die Schlafzimmer am Standort Basel gekühlt werden.

Wie in Abschnitt 4.2.1.2 vorgelegt, ist der Klimakälteverbrauch in diesen Szenarien sehr niedrig, insbesondere in Szenario 3, wenn die Schlafzimmer nur nachts gekühlt werden. In diesem Szenario erreicht der Klimakälteverbrauch im warmen Jahr der Periode A1B noch nicht mal $1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Deswegen ist der Beitrag einer Dämmung minimal. Aus diesem Grund wurde eine Solltemperatur von 24°C mit einem ganztägigen Kühlbetrieb eingestellt.

Wie im Abschnitt 3.5.8 erläutert, wurden die Trennwände zu den weiteren Räumen der Wohnung sowie das Dach des zu kühlenden Raumes gedämmt.

Die in diesem Rahmen analysierten Szenarien sind wie folgt:

- Wohnbereich.
- Wohnbereich mit Dämmung.
- Schlafzimmer.
- Schlafzimmer mit Dämmung.

Die Dämmung der zu kühlenden Räume führt erwartungsgemäss zu einer leichten Erhöhung der Lufttemperatur der ungekühlten Räume. Dieser Effekt ist jedoch nicht relevant, so dass die Ergebnisse bezüglich der thermischen Behaglichkeit nicht berücksichtigt werden.

Abbildung 41 zeigt inwieweit die Dämmung der zu kühlenden Räume sich auf die Reduzierung des Klimakältebedarfs auswirkt. Bezogen auf den Klimakältebedarf hat die Dämmung eine sehr geringe Auswirkung von etwa 5 %. Bezogen auf den Klimakälteverbrauch bewirkt die Dämmung eine Reduzierung von ca. 20 % im Wohnbereich und von ca. 15 % in den Schlafzimmern.

Im Wohnbereich beträgt die Reduktion des Klimakälteverbrauchs 0.2 und $0.4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ im Medianjahr der Referenzperiode bzw. der Periode A1B. In den warmen Jahren ist die Reduktion etwas höher und beträgt im wärmsten Jahr der Referenzperiode bzw. im warmen Jahr der Periode A1B 0.6 und $0.8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. In den Schlafzimmern mit einem geringen Klimakälteverbrauch ist diese Reduktion noch geringer. Im Medianjahr der Referenzperiode reduziert diese Massnahme den Klimakälteverbrauch gar nicht und im Medianjahr der Periode A1B um lediglich $0.1 \text{ kWh}/\text{m}^2$. Analog zum Wohnbereich ist die Reduzierung in den warmen Jahren etwas höher: 0.3 und $0.5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ im wärmsten Jahr der Referenzperiode bzw. im warmen Jahr der Periode A1B.

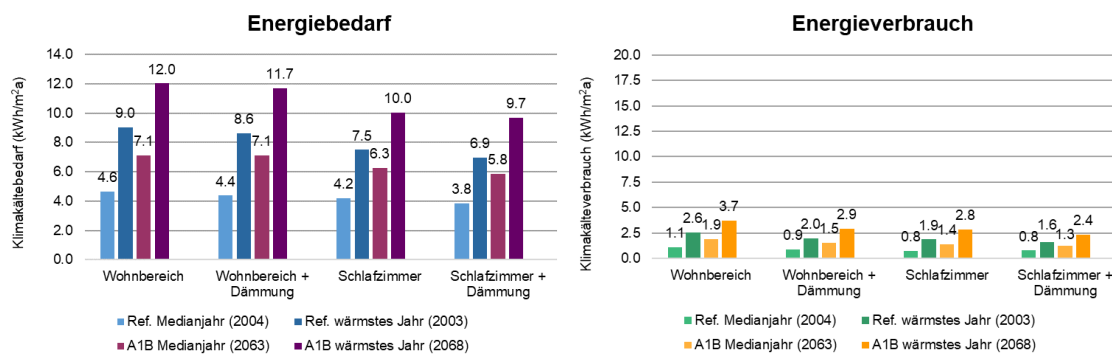


Abbildung 41: Links: Klimakältebedarf der untersuchten Szenarien in den simulierten Jahren. Rechts: Klimakälteverbrauch der untersuchten Szenarien in den simulierten Jahren.

Abbildung 42 zeigt inwieweit sich die Dämmung der zu kühlenden Räume auf die Reduzierung des Leistungsbedarfs der Kühlung auswirkt. Bezogen auf den Klimakälteleistungsbedarf hat die Dämmung kaum eine Auswirkung. Bezogen auf die elektrische Leistung bewirkt die Dämmung eine Reduzierung von ca. 20 % im Wohnbereich und von ca. 15 % in den Schlafzimmern, wie im Fall des Klimakälteverbrauchs.

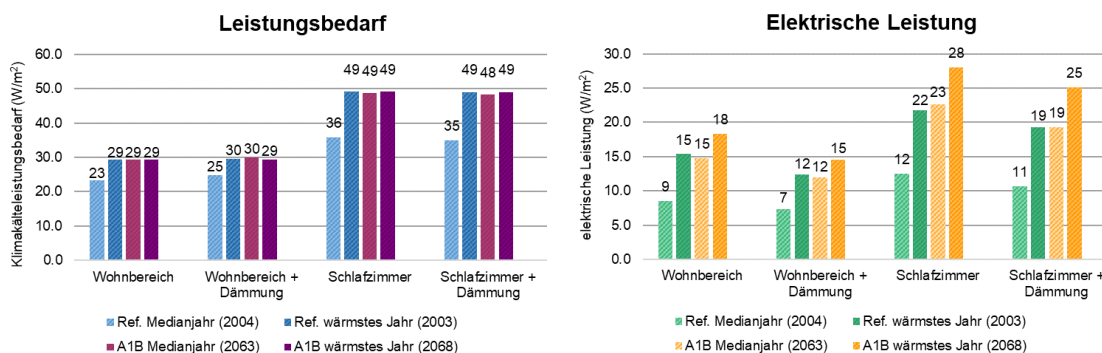


Abbildung 42: Links: Klimakälteleistungsbedarf für Klimakälte der untersuchten Szenarien in den simulierten Jahren. Rechts: Maximale elektrische Leistung für Klimakälte der untersuchten Szenarien in den simulierten Jahren.

In Anbetracht der geringen Reduzierung des Klimakälteverbrauchs durch diese Massnahme, wird das zusätzliche Potenzial einer Photovoltaikanlage nicht im Detail analysiert. Die Reduktion des Klimakälteverbrauchs führt zu einer Erhöhung des Eigenverbrauchsanteils um etwa 5%. Der Stromverbrauch aus der Photovoltaikanlage in absoluten Zahlen ist in den Szenarien mit Dämmung erwartungsgemäss geringer. Wie in Abschnitt 4.2.1.4 erwähnt, macht in den Szenarien mit geringem Stromverbrauch für die Kühlung eine Photovoltaikanlage nur dann Sinn, wenn sie zusätzlich zur Deckung des weiteren Stromverbrauchs im Gebäude für Elektrogeräte und Beleuchtung eingesetzt wird.

4.2.4.1 Erkenntnisse

Aus den ermittelten Ergebnissen können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Die Dämmung einzelner, zu kühlender Räume ermöglicht eine Reduzierung des Klimakälteverbrauchs zwischen 15 und 20 %. In absoluten Zahlen ist diese Reduktion jedoch sehr gering. Bei einer 24-Stunden-Kühlung mit einer Solltemperatur von 24 °C in den Medianjahren und warmen Jahren beider Perioden beträgt sie sogar weniger als 0.5 bzw. 1.0 kWh/(m²a).
- Andere Massnahmen, wie z. B. ein Sonnenschutzsystem oder eine Verglasung mit einem geringeren Gesamtenergiedurchlassgrad, eine Reduzierung der internen Wärmeinträge durch effizientere Geräte und Beleuchtung oder eine verstärkte Nachtlüftung können effektiver sein als die Dämmung der zu kühlenden Räume.
- Bei geringem Stromverbrauch für die Kühlung – wie in Abschnitt 4.2.1.4 erwähnt – macht eine Photovoltaikanlage nur dann Sinn, wenn sie zusätzlich zur Deckung des

weiteren Stromverbrauchs im Gebäude für Elektrogeräte und Beleuchtung eingesetzt wird.

4.3 Gesetzgebung

In diesem Abschnitt wurden Hinweise zur Anpassung von bestehenden Gesetzgebungen formuliert. Die hier ausgesprochenen Empfehlungen beziehen sich auf Neubauten, sind aber auch auf bestehende Gebäude anwendbar.

Dabei ist zu beachten, dass die Grundlagen und Anforderungen der SIA Normen auf den Klimadaten nach Merkblatt SIA 2028 (SIA, 2010) basieren, dessen aktuelle Version im Jahr 2010 veröffentlicht wurde. In dieser Norm wurden als Datengrundlage Messdaten im Zeitraum von 1984 bis 2003 gewählt. Das Merkblatt stellt warme Klimadateien («Design Reference Year²¹» – DRY) mit den wärmsten Monaten der 20 Jahre des oben erwähnten Zeitraums zur Verfügung, welches für Risikoanalysen verwendet werden kann. Das Merkblatt hält unter anderem fest: «die Unterschiede der mittleren Temperaturen zwischen dem warmen und dem mittleren DRY entsprechen gemäss [...] in etwa dem oberen Rand des Bereichs des bis 2050 bzw. der Mitte des Bereichs des bis 2070 zu erwartenden Anstiegs».

Diese Klimadaten sind vielen Planenden unbekannt und werden dementsprechend in der Praxis kaum verwendet. Die geltenden gesetzlichen Vorschriften beziehen sich nicht auf diese Klimadaten, wie z.B. dem Nachweis für den sommerlichen Wärmeschutz.

Im Rahmen des Projekts «Klimadaten der Zukunft für Planende: Klimawandel und Merkblatt SIA 2028» (NCCS, 2020) des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA) wird eine Datengrundlage für eine mögliche Revision und Ergänzung des Merkbllatts SIA 2028 «Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik» (SIA, 2020b) erarbeitet.

Zu den Zielen dieses Projekts gehören u.a. die Ergänzung des auf meteorologischen Messdaten beruhenden Merkbllatts SIA 2028 «Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik» durch eine praxistaugliche Alternative, welche das zukünftige Klima, auf der Basis der neuen Klimaszenarien CH2018, berücksichtigt.

Sobald die neuen Klimadaten veröffentlicht werden, wäre eine Überprüfung der in der Norm festgelegten Anforderungen bezüglich der Gewährleistung der thermischen Behaglichkeit in Gebäuden unter Berücksichtigung des zukünftigen Klimas zu empfehlen.

Die Empfehlungen wurden in die folgenden Themenbereiche unterteilt:

- Massnahmen für den sommerlichen Wärmeschutz in Wohngebäuden.
- Notwendigkeit der Kühlung in Wohngebäuden.
- Mindestanforderungen für mobile Kompaktgeräte und Split-Systeme unter einer Kälteerzeugerleistung von 12 kW.
- Energieverbrauch und der Beitrag von erneuerbaren Quellen zur Kühlung.

4.3.1 Massnahmen für den sommerlichen Wärmeschutz in Wohngebäuden

Massnahmen zur Vermeidung von unerwünschten externen und internen Wärmeeinträgen in Gebäuden sind zur Sicherstellung der thermischen Behaglichkeit im Innenraum ohne aktive Kühlung entscheidend.

²¹ Design Reference Year: Datensatz mit stündlichen Daten für ein typisches Jahr, ermittelt aus den Messdaten einer längeren Periode (min. 10 Jahre, hier 20 Jahre). Der Datensatz enthält typische Mittelwerte und Verteilungen, also auch typische Spitzensituationen (SIA, 2010).

Die folgenden baulichen Massnahmen sollten besonders beachtet werden:

- Orientierung und Dimensionierung der transparenten Bauteile.
- Qualität der Verglasung und des Sonnenschutzes.
- Nachtauskühlung.
- Wärmespeicherfähigkeit.
- Wärmedämmung.
- Reduktion interner Lasten.
- Automatisierter Sonnenschutz und Fensterlüftung.

Die Norm SIA 180 (SIA, 2014a) stellt verschiedene Anforderungen an bauliche Massnahmen zur Sicherstellung des sommerlichen Wärmeschutzes. Diese Anforderungen variieren je nach dem verwendeten Verfahren. Dieser Abschnitt enthält eine Auswahl von Empfehlungen, welche die bestehenden Anforderungen dieser Norm ergänzen oder verstärken.

4.3.1.1 Orientierung und Dimensionierung der transparenten Bauteile

Die Norm SIA 180 (SIA, 2014a) legt einen maximalen Glasanteil für einen einfachen Nachweis des Wärmeschutzes fest, so dass dieser von der Bedienung des Sonnenschutzes sowie der Wärmespeicherfähigkeit und Gebäudenutzung abhängt. Dieser Ansatz sollte für eine höhere Präzision durch die Orientierung der transparenten Bauteile sowie deren Gesamtenergiedurchlassgrad (Verglasung und Sonnenschutz) ergänzt werden.

Bei der Dimensionierung von Fenstern und den zugehörigen Elementen (vor allem Sonnenschutz und Verglasungstyp) ist ein Gleichgewicht zwischen den solaren Wärmeeinträgen, dem Überhitzungsschutz und der Tageslichtversorgung anzustreben. Weitere Erkenntnisse zu diesem Thema können aus dem Projekt «Bereit für den Klimawandel? Handlungsempfehlungen für Bauherrschaften und Planende²²» der Hochschule Luzern entnommen werden.

Das Merkblatt SIA 2021 (SIA, 2002), auch wenn es nicht mehr gültig ist, enthält Empfehlungen für Gebäude mit einem hohen Glasanteil. Einerseits zur Vermeidung von thermischen Behaglichkeitsproblemen im Winter sowie im Sommer, andererseits zur Sicherstellung eines energieeffizienten Betriebs. Gebäude mit einem hohen Glasanteil sind Gebäude, «bei denen entweder der durchsichtige Glasanteil an der Fassadefläche mehr als 50 % ausmacht oder bei denen in einzelnen Räumen das Verhältnis von Glasfläche zu Energiebezugsfläche 30 % übersteigt» (SIA, 2002).

Beidseitig verglaste Eckräume sind dabei besonders kritisch. Für die Dimensionierung solcher Räume legt die Norm SIA 180 (SIA, 2014a) ein Berechnungsverfahren fest.

Die Dimensionierung der Dachflächenfenster und Oblichter sowie die Wahl des Gesamtenergiedurchlassgrads (immer unter Berücksichtigung eines aussenliegenden Sonnenschutzes) sollte unter Berücksichtigung des Glasanteils der Fassade erfolgen. Dachfenster tragen durch die hohe Anzahl an Sonnenstunden und den dadurch bedingten hohen Eintrag an Sonneneinstrahlung mehr zur Überhitzung bei als Fassadefenster, gleichzeitig können sich diese aber auch positiv auf den Luftwechsel in Räumen auswirken. Die Anordnung der Abluftöffnung an höher gelegenen Stellen verbessert die Abgabe von warmer Luft aus den Räumen. Hohe Öffnungen sind auch wesentlich effizienter als breite Öffnungen.

Die zu öffnenden Fensterflächen sollten möglichst gleichmässig verteilt sein und eine effiziente Querlüftung ermöglichen.

²² <https://www.hslu.ch/de-ch/hochschule-luzern/forschung/projekte/detail/?pid=4245>

4.3.1.2 Qualität der Verglasung und des Sonnenschutzes

Bei gekühlten Räumen oder bei Räumen, bei denen eine Kühlung notwendig oder erwünscht ist, ist gemäss MuKE 2014 (EnDK, 2018a) der g-Wert, die Steuerung und die Windfestigkeit des Sonnenschutzes nach dem Stand der Technik einzuhalten.

Bei sämtlichen Fenstern ist ein aussen liegender und beweglicher Sonnenschutz mit einer empfohlenen Windwiderstandsklasse gemäss Norm SIA 342 (SIA, 2009), Anhang B.2, einzuhalten.

Anforderungen an den Gesamtenergiedurchlassgrad von Fassadenfenstern sind in der Norm SIA 180 (SIA, 2014a) entsprechend dem Anteil der Verglasung und der Orientierung der Fassade festgelegt. Allerdings sollten diese Werte vor allem bei Fassaden mit Orientierungen zwischen Südsüdost und Südsüdwest strenger definiert sein. Bei diesen Fassaden sollte der g-Wert des Glases inkl. Sonnenschutz kleiner als 0.1 sein.

Der g-Wert der Verglasung sollte in Räumen mit Orientierungen zwischen Südsüdost und Südsüdwest und einem Glasanteil von mehr als 30% zwischen 0.3 und 0.45 liegen. Zusätzlich sollte die Lichtdurchlässigkeit der Verglasung mitberücksichtigt werden, um gleichzeitig auch eine gute Tageslichtversorgung in den Räumen zu garantieren.

Feste Sonnenschutzelemente sowie die Verschattung durch umliegende Gebäude sollten bei der Dimensionierung von Fenstern und weiteren Beschattungsmassnahmen berücksichtigt werden.

4.3.1.3 Nachtauskühlung

Angesichts des Klimawandels wird eine effiziente Nachtauskühlung immer mehr an Bedeutung gewinnen. Dabei sind insbesondere in Städten aufgrund des städtischen Wärmeinseleffekts höhere Temperaturen in der Nacht zu erwarten. Ein Aussenluft-Volumenstrom pro Nettogeschossfläche von mindestens $10^3 / (\text{hm}^2)$ bzw. eine Querschnittsfläche bei Öffnungen von 5 % der Nettogeschossfläche des Raumes, welche nachts geöffnet werden können, ist gemäss SIA 180 definiert (Nachweis der Nachtauskühlung) (SIA, 2014a) aber künftig nicht mehr ausreichend, um eine effiziente Nachtauskühlung zu gewährleisten.

Im Zusammenhang mit der Raumtiefe sieht die Norm SIA 180 (SIA, 2014a) für eine effiziente Nachtauskühlung folgendes vor: «bei Räumen mit einer Raumtiefe bis zur 2.5-fachen Raumhöhe genügen Fenster auf einer Fassadenseite, bei Raumtiefen von 2.5- bis 5.0-facher Raumhöhe sollen Fenster auf zwei Fassadenseiten (gegenüberliegend oder über Eck) vorhanden sein».

Die Nachtauskühlung im Sommer soll einige Stunden überlappend zur Raumkühlung laufen. Optimal in den frühen Morgenstunden, wenn die Aussentemperatur niedriger ist.

Ventilatoren, welche die Luftgeschwindigkeit der Raumluft erhöhen, können zu einer Erhöhung der maximal zulässigen empfundenen Temperatur im Sommer führen, wenn u.a. eine Fensterlüftung nicht möglich ist.

4.3.1.4 Wärmespeicherfähigkeit

Eine mittlere Wärmespeicherfähigkeit – von mindestens $45 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$ – ist bei einer genügend hohen aktiven thermischen Gebäudemasse (Böden, Wände und Decken sollen möglichst nicht mit wärmedämmenden Innenoberflächen bedeckt werden) anzustreben.

Dies trägt dazu bei, thermische Schwankungen im Raum zu minimieren und Temperaturspitzen zu vermeiden.

4.3.1.5 Wärmedämmung

Die Grenzwerte für die Anforderungen an die thermische Gebäudehülle müssen nach SIA 380/1 (SIA, 2016) eingehalten werden. Um den Wärmeeintritt von aussen in das Gebäude zu vermeiden (Sommer) und um einen effizienten Betrieb sicherzustellen (Winter), ist eine gut isolierte Gebäudehülle unerlässlich. U-Werte sollten so niedrig wie möglich gehalten werden, insbesondere für die Decke.

4.3.1.6 Reduktion interner Lasten

Geräte sowie Beleuchtungen müssen so energieeffizient (Energieverbrauch im Betrieb und im Stand-by) wie möglich ausgewählt und betrieben werden.

4.3.1.7 Automatisierter Sonnenschutz und Fensterlüftung

Ein korrekter Umgang mit Sonnenschutzelementen und eine effiziente Nachtauskühlung werden – insbesondere angesichts des Klimawandels – zunehmend an Bedeutung gewinnen. Die Effizienz dieser beiden Systeme ist jedoch stark vom Nutzerverhalten abhängig. Bewohner/innen sollten diesbezüglich informiert und ihnen die Bedeutung ihres Handelns aufgezeigt werden. Kann trotzdem kein angenehmes Innenraumklima im Sommer garantiert werden bzw. möchte man die Verantwortung nicht allein dem Nutzenden übergeben, kann die Automatisierung dieser beiden Systeme eine zielführende Lösung darstellen.

Eine automatisierte Steuerung des Sonnenschutzes ist erst dann anzustreben, wenn eine korrekte Nutzung der Beschattungssysteme und der natürlichen Lüftung nicht sichergestellt werden kann. Die Steuerung sollte mit Hilfe eines fassadenorientierten Strahlungssensors erfolgen. Ein Grenzwert der Globalstrahlung von 150 W/m^2 zur Absenkung des Sonnenschutzes wird empfohlen. Dieser Grenzwert ist kleiner als der Wert von 200 W/m^2 , den die Norm SIA 180 unter den Randbedingungen für Simulationsberechnungen im Nachweisverfahren festgelegt hat. Der Sonnenschutz von Oberlichtern muss separat gesteuert werden.

Wenn eine manuelle Fensteröffnung zu den bedarfsgerechten Zeiten (nachts oder frühmorgens) nicht gewährleistet werden kann, kann auch hier eine Automatisierung sinnvoll sein. Bei der Installation einer Automatisierung sind dabei die Eigenschaften des Gebäudes zu berücksichtigen. Ebenfalls ist zu erwähnen, dass manche Systeme eine hohe Komplexität aufweisen und somit zu einem Mehraufwand führen können (bspw. zusätzliche Kosten, Wartungsaufwand, etc.). Ob eine Automatisierung sinnvoll ist, gilt es entsprechend zu prüfen.

Es ist zu berücksichtigen, dass Automatisierungsmassnahmen sowohl technisch komplex als auch mit hohen Investitionskosten verbunden sein können.

4.3.2 Notwendigkeit der Kühlung in Wohngebäuden

Die Norm SIA 382/1 (SIA, 2014b) definiert eine erste Beurteilung der Notwendigkeit einer Kühlung anhand der internen Wärmeerträge pro Tag (Personen, Geräte und Beleuchtung) und den zusätzlich zur mechanischen Lüftung vorhandenen Möglichkeiten der Fensterlüftung mit Tabelle 1 (Abschnitt 2.2.3).

Unter Berücksichtigung der Standardwerte von internen Wärmeerträgen für Mehrfamilienhäuser (MFH) bzw. für Einfamilienhäuser (EFH) gemäss SIA Merkblatt 2024 (SIA, 2015), ist die Kühlung in einem MFH oder in bestehenden Gebäuden (sowie MFH als auch EFH) nur erwünscht, wenn keine Fensterlüftung im Gebäude möglich ist. Mit einer Fensterlüftung bei Belegung oder mit einer Fensterlüftung frühmorgens und in der Nacht ist eine Kühlung nicht notwendig. In einem EFH ist eine Kühlung auch ohne Fensterlüftung nicht notwendig.

Solare Wärmeerträge werden bei dieser Beurteilung (Norm SIA 382/1) jedoch nicht berücksichtigt und können daher bei der Beurteilung zu Fehlinterpretationen führen. Es gelten jedoch in jedem Fall die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz gemäss Norm SIA 180 (SIA, 2014a). Dementsprechend sollten die solaren Wärmeerträge begrenzt werden, damit diese erste Beurteilung eine korrekte Bewertung ergibt.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob diese Bewertung im Hinblick auf zukünftige Klimabedingungen noch adäquat ist oder angepasst werden muss.

In einem wärmeren Klima wird die Wirkung der Fensterlüftung reduziert. Es wird daher zukünftig notwendig sein, die Wirksamkeit der Fensterlüftung sowie die Mindestanforderungen an die Öffnungsflächen zu bewerten.

Dies kann eine Verschärfung der Anforderung von einem Aussenluft-Volumenstrom pro Nettogeschossfläche von mindestens $10 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ bzw. einer freien Strömungsfläche von 5 % der Nettogeschossfläche des Raumes, welche nachts offenbleiben kann, für eine effiziente Nachauskühlung der Gebäudemasse bedeuten, wie die Ergebnisse des Abschnitts 4.1 gezeigt haben.

Daher müssen die derzeit festgelegten Anforderungen zur Beurteilung der Notwendigkeit einer Kühlung geprüft und ggf. angepasst werden.

4.3.3 Mindestanforderungen für mobile Kompaktgeräte und Split-Systeme unter einer Kälteerzeugerleistung von 12 kW

Die SIA 382/1 (SIA, 2014b) legt energetische Anforderungen an wassergekühlte und an luftgekühlte Kältemaschinen ab 12 kW Kälteerzeugerleistung fest. Split-Systeme mit einer Kälteerzeugerleistung von weniger als 12 kW sollten jedoch auch energetische Anforderungen erfüllen. Entsprechend ist es in der Verantwortung der Kantone, die Mindestanforderungen an die Energieeffizienz von Split-Anlagen festzulegen, welche nicht unter die SIA-Vorschriften fallen, jedoch eine Baubewilligung benötigen.

Unter Berücksichtigung des aktuellen Stands der Technik sollten die folgenden Systeme mit einer hohen Effizienz angestrebt werden:

- Für Split-Geräte mit einer Kühlleistung kleiner als 4 kW: Energieeffizienzklasse A+++ im Kühlbetrieb und A++ im Heizbetrieb.
- Für Split-Geräte mit einer Kühlleistung grösser als 4 kW und Multi-Split-Systeme für mehrere Räume: Energieeffizienzklasse A++ im Kühlbetrieb und A+ im Heizbetrieb.

Das Kältemittel der Anlage muss ein GWP von weniger als 750 aufweisen, daher ist das Kältemittel R32 eine gute Lösung. Während Anlagen mit dem Kältemittel R410A, welches ein dreimal so hohes Treibhauspotential hat, vermieden werden sollten.

Neben diesen Energieeffizienz-Mindestanforderungen sollte zusätzlich die Verbindlichkeit zur regelmässigen Kontrolle und Wartung der Anlagen vorgeschrieben werden, um die Leistungsreduzierung oder die Leckage von Kältemitteln zu vermeiden.

Bei kompakten Geräten, welche prinzipiell keine Baubewilligung erfordern, sollte ein strengerer Zulassungs-Grenzwert festgesetzt werden als der in der Verordnung (EU) Nr. 206/2012 (Europäisches Parlament, 2012) zurzeit festgelegte Wert. Die Verordnung verbietet seit 2014 den Verkauf in der EU und der Schweiz von ineffizienten Klimageräten. Für Kompaktgeräte entspricht die Energieeffizienz-Mindestanforderung der Klasse B. Angesichts des geringen Wirkungsgrades dieser Geräte-Klasse ist jedoch eine strengere Energieeffizienz-Mindestanforderung zu empfehlen.

4.3.4 Energieverbrauch und der Beitrag von erneuerbaren Quellen zur Kühlung

Die Begrenzung des Klimakältebedarfs wird in der MuKE 2014 (EnDK, 2018) indirekt durch den Grenzwert des gewichteten Energiebedarfs pro Jahr für Heizung, Warmwasser, Lüftung und Klimatisierung berücksichtigt.

Die Anforderung an den maximalen elektrischen Leistungsbedarf zur Kühlung von Neubauten wurde im Artikel 1.21 «Kühlen, Be- und Entfeuchten (V)» in der Nachführung der MuKE 2014 von 2018 (EnDK, 2018) gestrichen.

Diese Anforderung entspricht denjenigen, welche in der Norm SIA 382/1 (SIA, 2014b) für Anlagen mit kleinem elektrischem Leistungsbedarf festgelegt wurden. In der Norm SIA 382/1 (SIA, 2014b) ist diese Anforderung nur für Fälle festgelegt, wo eine Kühlung nach dem vereinfachten oder vertieften Verfahren höchstens erwünscht oder gar nicht notwendig ist, aber trotzdem eine Kühlung vorgesehen wird. Daher ist diese Anforderung, obwohl diese aus der MuKE gestrichen wurde, in den von der SIA 382/1 (SIA, 2014b) definierten Fällen gültig. Diese von der Norm vorgegebenen Werte werden als angemessen erachtet.

Daher werden sowohl der Klimakältebedarf als auch der elektrische Leistungsbedarf in den Vorschriften definiert.

Im Teil D der MuKE 2014 (EnDK, 2018) «Anforderungen an die Deckung des Wärmebedarfes von Neubauten» werden die Kantone aufgefordert, Vorschriften für den maximal zulässigen Anteil von nicht erneuerbaren Energien zur Deckung des Wärmebedarfs für Heizung und Warmwasser zu erlassen. Ebenso erscheint es empfehlenswert, dass die MuKE ein ähnliches Kriterium für die Deckung des Stromverbrauchs der Kühlung miteinbezieht.

Die Anforderungen können dahingehend erweitert werden, dass ein Teil des Stromverbrauchs für die Kühlung durch erneuerbare Energien gedeckt oder aus einer erneuerbaren Quelle, wie bspw. See- oder Grundwasser, bezogen werden muss.

Die Nutzung natürlicher Quellen zur Kühlung sollte bevorzugt werden. Das gilt insbesondere für Systeme, welche saisonal arbeiten und deren Nutzung als Kühlsystem die Regeneration der Wärmequelle fördert (z. B. Geocooling²³ durch Erdsonden). Systeme, welche Luft als Kühlquelle – wie z.B. Luft-Wasser Wärmepumpen – verwenden, sollten nicht vorrangig genutzt werden, solange die Fortluft nicht mit einer Wärmerückgewinnung oder einer Nutzung der Wärme der Abluft ausgerüstet wird.

²³Geocooling: Abgabe der Wärme an das Erdreich über dieselben Erdsonden, die im Winter Umgebungswärme für die Wärmepumpen liefern (Settembrini, et al., 2017).

5. Diskussion

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die aktive Kühlung in Wohngebäuden bei einer breiten Bevölkerung ein immer wichtigeres Thema werden wird. Es ist daher zwingend erforderlich, dass sowohl bei Neubauten als auch bei Sanierungen Massnahmen zur Vermeidung von solaren und internen Wärmege winnen sowie Massnahmen zur Abfuhr von entstandenen Wärmelasten zur Reduzierung des Kühlbedarfs berücksichtigt werden.

Unter den in dieser Studie getroffenen Annahme führt die Installation eines Kühlgerätes in den meisten Fällen zu einem Energiebezug aus dem Netz. Zudem verursachen Klimageräte ebenso Aussen- und Innenlärm, können klimaschädliche Kältemittel enthalten und geben die anfallende Abwärme an die Umwelt ab. Deshalb sollte die Umsetzung **alternativer Massnahmen, wie Free-Cooling**, mit geringerem oder keinem zusätzlichen Energieverbrauch, der Anschluss an ein Fernkältenetz mit einer erneuerbaren Energiequelle, wie z.B. Seewasser, oder Systeme, welche saisonal arbeiten und deren Nutzung als Kühlsystem die Regeneration der Wärmequelle ermöglicht (z.B. Geocooling durch Erdsonden), priorisiert werden. Eine reversible Wärmepumpe ist eine gute Option und vermeidet die Installation eines neuen Systems, das nur zum Kühlen verwendet wird. Diese Systeme können dazu beitragen ein angenehmes Raumklima im Sommer – auch angesichts des Klimawandels – zu garantieren und gleichzeitig den Einsatz ineffizienter Systeme, wie z.B. mobiler Kompaktgeräte, zu vermeiden. Eine reversible Luft-/Wasserwärmepumpe hat – ebenso wie Kühlgeräte – den Nachteil, dass sie ihre Abwärme an die Umgebungsluft abgeben, was das Mikroklima der Umgebung verschlechtert und das Problem des Wärmeinseleffekts in städtischen Umgebungen verschärft. Im Rahmen des Projekts «ResCool: Klimaanpassung von Neu-, Um- und bestehenden Wohnbauten – effiziente Kühlkonzepte» der Hochschule Luzern (Koschenz, et al., 2021) wurden verschiedene Kälteerzeugungs- und Kälteabgabesysteme unter Berücksichtigung der Wirksamkeit (Überhitzungsstunden), der Kosten (Investitions-, Betriebs- und Rückbaukosten), der Treibhausgasemissionen (Erstellung, Betrieb und Rückbau), der Akzeptanz der Bewohnenden sowie dem Ausführungszeitpunkt untersucht.

Tabelle 22 stellt den Stromverbrauch für Klimakälte für die Kühlung der ganzen Wohnung mit mobilen Kompaktgeräten und Split-Geräten bei verschiedenen **Solltemperaturen** dar. Wie in Abschnitt 4.2.2.3 beschrieben, ist der Stromverbrauch bei einer Solltemperatur von 24 °C bei einer ganztägigen Kühlung mit mobilen Kompaktgeräten ungefähr doppelt so hoch wie mit Split-Systemen. Bei einer Solltemperatur von 22 °C liegt dieser Mehrverbrauch bei 120 % für das Klima in Basel und bei 110 % für das Klima in Lugano. Bei einer Solltemperatur von 25.5 °C liegt der Stromverbrauch um 70 % für das Klima in Basel und um 85 % höher für das Klima in Lugano im Vergleich zum Split-System.

Mit den Kompaktgeräten liegt der Stromverbrauch für die Kühlung der ganzen Wohnung im Medianjahr der zukünftigen Periode A1B bei 12.7 kWh/(m²a) und 2.8 kWh/(m²a) bei einer Solltemperatur von 22 °C und 25.5°C für das Klima in Basel. Am Standort Lugano liegt dieser Stromverbrauch bei 15.9 kWh/(m²a) und 5.8 kWh/(m²a). Der Stromverbrauch kann jedoch im wärmsten Jahr der Referenzperiode sowie im warmen Jahr der Periode A1B noch höher liegen und beträgt 18.4 kWh/(m²a) und 7.0 kWh/(m²a) bei einer Solltemperatur von 22 °C und 25.5°C für das Klima in Basel und 22.8 kWh/(m²a) und 11.0 kWh/(m²a) für das Klima in Lugano.

Die **Nutzungsdauer** der Kühlung wirkt sich ebenfalls auf den Klimakälteverbrauch aus, wenn auch in geringerem Masse als die Solltemperatur. Bei mobilen Kompaktgeräten ist der Stromverbrauch für die ganztägige Kühlung für das Klima in Basel um 15-25 % und für das Klima in Lugano um 15-20 % höher als der Stromverbrauch bei einer Kühlung nur bei Belegung. Bei Split-Systemen liegt der Stromverbrauch im Vergleich zur ganztägigen Kühlung bei Split-Systemen bei 30-35 % für das Klima in Basel und bei 25-30 % für das Klima in Lugano.

Tabelle 22 zeigt, wie viele Personen maximal ein mobiles Klimagerät kaufen dürften, damit die Effizienz des Gebäudes gleich gut ist im Vergleich zu einem fix installierten Split-System. Wenn 50 % der Wohnungen ungekühlt sind, 30 % der Wohnungen auf 25.5 °C und 20 % der Wohnung auf 22 °C gekühlt werden,

ist der Stromverbrauch ungefähr gleich hoch, als wenn alle Wohnungen mit einem Split-System bei einer Solltemperatur von 24 °C ganztägig gekühlt werden. In den warmen Jahren liegt der Stromverbrauch sogar etwas niedriger.

		Ref. Median-jahr (2004)	Ref. wärmstes Jahr (2003)	A1B Median-jahr (2063)	A1B warmes Jahr (2068)	Typ	Temperatur (°C)	ganze Whg.	ganzer Tag
BASEL	Mobil 22	9.1	14.0	12.7	18.4	Mobiles Gerät	22	Ja	Ja
	Mobil 24	3.8	7.9	6.4	11.8	Mobiles Gerät	24	Ja	Ja
	Mobil 25.5	1.1	4.1	2.8	7.0	Mobiles Gerät	25.5	Ja	Ja
	Mobil 22	7.9	12.0	10.9	15.6	Mobiles Gerät	22	Ja	Nein
	Mobil 24	2.9	6.7	5.3	9.8	Mobiles Gerät	24	Ja	Nein
	Mobil 25.5	1.0	3.5	2.4	6.1	Mobiles Gerät	25.5	Ja	Nein
	Split 22	4.0	6.4	5.7	8.5	Split-Gerät	22	Ja	Ja
	Split 24	1.8	4.2	3.2	6.2	Split-Gerät	24	Ja	Ja
	Split 25.5	0.7	2.4	1.7	3.6	Split-Gerät	25.5	Ja	Ja
	Split 22	2.9	4.9	4.3	6.8	Split-Gerät	22	Ja	Nein
	Split 24	1.3	3.2	2.4	4.9	Split-Gerät	24	Ja	Nein
	Split 25.5	0.5	1.8	1.2	2.8	Split-Gerät	25.5	Ja	Nein
	Szenarien mit verschiedener Dichte an mobilen Klimageräten 1)								
	20 / 40 / 40	4.1	7.2	6.2	10.2	Mobiles Gerät	variabel	Ja	Ja
	34 / 33 / 33	3.4	6.0	5.2	8.5	Mobiles Gerät	variabel	Ja	Ja
	50 / 30 / 20	2.2	4.0	3.4	5.8	Mobiles Gerät	variabel	Ja	Ja
	65 / 25 / 10	1.2	2.4	2.0	3.6	Mobiles Gerät	variabel	Ja	Ja
	75 / 20 / 5	0.7	1.5	1.2	2.3	Mobiles Gerät	variabel	Ja	Ja
	20 / 40 / 40	3.6	6.2	5.3	8.7	Mobiles Gerät	variabel	Ja	Nein
	34 / 33 / 33	2.9	5.1	4.4	7.2	Mobiles Gerät	variabel	Ja	Nein
	50 / 30 / 20	1.9	3.5	2.9	5.0	Mobiles Gerät	variabel	Ja	Nein
	65 / 25 / 10	1.0	2.1	1.7	3.1	Mobiles Gerät	variabel	Ja	Nein
	75 / 20 / 5	0.6	1.3	1.0	2.0	Mobiles Gerät	variabel	Ja	Nein
LUGANO	Mobil 22	11.8	16.3	15.9	22.8	Mobiles Gerät	22	Ja	Ja
	Mobil 24	6.1	10.1	10.0	16.4	Mobiles Gerät	24	Ja	Ja
	Mobil 25.5	2.2	6.0	5.8	11.0	Mobiles Gerät	25.5	Ja	Ja
	Mobil 22	10.2	14.1	13.6	20.3	Mobiles Gerät	22	Ja	Nein
	Mobil 24	4.6	8.5	8.4	14.2	Mobiles Gerät	24	Ja	Nein
	Mobil 25.5	2.0	5.1	4.8	9.5	Mobiles Gerät	25.5	Ja	Nein
	Split 22	5.3	7.8	7.4	11.2	Split-Gerät	22	Ja	Ja
	Split 24	2.8	5.3	5.0	8.8	Split-Gerät	24	Ja	Ja
	Split 25.5	1.3	3.2	3.0	6.0	Split-Gerät	25.5	Ja	Ja
	Split 22	4.1	6.2	5.9	9.4	Split-Gerät	22	Ja	Nein
	Split 24	2.1	4.1	3.9	7.2	Split-Gerät	24	Ja	Nein
	Split 25.5	1.0	2.5	2.4	4.9	Split-Gerät	25.5	Ja	Nein
	Szenarien mit verschiedener Dichte an mobilen Klimageräten 1)								
	20 / 40 / 40	5.6	8.9	8.7	13.5	Mobiles Gerät	variabel	Ja	Ja
	34 / 33 / 33	4.7	7.4	7.2	11.3	Mobiles Gerät	variabel	Ja	Ja
	50 / 30 / 20	3.0	5.1	4.9	7.9	Mobiles Gerät	variabel	Ja	Ja
	65 / 25 / 10	1.7	3.1	3.0	5.0	Mobiles Gerät	variabel	Ja	Ja
	75 / 20 / 5	1.0	2.0	2.0	3.3	Mobiles Gerät	variabel	Ja	Ja
	20 / 40 / 40	4.9	7.7	7.4	11.9	Mobiles Gerät	variabel	Ja	Nein
	34 / 33 / 33	4.0	6.3	6.1	9.8	Mobiles Gerät	variabel	Ja	Nein
	50 / 30 / 20	2.6	4.3	4.2	6.9	Mobiles Gerät	variabel	Ja	Nein
	65 / 25 / 10	1.5	2.7	2.6	4.4	Mobiles Gerät	variabel	Ja	Nein
	75 / 20 / 5	0.9	1.7	1.6	2.9	Mobiles Gerät	variabel	Ja	Nein

1) 50 / 30 / 20 bedeutet, dass 50 % der Wohnungen ungekühlt sind, 30 % der Wohnungen auf 25.5 °C gekühlt werden und 20 % auf 22 °C

Tabelle 22: Stromverbrauch für Klimakälte (in kWh/(m²a)) für die Kühlung der ganzen Wohnung mit mobilen Kompaktgeräten und Split-Geräten bei verschiedenen Solltemperaturen sowie für Szenarien mit verschiedener Dichte an mobilen Klimageräten während des ganzen Tages und nur bei Belegung in Abhängigkeit vom System und der Solltemperatur für das aktuelle und zukünftige Klima in Basel und Lugano.

Die **Nutzung des Klimagerätes muss sich nach der Nutzung der Wohnung richten**. Die zu klimatisierenden Räume sowie die Betriebszeiten des Klimageräts müssen an die Belegung der Wohnung gekoppelt sein. Allerdings bedeutet eine Kühlung der Wohnung nur bei Belegung nicht nur einen geringeren Stromverbrauch aus dem Netz, sondern auch eine geringere elektrische Leistung.

Eine Kühlung «bei Belegung» ist einer Kühlung über den ganzen Tag zu bevorzugen und kann durch die Kombination mit einer bedarfsgerechten Fensterlüftung – wenn die Aussentemperatur niedriger ist als die Innentemperatur – zusätzlich begünstigt werden.

Das Szenario «Basel – Mobil 24 °C bei Belegung» (Abschnitt 4.2.3) stellt eine Wohnung am Standort Basel dar, in der die Räume entsprechend ihrer Belegung gekühlt werden. Das bedeutet, dass der Wohnbereich bei einer Belegung von 06:00 bis 21:00 Uhr und die Schlafzimmer von 21:00 bis 06:00 Uhr gekühlt werden. Die Kühlung erfolgt über ein Multi-Split-System mit einer Solltemperatur von 24 °C. Beim Szenario «Basel – Mobil 24 °C ganzer Tag» werden der Wohnbereich sowie die Schlafzimmer während des ganzen Tags gekühlt. Die ganztägige Kühlung der Wohnung führt im Vergleich zur Kühlung nur bei Belegung mit einem Multi-Split-System zu einer Erhöhung des Klimakälteverbrauchs von ca. 30 % bei einer Solltemperatur von 24 °C für das Klima in Basel und Lugano. Neben der Erhöhung des Verbrauchs für Kühlung ergibt sich eine Erhöhung der elektrischen Leistung für die Kühlung zwischen 100-140 % im Klima von Basel und zwischen 60-130 % im Klima von Lugano. Der Stromverbrauch für die Kühlung liegt im Szenario mit ganztägiger Kühlung bei 1.8 kWh/(m²a) und 3.2 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel bzw. bei 2.8 kWh/(m²a) und 5.0 kWh/(m²a) für das Klima in Lugano. Im wärmsten Jahr der Referenzperiode erhöht sich der Stromverbrauch für die Kühlung auf 6.2 kWh/(m²a) für das Klima in Basel und auf 8.8 kWh/(m²a) für das Klima in Lugano. Die elektrische Leistung für die Kühlung liegt im Szenario mit ganztägiger Kühlung bei 17.5 W/m²a und 29.8 W/m² in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel bzw. bei 14.7 W/m²a und 28.4 W/m² für das Klima in Lugano.

Durch eine **Photovoltaikanlage** zur Abdeckung des Stromverbrauchs für die Kühlung ist der Anteil des Eigenverbrauchs in den Szenarien mit einer ganztägigen Kühlung und einer Kühlung nur bei Belegung mit einem Multi-Split-System sehr ähnlich.

Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von 10 W/m²_{EBF} nach MuKE (EnDK, 2018) dimensioniert wurde, deckt ca. 50-70 % des Stromverbrauchs für die Kühlung mit einem Multi-Split-System. Dies bedeutet, dass der Stromverbrauch aus dem Netz für die Kühlung im Szenario mit ganztägiger Kühlung mit einem Multi-Split-System bei einer Solltemperatur von 24 °C (Szenario «Split 24 °C ganzer Tag») bei 0.6 kWh/(m²a) und 1.0 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel bzw. bei 0.9 kWh/(m²a) und 2.1 kWh/(m²a) für das Klima in Lugano liegt.

Durch die **Kombination einer Photovoltaikanlage mit einer Batterie** mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 1.5 kWh) liegt der Anteil des Eigenverbrauchs bei ca. 60-80 % und mit einer Batterie mit einer dreimal grösseren Kapazität bei ca. 65-90 %. Bei der Kombination mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage liegt der Stromverbrauch für die Kühlung aus dem Netz bei 0.4 kWh/(m²a) und 0.7 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel bzw. bei 0.6 kWh/(m²a) und 1.7 kWh/(m²a) für das Klima in Lugano. Aufgrund des geringen Stromverbrauchs kann dieser Anteil durch die grössere Batterie (mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage, Kapazität von 4.5 kWh) jedoch nicht wesentlich reduziert werden. In diesem Fall liegt der Stromverbrauch für die Kühlung aus dem Netz bei 0.2 kWh/(m²a) und 0.4 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel bzw. bei 0.3 kWh/(m²a) und 1.3 kWh/(m²a) für das Klima in Lugano.

Somit kann festgehalten werden, dass eine angemessene Nutzung von Split-Systemen (Solltemperatur 24-25.5 °C) zu einem vertretbaren Stromverbrauch führt. Durch die Installation einer Photovoltaikanlage vor Ort kann dieser Mehraufwand zum grössten Teil mit lokal erzeugtem Strom gedeckt werden. Die Küh-

lung von Wohngebäuden führt somit nur zu einem geringen Mehrverbrauch bezogen auf den Gesamtenergieverbrauch der Wohnungen. Problematischer können die Verbrauchsspitzen sein, was aber mit einer Photovoltaikanlage teilweise gelöst werden kann. Jedoch sollte dabei auch der Beitrag dieser Anlage zur grauen Energie des Gebäudes beachtet werden. Dieser kann z.T. hoch sein (eine Photovoltaikanlage mit einer maximalen Leistung von 1 kWp liegt bei 7'390 kWh oil-eq der Primärenergie nicht erneuerbar gemäss KBOB-Liste (KBOB, 2016)). Daher sollte bei der Berechnung der Treibhausgasemissionen des Gebäudes der gesamte Lebenszyklus (einschliesslich des Strombeitrags der Photovoltaikanlage im Winter) berücksichtigt werden, um eine umweltfreundliche Lösung zu wählen.

Die Anforderungen der **aktuellen Vorschriften** stützen sich auf die Klimadaten vom Merkblatt SIA 2028 (SIA, 2010), welches auf Messdaten aus dem Zeitraum von 1984 bis 2003 basiert. Im Rahmen des Projekts «Klimadaten der Zukunft für Planende: Klimawandel und Merkblatt SIA 2028» (NCCS, 2020) des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA) werden neue Klimadaten erarbeitet, welche das zukünftige Klima auf Basis der neuen Klimaszenarien CH2018 berücksichtigen.

Der **Standardwert des jährlichen Klimakältebedarfs** für Mehrfamilienhäuser ohne Fensterlüftung und mit einer Solltemperatur von 26 °C **gemäss SIA Merkblatt 2024** (SIA, 2015) liegt bei 6.6 kWh/(m²a). Berücksichtigt man die mögliche Temperaturentwicklung aufgrund des Klimawandels, wird dieser Wert in Zukunft zu tief liegen.

Der Klimakältebedarf (Abschnitt 4.2.3.2) für die ganztägige Kühlung der Wohnung mit einem Multi-Split-System bei einer Solltemperatur von 24 °C für das Klima in Basel (Szenario «Basel – Mobil 24 °C bei Belegung») liegt im Medianjahr der Referenzperiode und der Periode A1B bei 5.6 bzw. 9.4 kWh/(m²a). Dieser Klimakältebedarf steigt auf 12.1 bzw. 16.8 kWh/(m²a) im warmen Jahr der Referenzperiode bzw. der Periode A1B.

Im Unterschied zum SIA Merkblatt 2024 (SIA, 2015) wurde in dieser Studie eine Fensterlüftung in dem Zeitraum von 06:00 bis 07:00 Uhr und 18:00 bis 22:00 Uhr und ein nur zu 2/3 geschlossener Sonnenschutz (anstelle einer vollständigen Schliessung des Sonnenschutzes) berücksichtigt. Während der Klimakältebedarf des Szenarios «Basel – Mobil 24 °C bei Belegung» im Medianjahr der Referenzperiode unter dem festgelegten Standardwert des Merkblattes liegt, ist dieser im wärmsten Jahr der Referenzperiode praktisch doppelt so hoch.

Das Szenario «Lugano – Mobil 24 °C bei Belegung» entspricht demselben Szenario jedoch befindet sich die Wohnung am Standort Lugano (unter Berücksichtigung des Klimas von Lugano). In diesem Fall liegt der Klimakälteverbrauch im Medianjahr der Referenzperiode und der Periode A1B bei 9.2 bzw. 14.8 kWh/(m²a). Dieser Klimakältebedarf steigt auf 15.7 bzw. 24.2 kWh/(m²a) im warmen Jahr der Referenzperiode bzw. der Periode A1B.

Ebenso ist es empfehlenswert die **Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz gemäss Norm SIA 180** (SIA, 2014a) **unter Berücksichtigung des zukünftigen Schweizer Klimas zu überprüfen**. Dazu gehört es, den Mindest-Aussenluft-Volumenstrom pro Nettogeschossfläche zur Gewährleistung einer effizienten Nachtauskühlung, den Gesamtenergiedurchlassgrad im Sommer bei Fassaden mit Orientierungen zwischen Südsüdost und Südsüdwest sowie bei einer Automatisierung der Absenkung des Sonnenschutzes einen tieferen Grenzwert der Globalstrahlung (wenn eine manuelle Absenkung des Sonnenschutzes zu den bedarfsgerechten Zeiten nicht gewährleistet werden kann) zu definieren. Dies steht im Einklang mit den Vorschriften der MuKE (EnDK, 2018a), Art. 1.8, die festlegt, dass die Anforderungen an den g-Wert, die Steuerung und die Windfestigkeit des Sonnenschutzes nach dem Stand der Technik bei gekühlten Räumen oder bei Räumen, bei welchen eine Kühlung notwendig oder erwünscht ist (gemäss Norm SIA 382/1 (SIA, 2014b), Ziffer 4.5.3.1 definiert), einzuhalten sind.

Ebenso gilt es sicherzustellen, dass auch bei einer möglichen Zunahme von Kühlsystemen bei Wohngebäuden (insbesondere angesichts des Klimawandels) die Erreichung der Ziele der schweizerischen Ener-

giestrategie 2050²⁴ nicht behindert werden. Es könnte sinnvoll sein, die **MuKE**n mit zusätzlichen Anforderungen an die Kühlung zu erweitern. Diese Anforderungen könnten analog den «Anforderungen an die Deckung des Wärmebedarfes von Neubauten» aufbereitet werden. Die Kantone sollten aufgefordert werden, Vorschriften für den **maximal zulässigen Anteil von nicht erneuerbaren Energien zur Deckung des Energieverbrauchs für die Kühlung** (z. B. durch eine Photovoltaikanlage vor Ort oder durch Geocooling mittels Erdsonden) miteinzubeziehen. Diese Anforderungen können die Deckung eines Teils des Stromverbrauchs für die Kühlung durch erneuerbare Energien sowie die **Nutzung natürlicher Kühlquellen**, wie bspw. mittels Seewasser, einfordern. Ebenso sollte die Nutzung von Kühlsystemen zur Regeneration von Wärmequellen (z.B. über Erdwärmesonden bei reversiblen Wärmepumpen) gefördert werden.

Die Festlegung von **Mindestanforderungen an die Energieeffizienz von Split-Anlagen**, welche eine Baubewilligung benötigen, liegt in der Verantwortung der Kantone. Diese sollten nicht nur Anforderungen an die Energieeffizienz der Anlage, sondern auch an die Wartung sowie die zulässigen Kältemittelarten beinhalten. Bei **kompakten Geräten** sollte ein **strengerer Zulassungs-Grenzwert** festgesetzt werden als der zurzeit in der Verordnung (EU) Nr. 206/2012 (Europäisches Parlament, 2012) geltende Wert.

²⁴<https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energiestrategie-2050.html>

6. Schlussfolgerungen

Die Sicherstellung eines behaglichen Raumklimas durch **Massnahmen für den sommerlichen Wärmeschutz** (sowohl im Gebäude als auch in der Umgebung) sowie durch den **angemessenen Einsatz von Sonnenschutz und Fensterlüftung** in Wohngebäuden ist der Ausgangspunkt für ein energieeffizientes Gebäude. Wenn die Notwendigkeit eines Kühlsystems sorgfältig geprüft wurde, sollten vorrangig Systeme genutzt werden, welche die Wärme aus Siedlungsgebieten abführen und über einen hohen Anteil an Freecooling verfügen. Dazu gehören z.B. Wärmepumpen, welche auf Erdsonden (für eine einfache und effiziente Regenerationsmöglichkeit der Sonden), Anergienetze oder Grund- und Oberflächenwasser basieren. Ebenso sollte geprüft werden, ob ein Teil des Stromverbrauchs für die Kühlung durch vor Ort produzierten Strom gedeckt werden kann.

Wenn diese Lösungen nicht möglich sind, sollten Systeme mit einer hohen Energieeffizienz angestrebt werden. Split-Systeme (A++/A+++) sind eine mögliche Alternative, wenn die oben genannten Systeme oder andere Systeme, wie bspw. reversible Wärmepumpen, nicht implementiert werden können. Für Klimageräte sollten die folgenden **Energieeffizienzklassen** angestrebt werden:

- Für Split-Geräte mit einer Kühlleistung kleiner als 4 kW: Energieeffizienzklasse A+++ im Kühlbetrieb und A++ im Heizbetrieb.
- Für Split-Geräte mit einer Kühlleistung grösser als 4 kW und bei Multi-Split-Systemen für mehrere Räume: Energieeffizienzklasse A++ im Kühlbetrieb und A+ im Heizbetrieb.
- Für mobile Kompaktgeräte: Energieeffizienzklasse A+++.

Die derzeitige Skala für Klimageräte wird voraussichtlich in den nächsten Jahren durch eine neue, einfachere Skala von A (höchste Effizienz) bis G (geringste Effizienz) ersetzt werden, wie es bereits für Kühlgeräte, Geschirrspüler, Waschmaschinen und Fernsehgeräte gemacht wurde. Bis dahin ist es notwendig, Geräte mit der Energieeffizienzklasse A++ oder A+++ , wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, zu priorisieren.

Das Kältemittel der Anlage muss ein GWP (auf Englisch *Global Warming Potential*, siehe Abschnitt 1.2) von weniger als 750 aufweisen, daher ist das Kältemittel R32 eine gute Lösung. Optimal wäre das Kältemittel R290 (Propan) mit einem GWP von 3 aber derzeit gibt es keine Klimageräte, die mit diesem Kältemittel arbeiten. Anlagen mit dem Kältemittel R410A, welches ein dreimal so hohes Treibhauspotential hat und ab dem 1. Januar 2025 verboten wird, sollten vermieden werden.

Zur Senkung des Energieverbrauchs von Kühlgeräten wurden die nachfolgenden Massnahmen untersucht (Abschnitt 4.2.2):

- Gerätetyp (Split-Systeme).
- Solltemperatur.
- Anzahl gekühlter Räume.
- Betriebszeiten der Kühlgeräte.

Um diese verschiedenen Massnahmen zu vergleichen, wurde ein Szenario definiert. Mit diesem Szenario wurde angenommen, dass die ganze Wohnung während des ganzen Tages mit einer Solltemperatur von 22 °C gekühlt wird. Der Stromverbrauch für die Kühlung mit mobilen Geräten liegt in diesem Szenario für das Klima in Basel bei 9.1 kWh/(m²a) für das Medianjahr der Referenzperiode, bei 14.0 kWh/(m²a) für das wärmste Jahr der Referenzperiode, bei 12.7 kWh/(m²a) für das Medianjahr der Periode A1B und bei 18.4 kWh/(m²a) für das warme Jahr der Periode A1B. Für das Klima in Lugano beträgt der Stromverbrauch für die Kühlung 11.8 kWh/(m²a), 16.3 kWh/(m²a), 15.9 kWh/(m²a) und 22.8 kWh/(m²a) für die zuvor genannten Jahre.

Wie erwartet, hat die **Effizienz des Kühlgerätes** einen grossen Einfluss auf den Stromverbrauch für die Kühlung. Bei einem **Multi-Split-System** sinkt der Stromverbrauch für die Kühlung im Vergleich zu einem

mobilen Kompaktgerät stark. Die Reduzierung des Stromverbrauchs für die Kühlung beträgt ca. 50 %. Diese Reduktion kann etwas höher liegen, wenn die Solltemperatur 22 °C beträgt, wenn nur das Schlafzimmer gekühlt wird (ganztäglich oder nur bei Belegung) oder bei einer Kühlung nur bei Belegung (sowohl für die gesamte Wohnung als auch für die Kühlung einzelner Räume, wie des Wohnbereichs oder der Schlafzimmer). Die Reduktion kann etwas tiefer liegen, wenn nur der Wohnbereich gekühlt wird (ganztäglich oder nur bei Belegung). Für das Klima in Basel liegt der Stromverbrauch (für die Kühlung der ganzen Wohnung, während des ganzen Tages) mit mobilen Kühlgeräten in einem Medianjahr der Referenzperiode bei 9.1 kWh/(m²a), 3.8 kWh/(m²a) bzw. 1.1 kWh/(m²a) bei einer Solltemperatur von 22 °C, 24 °C bzw. 25.5 °C. Dieser Stromverbrauch reduziert sich mit Split-Systemen auf 4.0 kWh/(m²a), 1.8 kWh/(m²a) bzw. 0.7 kWh/(m²a) bei einer Solltemperatur von 22 °C, 24 °C bzw. 25.5 °C. Für das Klima in Lugano liegt der Stromverbrauch bei 11.8 kWh/(m²a), 6.1 kWh/(m²a) bzw. 2.2 kWh/(m²a) bei einer Solltemperatur von 22 °C, 24 °C bzw. 25.5 °C. Dieser Stromverbrauch reduziert sich mit Split-Systemen auf 5.3 kWh/(m²a), 2.8 kWh/(m²a) bzw. 1.3 kWh/(m²a) bei einer Solltemperatur von 22 °C, 24 °C bzw. 25.5 °C.

Die **Solltemperatur** sowie die **Anzahl der gekühlten Räume** haben einen sehr hohen Einfluss auf den Verbrauch des Klimagerätes. Auch die **Betriebszeit der Kühlung** hat einen bedeutenden Einfluss auf den Klimakälteverbrauch.

Der Klimakälteverbrauch in Abhängigkeit zur **Solltemperatur** variiert je nach Klimastandort, Gerätetyp und Jahr. Der Stromverbrauch für die Kühlung (der ganzen Wohnung, während des ganzen Tages) in Basel mit mobilen Kühlgeräten mit einer Solltemperatur von 24 °C beträgt 3.8 kWh/(m²a) und 6.4 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden. Bei einer Solltemperatur von 25.5 °C liegt der Stromverbrauch bei 1.1 kWh/(m²a) bzw. 2.8 kWh/(m²a). Dies führt zu einer Reduzierung des Klimakälteverbrauchs von 50-60 % bzw. 80-90 % im Vergleich zu einer Solltemperatur von 22 °C in einem Medianjahr beider Perioden (deren Stromverbrauch liegt bei 9.1 kWh/(m²a) und 12.7 kWh/(m²a)). Eine Solltemperatur von 24 °C oder 25.5 °C führt in Lugano zu einer Reduktion des Klimakälteverbrauchs von 45-55 % bzw. 70-85 % im Vergleich zu einer Solltemperatur von 22 °C in einem Medianjahr beider Perioden. Mit Split-Geräten ist diese Reduktion um 5 % geringer für das Klima in Basel und um 5-10 % geringer für das Klima in Lugano. In einem warmen Jahr ist diese Reduktion um 15-20 % geringer.

		Ref. Medianjahr (2004)			Ref. wärmstes Jahr (2003)			A1B Medianjahr (2063)			A1B warmes Jahr (2068)		
		22 °C	24 °C	25.5 °C	22 °C	24 °C	25.5 °C	22 °C	24 °C	25.5 °C	22 °C	24 °C	25.5 °C
BASEL	Mobiles Gerät	9.1	3.8	1.1	14.0	7.9	4.1	12.7	6.4	2.8	18.4	11.8	7.0
	Split-Gerät	4.0	1.8	0.7	6.4	4.2	2.4	5.7	3.2	1.7	8.5	6.2	3.6
LUGANO	Mobiles Gerät	11.8	6.1	2.2	16.3	10.1	6.0	15.9	10.0	5.8	22.8	16.4	11.0
	Split-Gerät	5.3	2.8	1.3	7.8	5.3	3.2	7.4	5	3	11.2	8.8	6

Tabelle 23: Stromverbrauch für Klimakälte (in kWh/(m²a)) für die Kühlung der ganzen Wohnung während des ganzen Tages in Abhängigkeit vom Klimagerät und der Solltemperatur für das aktuelle und zukünftige Klima in Basel und Lugano.

Werden **nur einzelne Räume der Wohnung** gekühlt, kann der Stromverbrauch für Kühlung weiter reduziert werden. Wird nur der Wohnbereich gekühlt, führt dies zu einem 45 % und 40 % tieferem Klimakälteverbrauch für die ganz tägliche Kühlung mit mobilen Geräten bzw. Split-Geräten (im Vergleich zur Kühlung der ganzen Wohnung). Diese Reduktion ist bei einer Kühlung nur bei Belegung geringer und beträgt bei mobilen Geräten 35 % und bei Split-Geräten 25 %. Werden nur die Schlafzimmer gekühlt, kann der Klimakälteverbrauch weiter reduziert werden und liegt bei 50 % und 55 % für die ganz tägliche Kühlung mit mobilen Geräten bzw. Split-Geräten und bei 65-75 % für eine Kühlung nur bei Belegung. Wird die Wohnung jedoch nur teilweise gekühlt (d.h. nur einzelne Räume), führt dies zu einer hohen Anzahl an Überhitzungsstunden in den nicht gekühlten Räumen. Die Ergebnisse verschiedener Szenarien sind in Tabelle 24 dargestellt.

		Ref. Median- jahr (2004)	Ref. wärmstes Jahr (2003)	A1B Median- jahr (2063)	A1B warmes Jahr (2068)	Typ	Temperatur (°C)	ganze Whg.	ganzer Tag
BASEL	Mobil 22 - Wohnung	9.1	14.0	12.7	18.4	Mobiles Gerät	22.0	Ja	Ja
	Mobil 22 - Wohnbereich	4.8	7.7	6.8	10.1	Mobiles Gerät	22.0	Nein	Ja
	Mobil 22 - Schlafzimmer	4.5	1.6	0.4	7.1	Mobiles Gerät	22.0	Nein	Ja
LUGANO	Mobil 22 - Wohnung	11.8	16.3	15.9	22.8	Mobiles Gerät	22.0	Ja	Ja
	Mobil 22 - Wohnbereich	6.4	8.9	8.3	12.9	Mobiles Gerät	22.0	Nein	Ja
	Split 22 - Schlafzimmer	6.3	2.8	1.0	8.3	Split-Gerät	22.0	Nein	Ja

Tabelle 24: Stromverbrauch für Klimakälte (in kWh/(m²a)) für die Kühlung der ganzen Wohnung während des ganzen Tages in Abhängigkeit vom System und der Solltemperatur für das aktuelle und zukünftige Klima in Basel und Lugano.

Bezüglich der **Betriebszeit der Kühlung** bewirkt eine Kühlung nur bei Belegung im Vergleich zur ganztägigen Kühlung der Wohnung eine Reduktion des Klimakälteverbrauchs von ca. 10-30 %. Der Stromverbrauch für die Kühlung der ganzen Wohnung mit mobilen Kühlgeräten während dem ganzen Tag mit einer Solltemperatur von 22 °C liegt bei 9.1 kWh/(m²a) und 12.7 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel. Bei einer Kühlung nur bei Belegung liegt der Stromverbrauch bei 7.9 kWh/(m²a) und 10.9 kWh/(m²a). Diese Differenz ist bei Split-Systemen prozentual betrachtet noch ausgeprägter (ca. 20-30 %). Der Stromverbrauch für die Kühlung nur bei Belegung liegt bei Split-Systemen bei 2.9 kWh/(m²a) und 4.3 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel. Bei einer ganztägigen Kühlung steigt der Stromverbrauch auf 4.0 kWh/(m²a) und 5.7 kWh/(m²a) an.

Wird nur der Wohnbereich gekühlt, ist die Differenz zwischen den oben beschriebenen Varianten deutlich geringer (ca. 5 %), da der Wohnbereich tagsüber belegt ist, wenn die Nutzung des Klimageräts grösstenteils erfolgt. Der Stromverbrauch für die Kühlung des Wohnbereichs mit mobilen Kühlgeräten während des ganzen Tages mit einer Solltemperatur von 22 °C liegt bei 4.8 kWh/(m²a) und 6.8 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel. Wird nur bei Belegung gekühlt, liegt der Stromverbrauch bei 4.6 kWh/(m²a) und 6.6 kWh/(m²a). Der Stromverbrauch für die Kühlung des Wohnbereichs nur bei Belegung liegt bei Split-Systemen bei 2.1 kWh/(m²a) und 3.0 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel. Bei einer ganztägigen Kühlung steigt der Stromverbrauch auf 2.2 kWh/(m²a) und 3.2 kWh/(m²a) an.

Bei einer Kühlung in den Schlafzimmern ist die Reduktion abhängig vom betrachteten Jahr, von der Solltemperatur und vom Gerätetyp. Bei mobilen Kompaktgeräten reduziert sich der Klimakälteverbrauch um 30-55 %, bei Split-Systemen halbiert sich dieser in fast allen Fällen, vor allem im Klima von Basel. Diese Reduktion ist grösser, da durch eine Kühlung nur bei Belegung die Schlafzimmer nur nachts gekühlt werden, wenn zeitgleich die Aussen- und Innentemperaturen niedriger sind. Der Stromverbrauch für die Kühlung der Schlafzimmer mit mobilen Kühlgeräten während des ganzen Tages mit einer Solltemperatur von 22 °C liegt bei 4.5 kWh/(m²a) und 6.5 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel. Wird nur bei Belegung gekühlt, liegt der Stromverbrauch bei 3.2 kWh/(m²a) und 4.6 kWh/(m²a). Der Stromverbrauch für die Kühlung der Schlafzimmer nur bei Belegung liegt bei Split-Systemen bei 0.9 kWh/(m²a) und 1.4 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel. Bei einer ganztägigen Kühlung steigt der Stromverbrauch auf 2.0 kWh/(m²a) und 2.7 kWh/(m²a) an.

Weitere Parameter, die einen wichtigen Einfluss auf den Stromverbrauch für Kühlung haben, ist der Klimastandort sowie der Temperaturanstieg aufgrund des Klimawandels. Vergleicht man ein warmes **Klima** in der Südschweiz, wie z.B. in Lugano, mit einem Klima im Schweizer Mittelland, wie z.B. in Basel, so ist der Anstieg des Klimakälteverbrauchs beträchtlich. Je nach eingestellter Solltemperatur liegt der Klimakälteverbrauch für das Klima in Lugano für ein Medianjahr ca. 25-40 %, 55-65 % bzw. 70-110 % höher im Vergleich zum Klima in Basel bei einer Solltemperatur von 22 °C, 24 °C und 25.5 °C. In den warmen Jahren beider Perioden ist der Anstieg des Stromverbrauchs etwas geringer. Wie in Tabelle 24 gezeigt, liegt der Stromverbrauch für die Kühlung der ganzen Wohnung mit mobilen Kühlgeräten, während des ganzen

Tages mit einer Solltemperatur von 22 °C bei 9.1 kWh/(m²a) und 12.7 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel und bei 11.8 kWh/(m²a) und 15.9 kWh/(m²a) für das Klima in Lugano. Die Kühlung mit Split-Systemen und mit einer Solltemperatur von 24 °C liegt bei 3.8 kWh/(m²a) und 6.4 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel und bei 6.1 kWh/(m²a) und 10 kWh/(m²a) für das Klima in Lugano.

Die vorliegende Studie bestätigt die These, die dieser Untersuchung zugrunde liegt: Der **Klimawandel** wird zu einem Anstieg des Kühlverbrauchs führen. Dieser Anstieg variiert in Abhängigkeit von der Solltemperatur und dem Klimastandort, die Betriebszeit hat keinen signifikanten Einfluss. Im Wohnbereich ist der Anstieg des Stromverbrauchs etwas geringer, im Schlafzimmer ist er höher, insbesondere bei einer Solltemperatur von 25.5 °C. Der Anstieg des Stromverbrauchs für die Kühlung im Medianjahr der zukünftigen Periode A1B im Vergleich zum Medianjahr der Referenzperiode beträgt für das Klima in Basel für die Kühlung mit mobilen Geräten 40-45 % bei einer Solltemperatur von 22 °C, 70-80 % bei einer Solltemperatur von 24 °C und 100-155 % bei einer Solltemperatur von 25.5 °C. Der Anstieg des Stromverbrauchs für die Kühlung aufgrund des Klimawandels ist für das Klima in Lugano etwas weniger ausgeprägt. Dieser Anstieg beträgt 30-40 % bei einer Solltemperatur von 22 °C, 60-80 % bei einer Solltemperatur von 24 °C und 120-165 % bei einer Solltemperatur von 25.5 °C.

Der Anstieg des Stromverbrauchs für die Kühlung im warmen Jahr der zukünftigen Periode A1B im Vergleich zum Medianjahr der Referenzperiode ist viel höher: der Klimakälteverbrauch verdoppelt sich im Vergleich zum Medianjahr der Referenzperiode in fast allen Fällen. D.h. um das 2-fache bei einer Solltemperatur von 22 °C, um mehr als das 3-fache bei einer Solltemperatur von 24 °C und um mehr als das 6-fache bei einer Solltemperatur von 25.5 °C für die Kühlung mit mobilen Geräten. Für das Klima in Lugano beträgt dieser Anstieg 90-110 % bei einer Solltemperatur von 22 °C, mehr als 2.5-fache bei einer Solltemperatur von 24 °C und mehr als das 5-fache bei einer Solltemperatur von 25.5 °C.

Der Anstieg des Stromverbrauchs für die Kühlung bei Split-Systemen ist etwas höher (etwa 5 % für das Medianjahr und 10-50 % für das warme Jahr der zukünftigen Periode A1B) für die Solltemperaturen von 22 und 24 °C und niedriger (etwa 10-20 % für das Medianjahr und ca. 50-100 % geringer für das warme Jahr der zukünftigen Periode A1B) für eine Solltemperatur von 25.5 °C.

Bei einer Solltemperatur von 22 °C liegt der Stromverbrauch für die Kühlung der ganzen Wohnung mit mobilen Kühlgeräten während des ganzen Tages für das Klima in Basel bei 9.1 kWh/(m²a) im Medianjahr der Referenzperiode, bei 12.7 kWh/(m²a) im Medianjahr der Periode A1B und bei 18.4 kWh/(m²a) im warmen Jahr der zukünftigen Periode A1B. Bei einer Solltemperatur von 24 °C liegt dieser Verbrauch bei 3.8 kWh/(m²a) im Medianjahr der Referenzperiode, bei 6.4 kWh/(m²a) im Medianjahr der Periode A1B und bei 11.8 kWh/(m²a) im warmen Jahr der zukünftigen Periode A1B. Bei einer Solltemperatur von 25.5 °C liegt dieser Verbrauch bei 1.1 kWh/(m²a) im Medianjahr der Referenzperiode, bei 2.8 kWh/(m²a) im Medianjahr der Periode A1B und bei 7.0 kWh/(m²a) im warmen Jahr der zukünftigen Periode A1B.

Für das Klima in Lugano liegt der Stromverbrauch für die Kühlung der ganzen Wohnung mit mobilen Kühlgeräten während des ganzen Tages bei einer Solltemperatur von 22 °C bei 11.8 kWh/(m²a) im Medianjahr der Referenzperiode, bei 15.9 kWh/(m²a) im Medianjahr der Periode A1B und bei 22.8 kWh/(m²a) im warmen Jahr der zukünftigen Periode A1B. Bei einer Solltemperatur von 24 °C liegt dieser Verbrauch bei 6.1 kWh/(m²a) im Medianjahr der Referenzperiode, bei 10.0 kWh/(m²a) im Medianjahr der Periode A1B und bei 16.4 kWh/(m²a) im warmen Jahr der zukünftigen Periode A1B. Bei einer Solltemperatur von 25.5 °C liegt dieser Verbrauch bei 2.2 kWh/(m²a) im Medianjahr der Referenzperiode, bei 5.8 kWh/(m²a) im Medianjahr der Periode A1B und bei 11.0 kWh/(m²a) im warmen Jahr der zukünftigen Periode A1B.

Tabelle 25 zeigt die Abweichungen für den Klimakälteverbrauch der untersuchten Wohnung im Vergleich zum Szenario, in denen die ganze Wohnung während des ganzen Tages mit einer Solltemperatur von 22 °C gekühlt wird, in Abhängigkeit von verschiedenen Massnahmen (Gerätetyp, Solltemperatur, Anzahl gekühlter Räume und Betriebszeit) sowie den Parametern Klimastandort und Klimawandel. Für jeden Parameter werden verschiedene Optionen analysiert (vgl. Tabelle 25, beschrieben mit der Abkürzung vs. vor

der Option), die Abweichungen werden in Prozent angegeben. Z. B. wurde für den Gerätetyp ein Split-Gerät mit einem mobilen Gerät verglichen oder für die Solltemperatur wurden die Temperaturen von 24 °C und 25.5 °C mit 22 °C verglichen. Diese Vergleiche wurde dabei immer mit demselben Gerätetyp durchgeführt, ausser im Fall des Parameters Gerätetyp, wie oben erläutert.

KLIMA	GERÄTETYP	ganzer Tag			bei Belegung			GEKÜHLTE RÄUME	JAHR			
		22 °C	24 °C	25.5 °C	22 °C	24 °C	25.5 °C					
GERÄTETYP	Basel / Lugano	Split-Gerät (vs. Mobiles Gerät)	- 50-55 %	- 45-55 %	- 40-50 %	- 55-60 %	- 50-55 %	- 50 %	Wohnzimmer ganzer Tag: + 5 %, Schlafzimmer ganzer Tag: - 5 %; Wohnzimmer bei Belegung: + 10 %, Schlafzimmer bei Belegung: - 10 %	Kein Unterschied		
KLIMA	GERÄTETYP	24 °C (vs. 22 °C)			25.5 °C (vs. 22 °C)			GEKÜHLTE RÄUME	BETRIEBSZEIT			
		Medianjahre	Wärme Jahre		Medianjahre	Wärme Jahre						
SOLLTEMPERATUR	Basel	Mobiles Gerät	- 50-60 %		- 35-45 %		- 80-90 %		- 60-70 %		Kein Unterschied	
		Split-Gerät	- 45-55 %		- 30-35 %		- 70-85 %		- 60-65 %			
	Lugano	Mobiles Gerät	- 45-55 %		- 30-35 %		- 70-85 %		- 60-65 %			
		Split-Gerät	- 30-50 %		- 20-30 %		- 60-75 %		- 45-60 %			
GEKÜHLTE RÄUME	KLIMA	GERÄTETYP	Wohnbereich (vs. ganze Wohnung)			Schlafzimmer (vs. ganze Wohnung)			JAHR	SOLLTEMP.		
			ganzer Tag		bei Belegung		ganzer Tag				bei Belegung	
	Basel	Mobiles Gerät	- 45 %		- 35 %		- 50 %		- 65 %		Kein Unterschied	Kein Unterschied
		Split-Gerät	- 40 %		- 25 %		- 55 %		- 75 %			
Lugano	Mobiles Gerät	- 45 %		- 35 %		- 50 %		- 60 %				
	Split-Gerät	- 40 %		- 25 %		- 55 %		- 70 %				
KLIMA	GERÄTETYP	bei Belegung (vs. ganzer Tag)						JAHR	SOLLTEMP.			
		Wohnung		Wohnbereich		Schlafzimmer						
BETRIEBSZEIT	Basel	Mobiles Gerät	- 10-30 %		bis 11 %		- 30-55 %		In warmen Jahren ist die Reduktion etwas geringer	Bei 22 °C und mobile Geräte ist die Reduktion etwas geringer und liegt eher an der unteren Werte des Bereichs		
		Split-Gerät	- 20-30 %		bis 8 %		- 45-75 %					
	Lugano	Mobiles Gerät	- 10-25 %		bis 8 %		- 25-50 %					
		Split-Gerät	- 15-25 %		bis 7 %		- 35-60 %					
KLIMA	GERÄTETYP	22 °C			24 °C		25.5 °C		GEKÜHLTE RÄUME	BETRIEBSZEIT		
		Medianj.	Wärme Jahre	Medianj.	Wärme Jahre	Medianj.	Wärme Jahre					
KLIMA	Lugano (vs. Basel)	Mobiles Gerät	+ 25-30 %	+ 15-25 %	+ 55-65 %	+ 30-45 %	+ 100-110 %	+ 45-65 %	Medianjahr, Schlafzimmer ganzer Tag: + 30 %	Warmes Jahr, Schlafzimmer bei Belegung: bei 22 °C und 25.5 °C: + 10 % bei 24 °C: + 50 %		
		Split-Gerät	+ 30-40 %	+ 20-40 %	+ 55-65 %	+ 30-45 %	+ 70-100 %	+ 35-70 %				
KLIMA	GERÄTETYP	Medianjahr der Periode A1B (vs. Medianj. der Referenzp.)			Warmes Jahr der Periode A1B (vs. Medianj. der Referenzp.)			GEKÜHLTE RÄUME	BETRIEBSZEIT			
		22 °C	24 °C	25.5 °C	22 °C	24 °C	25.5 °C					
KLIMAWANDEL	Basel	Mobiles Gerät	+ 40-45 %	+ 70-80 %	+ 100-155 %	+ 100-110 %	+ 3-fach	+ 6-fach	Im Wohnbereich ist der Anstieg etwas geringer, im Schlafzimmer ist er höher, besonders bei einer Solltemperatur von 25.5 °C	Kein Unterschied		
		Split-Gerät	+ 45-50 %	+ 80-85 %	+ 100-145 %	+ 110-135 %	+ 3.5-fach	+ 5-fach				
	Lugano	Mobiles Gerät	+ 30-40 %	+ 60-80 %	+ 120-165 %	+ 90-110 %	+ 2.5-fach	+ 5-fach				
		Split-Gerät	+ 40-45 %	+ 70-85 %	+ 130-140 %	+ 110-130 %	+ 3-fach	+ 4.5-fach				

Tabelle 25: Schwankung des Klimakälteverbrauchs für die untersuchte Wohnung in Abhängigkeit von den erforschten Massnahmen: Gerätetyp, Solltemperatur, Anzahl gekühlter Räume und Betriebszeit sowie den Parametern Klimastandort und Klimawandel.

Die Implementierung eines **effizienten Kühlsystems**, Typ Split- oder Multi-Split-System, **zusammen mit einer angemessenen Nutzung** (nur während der Nutzungszeiten des Raumes und bei einer nicht zu tiefen Solltemperatur, z.B. 24-25.5 °C) kann den Stromverbrauch für die Kühlung im Vergleich zur intensiven Nutzung von mobilen Kühlgeräten (Kühlung der ganzen Wohnung, während dem ganzen Tag mit einer Solltemperatur von 22 °C) erheblich reduzieren. Die Ergebnisse sind in Tabelle 26 zusammengefasst. Der Stromverbrauch für die Kühlung mit einem mobilen Klimagerät liegt in diesem Szenario bei 9.1 kWh/(m²a) und 12.7 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel bzw. bei 11.8 kWh/(m²a) und 15.9 kWh/(m²a) für das Klima in Lugano.

Bei einer Kühlung nur bei Belegung der Wohnung mit einem Multi-Split-System bei einer Solltemperatur von 24 °C reduziert sich der Klimakälteverbrauch im Vergleich zu einer Kühlung der ganzen Wohnung während des ganzen Tages mit mobilen Kompaktgeräten bei einer Solltemperatur von 22 °C um 75-85 % im Klima von Basel und um 70-80 % im Klima von Lugano. Der Stromverbrauch für die Kühlung liegt in diesem Szenario bei 1.3 kWh/(m²a) und 2.4 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel bzw. bei 2.1 kWh/(m²a) und 3.9 kWh/(m²a) für das Klima in Lugano. Im warmen Jahr der Periode A1B erhöht sich der Stromverbrauch für die Kühlung auf 4.9 kWh/(m²a) für das Klima in Basel und auf 7.2 kWh/(m²a) für das Klima in Lugano.

Bei einer Kühlung nur bei Belegung der Wohnung mit einem Multi-Split-System bei einer Solltemperatur von 25.5 °C reduziert sich der Klimakälteverbrauch im Vergleich zu einer Kühlung der ganzen Wohnung während des ganzen Tages mit mobilen Kompaktgeräten bei einer Solltemperatur von 22 °C um 85-95 % im Klima von Basel und um 80-90 % im Klima von Lugano. Der Stromverbrauch für die Kühlung liegt in diesem Szenario bei 0.5 kWh/(m²a) und 1.2 kWh/(m²a) in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel bzw. bei 1.0 kWh/(m²a) und 2.4 kWh/(m²a) für das Klima in Lugano. Im warmen Jahr der Periode A1B erhöht sich der Stromverbrauch für die Kühlung auf 2.8 kWh/(m²a) für das Klima in Basel und auf 4.9 kWh/(m²a) für das Klima in Lugano.

		Ref. Median-jahr (2004)	Ref. wärmstes Jahr (2003)	A1B Median-jahr (2063)	A1B warmes Jahr (2068)	Typ	Temperatur (°C)	ganze Whg.	ganzer Tag
BASEL	Mobil 22	9.1	14	12.7	18.4	Mobiles Gerät	22	Ja	Ja
	Split 24	1.3	3.2	2.4	4.9	Split-Gerät	24	Ja	Nein
	Split 25.5	0.5	1.8	1.2	2.8	Split-Gerät	25.5	Ja	Nein
LUGANO	Mobil 22	11.8	16.3	15.9	22.8	Mobiles Gerät	22	Ja	Ja
	Split 24	2.1	4.1	3.9	7.2	Split-Gerät	24	Ja	Nein
	Split 25.5	1.0	2.5	2.4	4.9	Split-Gerät	25.5	Ja	Nein

Tabelle 26: Stromverbrauch für Klimakälte (in kWh/(m²a)) der Wohnung in Abhängigkeit von System, Solltemperatur und Nutzungszeit für das aktuelle und zukünftige Klima in Basel und Lugano.

Der **Beitrag einer Photovoltaikanlage** zur Deckung des Stromverbrauchs für die Kühlung wurde anhand von vier Szenarien für das Klima in Basel und das Klima in Lugano analysiert. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die Stromverbräuche für die Kühlung der vier Szenarien, die im Abschnitt 4.2.3 dargestellt wurden. Der Stromverbrauch in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen wird im Vergleich zu mobilen Klimageräten um mehr als die Hälfte reduziert, bei einer Kühlung nur bei Belegung ist der Verbrauch sogar noch niedriger. Dieser geringere Verbrauch und die Tatsache, dass die Verbrauchspitzen der Multi-Split-Systeme (die elektrische Leistung ist in Abbildung 33 dargestellt) kleiner sind, ermöglichen es mit den Photovoltaikanlagen einen höheren Prozentsatz des Verbrauchs zu decken.

		Ref. Medi- anjahr (2004)	Ref. wärmstes Jahr (2003)	A1B Medi- anjahr (2063)	A1B warmes Jahr (2068)	Typ	Temperatur (°C)	ganze Whg.	ganzer Tag
BASEL	Basel - Mobil 22 °C bei Beleg.	7.9	12.0	10.9	15.6	Mobiles Gerät	22	Ja	Nein
	Basel - Mobil 24 °C ganzer Tag	3.8	7.9	7.2	11.8	Mobiles Gerät	24	Ja	Ja
	Basel - Split 24 °C ganzer Tag	1.8	4.2	3.2	6.2	Split-Gerät	24	Ja	Ja
	Basel - Split 24 °C bei Beleg.	1.3	3.2	2.4	4.9	Split-Gerät	24	Ja	Nein
LUGANO	Lugano - Mobil 22 °C bei Beleg.	10.2	14.1	13.6	20.3	Mobiles Gerät	22	Ja	Nein
	Lugano - Mobil 24 °C ganzer Tag	6.1	10.1	10.0	16.4	Mobiles Gerät	24	Ja	Ja
	Lugano - Split 24 °C ganzer Tag	2.8	5.3	5.0	8.8	Split-Gerät	24	Ja	Ja
	Lugano - Split 24 °C bei Beleg.	2.1	4.1	3.9	7.2	Split-Gerät	24	Ja	Nein

Tabelle 27: Stromverbrauch für Klimakälte in kWh/(m²a) für die Kühlung der ganzen Wohnung in Abhängigkeit vom System, der Solltemperatur und der Nutzungszeit für das aktuelle und zukünftige Klima in Basel und Lugano.

Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ nach MuKE (EnDK, 2018) dimensioniert wurde, kann den Stromverbrauch für die Kühlung zu ca. 15-25 % im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», zu ca. 25-40 % im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und zu ca. 45-70 % in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen decken. Durch die Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage – mit einer Kapazität von 1.5 kWh – erhöht sich der Anteil des Eigenverbrauchs bei einer Kühlung mit Kompaktgeräten um 15-20 % und bei einer Kühlung mit Multi-Split-Systemen um 10-15 % im Vergleich zur gleichen Installation ohne Batterie. Dieser zusätzliche Anteil entspricht ca. $2.2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (Durchschnittswert der vier untersuchten Jahre für Basel und Lugano) im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», ca. $1.6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und ca. $0.4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen. Diese Kombination deckt ca. 35-45 % des Stromverbrauchs für die Kühlung beim Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», ca. 40-60 % beim Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und ca. 55-80 % bei den Szenarien mit Multi-Split-Systemen. Durch die Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer dreimal grösseren Kapazität, mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage – mit einer Kapazität von 4.5 kWh – erhöht sich zusätzlich der Anteil des Eigenverbrauchs zwischen 5 % und 10 %. Dieser zusätzliche Anteil entspricht ca. $1.2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (Durchschnittswert der vier untersuchten Jahre für Basel und Lugano) im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», ca. $0.8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und ca. $0.4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen. Die Deckung des Stromverbrauchs für die Kühlung liegt bei 40-55 % im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», bei ca. 50-70 % im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und bei ca. 60-90 % in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen.

Durch eine Photovoltaikanlage mit einer dreimal grösseren Leistung ($30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$) erhöht sich der Anteil des Eigenverbrauchs um 20-25 % im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», um 30 % im Szenario «Split 24 °C ganzer Tag» und um 10-15 % in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen im Vergleich zu einer Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert wurde. Dieser zusätzliche Anteil entspricht ca. $2.8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (Durchschnittswert der vier untersuchten Jahre für Basel und Lugano) im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», ca. $2.5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und ca. $0.4\text{-}0.7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen. Diese Anlage deckt ca. 40-45 % des Stromverbrauchs für die Kühlung im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», ca. 55-70 % im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und ca. 60-80 % in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen. Daher deckt eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert wurde, einen höheren Anteil des Eigenstromverbrauchs für die Kühlung als eine Photovoltaikanlage mit einer Leistung von $10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ in Kombination mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 1.5 kWh). Die leistungstärkere Photovoltaikanlage ist für die Szenarien mit mobilen Kompaktgeräten effektiver, da die benötigte elektrische Leistung höher als für Multi-Split-Systeme ist. Diese Anlage wird zudem das ganze Jahr über mehr Strom erzeugen, der im Gebäude selbst genutzt oder ins Netz eingespeist werden kann.

Durch die Kombination der Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert wurde, mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 4.5 kWh) erhöht sich der Anteil des Eigenverbrauchs um 10-15 % in den Szenarien mit einer ganztägigen Kühlung, um 15-20 % im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung» und um 10-20 % im Szenario «Split 24 °C ganzer Tag» im Vergleich zur gleichen Photovoltaikanlage ohne Batterie. Dieser zusätzliche Anteil entspricht ca. $3.6 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ (Durchschnittswert der vier untersuchten Jahre für Basel und Lugano) im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», ca. $3.2 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und ca. $2.4\text{-}2.7 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen. Diese Anlage deckt ca. 55-65 % des Stromverbrauchs für die Kühlung im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», ca. 65-85 % im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und ca. 70-95 % in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen. Durch die Kombination der Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert wurde, mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 13.5 kWh) erhöht sich zusätzlich der Anteil des Eigenverbrauchs um 15-25 % im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», um 10 % im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und um 5-20 % in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen. Dieser zusätzliche Anteil entspricht ca. $6.3 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ (Durchschnittswert der vier untersuchten Jahre für Basel und Lugano) im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», ca. $5.6 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und ca. $4.1\text{-}4.7 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen. Diese Anlage deckt bis zu 90 % des Stromverbrauchs für die Kühlung im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», bis zu 95 % im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und bis zu 100 % in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen.

Der Anteil des Eigenverbrauchs in den Szenarien mit einer ganztägigen Kühlung und einer Kühlung nur bei Belegung mit Multi-Split-Systemen ist sehr ähnlich. Jedoch führt die Kühlung der Wohnung nur bei Belegung zu einem geringeren Stromverbrauch aus dem Netz sowie einer geringeren elektrischen Leistung.

Wird durch die Photovoltaikanlage ebenso der Stromverbrauch für Geräte und Beleuchtung gedeckt, dann gleicht sich der Anteil des Eigenverbrauchs in den verschiedenen Szenarien an. Das liegt daran, da der Stromverbrauch für Geräte und Beleuchtung mit ca. $18.4 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ im Vergleich zum Stromverbrauch für Kühlung deutlich höher liegt und in allen Szenarien praktisch gleich ist. In den Szenarien mit Multi-Split-Anlagen liegt dieser Anteil jedoch deutlich höher.

Eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert wurde, deckt ca. 20-25 % des Stromverbrauchs für Kühlung, Geräte und Beleuchtung im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung» und ca. 25-30 % in den anderen Szenarien. Durch die Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 4.5 kWh) erhöht sich dieser Anteil um 5 %. Dieser zusätzliche Anteil entspricht ca. $1.5 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ (Durchschnittswert der vier untersuchten Jahre für Basel und Lugano) im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», ca. $1.3 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und ca. $1.0 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen. Diese Anlage deckt ca. 25-30 % des Stromverbrauchs für Kühlung im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung» und ca. 30-35 % in den anderen Szenarien. Durch die Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 13.5 kWh) erhöht sich zusätzlich der Eigenverbrauchsanteil um 5 %. Dieser zusätzliche Anteil entspricht ca. $1.5 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ (Durchschnittswert der vier untersuchten Jahre für Basel und Lugano) im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», ca. $1.3 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und ca. $1.0 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen. Der Eigenverbrauch dieser Anlage liegt bei ca. 30-35 % im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», bei ca. 35-40 % in den Szenarien «Mobil 24 °C ganzer Tag» und «Split 24 °C bei Belegung» und bei ca. 35-45 % im Szenario «Split 24 °C ganzer Tag».

Durch eine grössere Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert wurde, erhöht sich der Anteil des Eigenverbrauchs um 10-15 % im Vergleich zu einer Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert wurde. Dieser zusätzliche Anteil entspricht ca. $3.4 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ (Durchschnittswert der vier untersuchten Jahre für Basel und Lugano) im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», ca. $3.0 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und ca. $2.2\text{-}2.5 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ in

den Szenarien mit Multi-Split-Systemen. Diese Anlage deckt ca. 35-40 % des Stromverbrauchs für Kühlung, Geräte und Beleuchtung im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», ca. 35-45 % in den Szenarien «Mobil 24 °C ganzer Tag» und «Split 24 °C ganzer Tag» und ca. 35-40 % im Szenario «Split 24 °C bei Belegung». Daher deckt eine Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert wurde, einen höheren Anteil des Eigenstromverbrauchs für die Kühlung als eine Photovoltaikanlage mit einer Leistung von $10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ in Kombination mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 4.5 kWh). Diese Anlage wird zudem das ganze Jahr über mehr Strom erzeugen, der im Gebäude selbst genutzt oder ins Netz eingespeist werden kann.

Durch die Kombination der Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert wurde, mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 13.5 kWh) erhöht sich zusätzlich der Anteil des Eigenverbrauchs um 10 % in den Szenarien «Mobil 22 °C bei Belegung» und «Split 24 °C ganzer Tag» und um 10-15 % in den Szenarien «Mobil 24 °C ganzer Tag» und «Split 24 °C bei Belegung». Dieser zusätzliche Anteil entspricht ca. $3.6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (Durchschnittswert der vier untersuchten Jahre für Basel und Lugano) im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», ca. $3.2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und ca. $2.4\text{-}2.7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen. Diese Anlage deckt ca. 45-50 % des Stromverbrauchs für Kühlung, Geräte und Beleuchtung im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», ca. 50-55 % im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und ca. 45-55 % in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen. Durch die Kombination der Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert wurde, mit einer Batterie mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion der Photovoltaikanlage (Kapazität von 13.5 kWh) erhöht sich zusätzlich der Anteil des Eigenverbrauchs um 10-15 % im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung», um 15-20 % im Szenario «Mobil 24 °C ganzer Tag» und um 20 % in den Szenarien mit Multi-Split-Systemen. Der Eigenverbrauch liegt bei ca. 55-65 % im Szenario «Mobil 22 °C bei Belegung» und bei ca. 65-75 % in alle anderen Szenarien.

Deshalb kann durch die Installation einer Photovoltaikanlage mit einer grösseren Leistung ($30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$) ein höherer Eigenverbrauch gedeckt werden als durch eine Photovoltaikanlage mit einer geringeren Leistung ($10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$) in Kombination mit einer Batterie. Dadurch kann nicht nur der Anteil des Eigenverbrauchs erhöht werden, sondern auch der Stromanteil aus erneuerbaren Energien nimmt zu. Dies ist insbesondere im Winter von Vorteil, wenn der Stromgewinn aus erneuerbaren Energien i.d.R. geringer ist. In diesem Fall ist eine grössere Batterie (mit einer Kapazität von 1/333 der jährlichen elektrischen Produktion) im Vergleich zu einer kleineren Batterie (mit einer Kapazität von 1/1'000 der jährlichen elektrischen Produktion) ebenfalls von Vorteil. Dabei gilt es aber zu bedenken, dass sowohl Kühlgeräte als auch Photovoltaikanlagen und Batterien zu einer Erhöhung des Anteils an Grauer Energie führen können. Eine Ökobilanzierung des gesamten Lebenszyklus der Anlage (inklusive Winter) ermöglicht es, eine angemessene Grösse der Anlage zu dimensionieren.

Wie aus Tabelle 27 hervorgeht, kann die Kühlung mit mobilen Kompaktgeräten bei einer Solltemperatur von 22 °C nur bei Belegung einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtenergiebilanz eines Wohngebäudes haben. Diese haben einen Energieverbrauch von $7.9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und $10.9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel und von $10.2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und $13.6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Lugano. Wird jedoch ein Split-System bei einer Solltemperatur von 24 °C während des ganzen Tages verwendet, reduziert sich dieser Verbrauch auf $1.8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und $3.2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel und auf $2.8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und $5.0 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Lugano. Wenn ein Grossteil dieser Energie durch eine Photovoltaikanlage gedeckt werden kann, kann der Stromverbrauch aus dem Netz zusätzlich reduziert werden. Mit einer Photovoltaikanlage, die mit einer Leistung von $10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ nach MuKEN (EnDK, 2018) dimensioniert wurde, liegt der Stromverbrauch aus dem Netz bei $0.6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und $1.0 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Basel und bei $0.8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und $2.1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ in den Medianjahren beider Perioden für das Klima in Lugano.

Der **direkte Verbrauch von Strom aus der Photovoltaikanlage zur Kühlung** ist sinnvoll, da die maximale Stromerzeugung im Sommer mit dem Kühlbedarf übereinstimmt. Eine Photovoltaikanlage zur Deckung des Stromverbrauchs für die Kühlung ist dann sinnvoll, wenn der Verbrauch hoch ist und in den Stunden mit Sonneneinstrahlung anfällt. Wenn eine Photovoltaikanlage zur Kühlung verwendet wird, ist es ratsam, die **Photovoltaikanlage mit einer höheren Leistung zu dimensionieren** als die in der MuKE 2014 (EnDK, 2015) gemäss Artikel 1.27 festgelegte Leistung von $10 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$. Ebenso sollte eine Reduzierung von Stromspitzen durch effiziente Systeme und eine Kühlung nur bei Belegung der Räume angestrebt werden. Mit einer grösseren Photovoltaikanlage kann ein grösserer Teil des Verbrauchs abgedeckt werden als mit einer grösseren Batterie. Insbesondere bei kompakten Geräten deren elektrische Leistung sehr hoch ist und deren Batterie sich sehr schnell entleeren kann. Bei Split-Systemen – da der Stromverbrauch viel geringer ist – ist ebenso eine grössere Photovoltaikanlage einer grösseren Batterie vorzuziehen.

Bei einem geringen Stromverbrauch für die Kühlung ist es sinnvoll, den Einsatz einer **Photovoltaikanlage inkl. Batterie** nicht nur auf die Kühlung zu beschränken, sondern mit der Verwendung für Beleuchtung, Geräte oder sogar für Mobilität und Heizung mittels Wärmepumpen zu kombinieren. Der überschüssige Strom kann in jedem Fall ins Netz eingespeist werden.

Generell gilt, dass sowohl bei Kühlgeräten als auch Photovoltaikanlagen und Batterien der Anteil der Grauen Energie berücksichtigt werden sollte. Dieser kann z.T. sehr hoch sein. Obwohl der zusätzliche Verbrauch bei der Kühlung von Wohngebäuden dank dieser Systeme gering gehalten werden kann, kann ihr Beitrag zur Grauen Energie des Gebäudes sehr gross sein und somit die Treibhausgasemissionen des Gebäudes, über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, verschlechtern.

Die **Dämmung einzelner, zu kühlender Räume** ermöglicht eine Reduzierung des Klimakälteverbrauchs zwischen 15 % und 20 %. In absoluten Zahlen ist diese Reduzierung jedoch sehr gering. Bei einer 24-Stunden-Kühlung mit einer Solltemperatur von 24°C in den Medianjahren und warmen Jahren beider Perioden beträgt diese Einsparung sogar weniger als $0.5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ bzw. $1.0 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Andere Massnahmen, wie z. B. ein Sonnenschutzsystem oder eine Verglasung mit einem geringeren Gesamtenergiedurchlassgrad, die Reduzierung der internen Wärmeerträge durch effizientere Geräte und Beleuchtung oder eine verstärkte Nachtlüftung, können effektiver sein als die Dämmung der zu kühlenden Räume.

Die **aktuellen Vorschriften** basieren auf Klimadaten, die aus dem Zeitraum von 1984 bis 2003 stammen. Sobald die neuen Klimadaten des Projekts «Klimadaten der Zukunft für Planende: Klimawandel und Merkblatt SIA 2028» (NCCS, 2020) veröffentlicht werden, wäre eine Überprüfung der in der Norm festgelegten Anforderungen, in Bezug auf die Gewährleistung der thermischen Behaglichkeit in den Gebäuden unter Berücksichtigung des zukünftigen Klimas, zu empfehlen. Wünschenswert wäre auch, dass die MuKE und die Kantone die Anforderungen an die Kühlung präzisieren – derzeit werden die Anforderungen bei Neubauten indirekt formuliert und durch den gewichteten Energiebedarf pro Jahr für Heizung, Warmwasser, Lüftung und Klimatisierung begrenzt. Dazu gehört bspw. einen maximal zulässigen Anteil von nicht erneuerbaren Energien zur Deckung des Energieverbrauchs für Kühlung (z. B. durch eine Photovoltaikanlage vor Ort oder Geocooling durch Erdsonden) festzulegen oder Mindestanforderungen an die Energieeffizienz von kleinen Kühlanlagen, wie z. B. Split-Systemen, zu formulieren.

Durch diese Massnahmen wird sichergestellt, dass der Energieverbrauch, der durch die Kühlung von Wohngebäuden entstehen kann, nicht zu einem signifikanten Anstieg des Gesamtenergieverbrauchs von Wohngebäuden führt.

7. Literaturverzeichnis

ASHRAE. (2017). *ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.

Autor, A. (Jahr). *Titel*. Ort: Verleger.

BAFU. (2017). *Übersicht über die wichtigsten Kältemittel*. Bundesamt für Umwelt.

BFE. (2020). *Stand der Energie- und Klimapolitik in den Kantonen 2020*. Bern: Bundesamt für Energie.

CH2018. (2018). *CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report*. Zurich: National Centre for Climate Services.

Dadi Sveinbjörnsson, N. F. (2020). *IEA-DHC Annex XII. Task C: Pit Thermal Energy Storage for Smart District Heating and Cooling - Technical report on model validation, cost functions and results of an exemplary base case study*.

EnDK. (2018a). *Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE). Ausgabe 2014 (Nachführung 2018)*. Bern: Konferenz Kantonaler Energiedirektoren,.

EnDK. (2018b). *Vollzugshilfe EN-110. Kühlen, Be- und Entfeuchten*. Bern: Konferenz Kantonaler Energiedirektoren.

Erwin, J. (2017). Cool people: Wearable and personal comfort products that will contribute to an overall energy efficiency strategy. *International Conference on Energy Efficiency in Lighting and Domestic Appliances*.

Europäisches Parlament. (2012). *Verordnung (EU) Nr. 206/2012 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Raumklimageräten und Komfortventilatoren*. Brussels.

Europäisches Parlament. (2014). *Verordnung (EU) Nr. 517/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014 über fluoridierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006 Text von Bedeutung für den EWR*. Brussels.

Europäisches Parlament. (2020). *Delegierte Verordnung (EU) 2021/340 der Kommission zur Änderung der Delegierten Verordnungen (EU) 2019/2013, (EU) 2019/2014, (EU) 2019/2015, (EU) 2019/2016, (EU) 2019/2017 und (EU) 2019/2018 in Bezug auf die Anforderungen an die Energieverbrauchskenn...* Brussels.

FEA. (27. April 2020). *Marktstatistik*. Von Fachverband Elektroapparate für Haushalt und Gewerbe Schweiz: <https://www.fea.ch/de/markt/marktstatistik/> abgerufen

Gehrig, R., König, N., & Scherrer, S. (2018). *Städtische Wärmeinseln in der Schweiz - Klimatologische Studie mit Messdaten in fünf Städten*. Fachbericht MeteoSchweiz Nr. 273.

Gehrig, R., König, N., Scherrer, S. (2018). *Städtische Wärmeinsel in der Schweiz - Klimatologische Studie mit Messdaten in fünf Städten*. Fachbericht MeteoSchweiz, 273, 61 pp.

Hönger, C., Brunner, R., Menti, U.-P., Wieser, C., & Unruh, T. (2014). *Das Klima als Entwurfsmittel. Architektur und Energie*. Quart Verlag.

ISPM – University of Bern. (kein Datum). *The Swiss National Cohort*. (ISPM – University of Bern) Abgerufen am 4. 12 2020 von <https://www.swissnationalcohort.ch/>

KBOB. (2016). Liste Oekobilanzdaten im Baubereich 2009-1-2016.

Knecht, K., Bryan-Kinns, N., & Shoop, K. (2016). Usability and Design of Personal Wearable and Portable Devices for Thermal Comfort in Shared Work Environments . *Proceedings of British HCI 2016 – Fusion*.

Koschenz, M., Domingo-Irigoyen, S., Niffeler, M., Ragettli, M., Flückiger, B., Kafadar, M., . . . Wehrli, K. (2021). *ResCool: Klimaanpassung von Neu-, Um- und bestehenden Wohnbauten – effiziente Kühlkonzepte*. Horw.

Minergie Schweiz. (2019). *Tageslicht. Höchste Lichtqualität im Minergie-Gebäude*.

NCCS. (2018). *CH2018 - Klimaszenarien für die Schweiz*. National Centre for Climate Services, Zürich. 24 S. ISBN-Nummer 978-3-9525031-0-2.

NCCS. (12. Oktober 2020). *A.15 Aktuelle Klimadaten für Bauplanende. Klimadaten der Zukunft für Planende: Klimawandel und Merkblatt SIA 2028*. Abgerufen am 2020 von <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/massnahmen/pak/projektephase2/pilotprojekte-zur-anpassung-an-den-klimawandel--cluster--umgang-/a-15-aktuelle-klimadaten-fuer-bauplanende.html>

NCCS, N. C. (kein Datum). *A.15 Aktuelle Klimadaten für Bauplanende*. Abgerufen am 4. 12 2020 von <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/massnahmen/pak/projektephase2/pilotprojekte-zur-anpassung-an-den-klimawandel--cluster--umgang-/a-15-aktuelle-klimadaten-fuer-bauplanende.html>

Oi, H., Yanagi, K., Tabata, K., & Tochihara, Y. (August 2011). Effects of Heated Seat and Foot Heater on Thermal Comfort and Heater Energy Consumption in Vehicle . *Ergonomics* 54(8), S. 690-699.

Ragettli, M. S., Vicedo-Cabrera, A. M., Schindler, C., & Rössli, M. (Oktober 2017). Exploring the association between heat and mortality in Switzerland between 1995 and 2013. *Environmental Research*, S. 703-709.

Rawal, R., Schweiker, M., Kazanci, O., Vardhan, V., Jin, Q., & Duanmu, L. (1. May 2020). Personal comfort systems: A review on comfort, energy, and economics. *Energy & Buildings* 214, S. 109858.

Rønneseth, Ø. (kein Datum). Personal Heating and Cooling Devices: Increasing User's Thermal Satisfaction. A literature study. *ZEN REPORT No. 4 – 2018*.

Salamanca, F., Georgescu, M., Mahalov, A., Moustauoui, M., & Wang, M. (28. May 2014). Anthropogenic heating of the urban environment due to air conditioning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, S. 5949–5965.

Schrader, B., Gerber, S., & Menti, U.-P. (2015). *S.A.D.L.E.S.S.; Systemische Betrachtung von Beschattungssystemen mit dem Fokus Tageslicht zur Optimierung der SIA - Norm 380/4 – Schlussbericht*. Bern: BFE.

Settembrini, G., Domingo-Irigoyen, S., Thomas Heim, T., Jurt, D., Seerig, A., Zakovorotnyi, A., & Zweifel, G. (2017). *ClimaBau – Planen angesichts des Klimawandels. Energiebedarf und Behaglichkeit heutiger Wohnbauten bis ins Jahr 2100*. Luzern.

SIA. (2002). *SIA Merkblatt 2021. Gebäude mit hohem Glasanteil - Behaglichkeit und Energieeffizienz*. Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.

SIA. (2006). *Norm SIA 380/4. Elektrische Energie im Hochbau*. Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.

- SIA. (2007). *Norm SIA 382/1. Lüftungs- und Klimaanlage - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen*. Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- SIA. (2007). *Norm SIA 382/1:2007. Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen*. Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- SIA. (2009). *Norm SIA 342. Sonnen- und Wetterschutzanlagen*. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- SIA. (2010). *Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik*. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- SIA. (2011). *Norm SIA 382/2:2011. Klimatisierte Gebäude -Leistungs- und Energiebedarf*. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- SIA. (2011a). *Norm SIA 382/2. Klimatisierte Gebäude - Leistungs- und Energiebedarf*. Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- SIA. (2014a). *Norm SIA 180:2014 „Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden“*. Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- SIA. (2014b). *Norm SIA 382/1:2014. Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen*. Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- SIA. (2015). *SIA Merkblatt 2024. Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik*. Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- SIA. (2016). *Norm SIA 380/1. Heizwärmebedarf*. Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- SIA. (2019a). *SIA MB 2044:2019, Klimatisierte Gebäude - Standard-Berechnungsverfahren für den Leistungs- und Energiebedarf*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- SIA. (2019a). *SIA Merkblatt 2044. Klimatisierte Gebäude - Standard-Berechnungsverfahren für den Leistungs- und Energiebedarf*. Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- SIA. (2019b). *SIA Merkblatt 2056. Elektrizität in Gebäuden - Energie- und Leistungsbedarf*. Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- SIA. (2020a). *Korrigenda C2 zur Norm SIA 180:2014*. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- SIA. (11. August 2020b). *Klimadaten der Zukunft für Planende: Klimawandel und Merkblatt SIA 2028*».
- SNV. (2006). *SN EN ISO 7730. Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD- Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit*.
- SNV. (2018). *Norm SN/EN 14511-1:2018: Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen für die Raumbeheizung und -kühlung und Prozess-Kühler mit elektrisch angetriebenen Verdichtern - Teil 1: Begriffe*. Winterthur.
- Thomas Pauschinger, T. S. (2020). *IEA-DHC Annex XII. Task A: Design Aspects for Large-Scale Aquifer and Pit Thermal Energy Storage for District Heating and Cooling*.

Vogt, R., & Parlow, E. (2011). Die städtische Wärmeinsel von Basel - tagesund und jahreszeitliche Charakterisierung. *Stadtklimatologische Aspekte von Basel*, Nr. 52/1, 7-16.

Wang, Z., Warren, K., Luo, M., He, X., Zhang, H., Arens, E., . . . Smith, M. J. (2020). Evaluating the comfort of thermally dynamic wearable devices. *Building and Environment* 167, 106443.

Zakovorotnyi, A. et al. (2017). *ROGEK - Robustheitsbewertung von integrierten gebäudetechnischen Kühlkonzepten in Verwaltungenbauten hinsichtlich Klima und Nutzervariabilität – Schlussbericht*. Bern: Bundesamt für Energie (BFE).

8. Anhang

8.1 Beschrieb Referenzwohnung

Die wichtigsten Aspekte der untersuchten Wohnung sind in Tabelle 28 aufgeführt.

	Wohnung
Nettofläche	106.0 m ²
EBF	128.4 m ²
Orientierung Hauptfassade	220°
Wärmespeicherfähigkeit	Massivbau
Wärmeverteilsystem	Radiatoren
Fenster:	
Anteil	37.2 % (gesamt) 44.1 % (SW) 38.1 % (NW) 30.2 % (NO)
Qualität (U_{glas} / U_{rahmen}) (W/m ² K)	U_g : 0.7 / U_r : 1.1
g-Wert	0.51
Sonnenschutz:	1
Fix/Mobil	2 Mobil
Typ	Lamellenstoren
g-Wert _{total}	3 0.10
Automation	Ja, 4 gem. Kapitel 3.5.2

Tabelle 28. Werte der verschiedenen Parameter der untersuchten Wohnung.

Anschliessend werden die Materialien und Konstruktionsdetails der Gebäudehülle beschrieben.

Wand gegen aussen

Konstruktionsaufbau (von innen nach aussen)	Dicke m	Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)	Dichte kg/m ³	Wärmekapazität J/(kg·K)
1. Innenputz	0.015	0.700	1400	1000
2. Backstein	0.175	0.17	750	1000
3. Swissspor Lambda White 030	0.160	0.03	19	1006
4. Aussenputz	0.015	0.860	1800	1000

Tabelle 29. Baustoffkennwerte der Wand gegen aussen. Der U-Wert beträgt 0.15 W/(m² K).

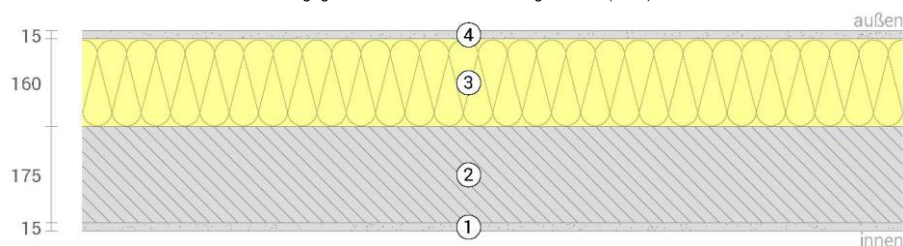


Abbildung 43: Aufbau der Aussenwand.

Dach

Konstruktionsaufbau (von oben nach unten)	Dicke m	Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)	Dichte kg/m³	Wärmekapazität J/(kg·K)
1. Bitumen	0.008	0.170	1180	1000
2. Swisspor PUR Premium	0.120	0.02	30	1400
3. Beton armiert mit 2 % Stahl	0.260	2.500	2400	1000
4. Innenputz	0.015	0.700	1400	1000

Tabelle 30. Baustoffkennwerte des Daches. Der U-Wert beträgt 0.16 W/(m²·K).

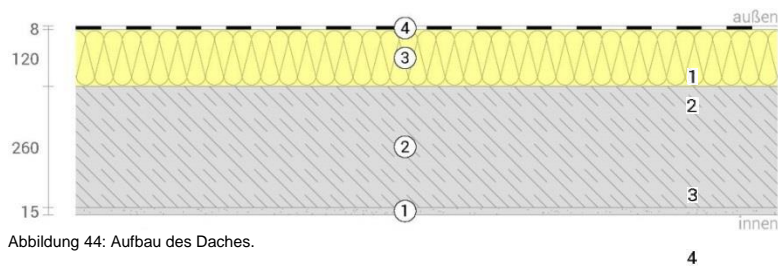


Abbildung 44: Aufbau des Daches.

4

Zwischenboden

Konstruktionsaufbau (von oben nach unten)	Dicke m	Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)	Dichte kg/m³	Wärmekapazität J/(kg·K)
1. Klebeparkett	0.015	-	900	2200
2. Anhydritunterlagsboden (Bodenheizung)	0.075	-	2000	1000
3. Isover PS 81	0.020	0.032	80	1030
4. Beton armiert mit 2 % Stahl	0.240	2.500	2400	1000

Tabelle 31. Baustoffkennwerte des Zwischenbodens. Der U-Wert beträgt 0.96 W/(m²·K).

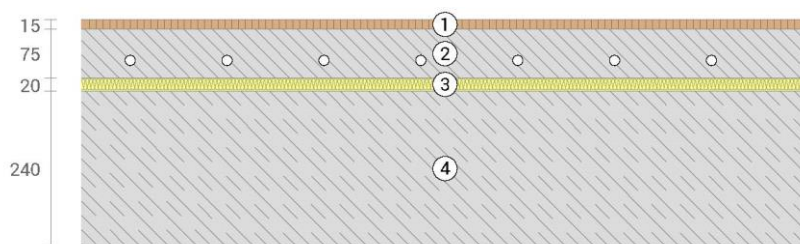


Abbildung 45: Aufbau des Zwischenbodens.

Innenwand

Es gibt zwei Konstruktionen für die Innenwände, die entweder aus einem Aufbau mit einer oder zwei Gipskartonplatten bestehen.

Konstruktionsaufbau 1	Dicke m	Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)	Dichte kg/m ³	Wärmekapazität J/(kg·K)
1. Gipskartonplatte	0.013	0.25	900	1000
2. Luftspalt	0.032	0.17	1.2	1006
3. Leichte Isolierung	0.040	0.17	20	750
4. Gipskartonplatte	0.013	0.25	900	1000

Tabelle 32. Baustoffkennwerte Innenwand. Der U-Wert beträgt 0.64 W/(m²·K).

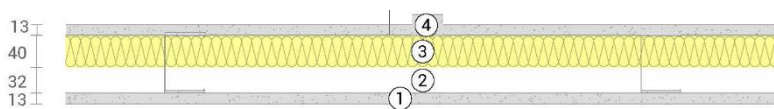


Abbildung 46: Aufbau der Innenwand (Trennwand von Räumen in der gleichen Wohnung).

Konstruktionsaufbau 2	Dicke m	Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)	Dichte kg/m ³	Wärmekapazität J/(kg·K)
1. Gipskartonplatte	0.013	0.25	900	1000
2. Luftspalt	0.032	0.17	1.2	1006
3. Leichte Isolierung	0.040	0.17	20	750
4. Gipskartonplatte	0.026	0.25	900	1000
5. Luftkammer	0.030	0.17	1.2	1006
6. Gipskartonplatte	0.026	0.25	900	1000
7. Leichte Isolierung	0.040	0.17	20	750
8. Luftspalt	0.032	0.17	1.2	1006
9. Gipskartonplatte	0.013	0.25	900	1000

Tabelle 33. Baustoffkennwerte Innenwand. Der U-Wert beträgt 0.31 W/(m²·K).

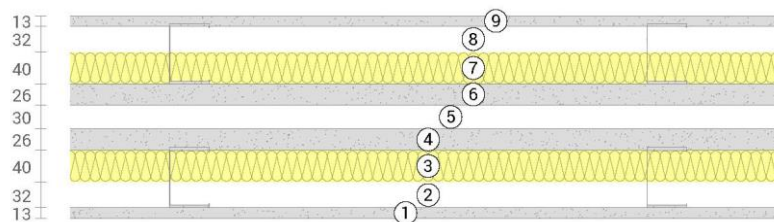


Abbildung 47: Aufbau der Innenwand (Trennwand der Wohnung mit anderen Räumen des Gebäudes oder zwischen den Wohnungen).

Fenster

Kennwert		Fenster	Fenstertür
Verglasung	U _g -Wert Glas	0.7 W/(m ² ·K)	0.7 W/(m ² ·K)
	g-Wert	0.51	0.51
	solarer Transmissionsgrad τ _s	0.42	0.42
	Lichttransmissionsgrad τ _v	0.71	0.71
U _f -Wert Rahmen (Holz-Metallrahmen)		1.1 W/(m ² ·K)	1.1 W/(m ² ·K)
Rahmenanteil		0.15	0.12
Laibungsteife		0.35 m	0.35 m

Tabelle 34. Fenster-Kennwerte.

Wärmebrücken

Die linearen Wärmeverluste (Ψ-Wert) der verschiedenen Wärmebrücken sind in Tabelle 35 dargestellt.

Wärmebrücken	linearen Wärmeverlust (Ψ-Wert)
Aussenwand-Innenwand	0.00
Aussenwand-Aussenwand	0.04
Einfassung Aussenfenster/Aussentür	0.12
Dach-Aussenwand	0.01
Aussenwand-Zwischendecke	0.02
Balkonplatte-Aussenwand	0.28
Dach-Innenwand	0.00
Aussenwand-Aussenwand (einspringende Ecke)	-0.08

Tabelle 35. Lineare Wärmeverluste der Wärmebrücken.

Beschattung

Die Fassadenfenster besitzen als aussenliegenden Sonnenschutz Lamellenstoren. Die Steuerung dieser Elemente wurde in Abschnitt 3.5.2 beschrieben.

Parameter	Sonnenschutz
g-Wert	0.10
τ _e (direkter solarer Transmissionsgrad)	0.07
τ _v (Lichttransmissionsgrad)	0.12

Tabelle 36. Sonnenschutz-Kennwerte.

8.2 Beschrieb Referenzjahre

Die wichtigsten Aspekte dieser Jahre in der Stadt Basel sind im Bericht (Settembrini, et al., 2017) wie folgt beschrieben: «Im **Jahr 2004** betrug die niedrigste Temperatur am Standort Basel -10.2°C , die maximale 31.5°C . In diesem Jahr gab es keinen längeren Zeitraum mit aussergewöhnlich hohen Temperaturen; die wärmste Periode wurde zwischen dem 1. und dem 3. August registriert, als an drei nachfolgenden Tagen eine maximale Temperatur von 30°C erreicht wurde. Während diesen drei Tagen sank die Temperatur nie unter 17°C .

Im **Jahr 2003** betrug die niedrigste Temperatur -10.3°C , die maximale 38.2°C . In diesem Jahr wurde eine Hitzewelle zwischen dem 4. und dem 14. August registriert, als an 10 aufeinanderfolgende Tage eine maximale Temperatur von 35°C erreicht wurde und die Temperatur nie unter 20°C sank.

In der Modellkette KNMI ECHAM5 des **Jahres 2063** beträgt die niedrigste Temperatur -6.3°C , die maximale 37.2°C . In diesem Jahr wird ein besonders heisser Zeitraum zwischen dem 11. und dem 15. August erwartet, wenn an 4 nachfolgenden Tagen eine maximale Temperatur von 35°C erreicht wird und nie unter 20°C sinkt. Während dieser Zeit wird zudem eine ausserordentlich hohe Sonnenstrahlung erwartet.

In der Modellkette MPI ECHAM5 des **Jahres 2068** beträgt die niedrigste Temperatur -8.4°C , die maximale 40.4°C . In diesem Jahr stimmt der heisseste Zeitraum mit demjenigen von 2003 überein, was mit dem Additionsverfahren zusammenhängt (vgl. Kapitel 4.1.6). Die Hitzeperiode verlängert sich dabei jedoch um einen Tag, vom 4. bis zum 15. August, und es werden jeweils Temperaturen über 37°C erreicht sowie 21°C nie unterschritten».

Die wichtigsten Aspekte dieser Jahre in der Stadt Lugano sind nachfolgend definiert:

Im **Jahr 2004** betrug die niedrigste Temperatur am Standort Lugano -2.0°C , die maximale 32.0°C . In diesem Jahr gab es keinen längeren Zeitraum mit aussergewöhnlich hohen Temperaturen; die wärmste Periode wurde zwischen dem 1. und dem 3. August registriert, als an drei nachfolgenden Tagen eine maximale Temperatur von 28°C erreicht wurde. Während diesen drei Tagen sank die Temperatur nie unter 20°C .

Im **Jahr 2003** betrug die niedrigste Temperatur -3.0°C , die maximale 35.3°C . In diesem Jahr wurde eine Hitzewelle zwischen dem 1. und dem 12. August registriert, als an 12 aufeinanderfolgende Tage eine maximale Temperatur von 30°C erreicht wurde und die Temperatur nie unter 20°C sank.

In der Modellkette KNMI ECHAM5 des **Jahres 2063** beträgt die niedrigste Temperatur -0.9°C , die maximale 34.6°C . In diesem Jahr wird zwei besonders heisseren Zeiträumen zwischen dem 19. und dem 25. Juli erwartet, wenn an 6 nachfolgenden Tagen eine maximale Temperatur von 31°C erreicht wird und nie unter 22.5°C sinkt und zwischen dem 7. und dem 11. August erwartet, wenn an 4 nachfolgenden Tagen eine maximale Temperatur von 32°C erreicht wird und nie unter 22°C sinkt.

In der Modellkette MPI ECHAM5 des **Jahres 2068** beträgt die niedrigste Temperatur -1.1°C , die maximale 38.3°C . Wie schon erklärt, stimmt in diesem Jahr der heisseste Zeitraum mit demjenigen von 2003 überein, was mit dem Additionsverfahren zusammenhängt (vgl. Kapitel 4.1.6). Die Hitzeperiode verlängert sich dabei jedoch um einen Tag, vom 1. bis zum 12. August, und es werden jeweils Temperaturen über 34.5°C erreicht sowie 24.5°C nie unterschritten.

8.3 Umweltfreundliche Ansätze zur Kühlung. Detaillierte Ergebnisse

Dieser Abschnitt enthält eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse der im Abschnitt 4.2.1 analysierten Szenarien.

8.3.1 «Worst-Case» Szenario: Kompaktgeräte

Wie im Abschnitt 3.5.7 erläutert, ist der Ausgangspunkt für die Simulationen das «Worst-Case» Szenario mit einem Kompaktgerät zur Kühlung der Wohnung und einer Solltemperatur von 22 °C. Der Wohnbereich wird bei Belegung von 06:00 bis 21:00 Uhr gekühlt, während die Schlafzimmer von 21:00 bis 06:00 Uhr gekühlt werden. Dieses Szenario stellt eine Situation dar, in der sich die Bewohner für die Anschaffung eines Kompaktgerätes pro Aufenthaltsraum entschieden haben. Die Kühlleistung des Geräts im Wohnbereich beträgt 3.5 kW und in den Schlafzimmern je 2 kW.

8.3.1.1 Thermische Behaglichkeit

Die Tabelle 37 stellt einen Überblick der maximal empfundenen Temperaturen, der jährlichen Anzahl Überhitzungsstunden sowie des Predicted Percentage of Dissatisfied PPD für die vier untersuchten Jahre in den Zonen der Referenzwohnung dar.

Die empfundene Temperatur in den belegten Räumen der Wohnung bleibt fast immer innerhalb der Komfortgrenzen nach Norm SIA 180 (SIA, 2014a). Mit einer Solltemperatur (Raumlufthtemperatur) von 22 °C kann die empfundene Temperatur der Räume im Komfortbereich gehalten werden (siehe Abbildung 48 und Abbildung 49), wobei die untere Grenzkurve manchmal unterschritten wird, da das Kompakgerät nur mit Volllast arbeitet (ständiges Ein- und Ausschalten um die Solltemperatur zu erreichen). Der PPD-Wert bleibt in allen Jahren bei etwa 5%.

Zone	Ref. Medianjahr (2004)				Ref. wärmstes Jahr (2003)				A1B Medianjahr (2063)				A1B warmes Jahr (2068)			
	Tmax (°C)	Tmax N (°C)	Ü-St.	PPD	Tmax (°C)	Tmax N (°C)	Ü-St.	PPD	Tmax (°C)	Tmax N (°C)	Ü-St.	PPD	Tmax (°C)	Tmax N (°C)	Ü-St.	PPD
Schlafz. 1	27.7	25.7	0	5.2	28.1	26.1	0	5.2	28.5	26.0	0	5.2	29.1	26.5	1	5.2
Schlafz. 2	25.8	25.1	0	5.1	26.3	25.3	0	5.1	26.4	25.0	0	5.1	26.9	25.5	0	5.1
Schlafz. 3	26.4	25.2	0	5.1	26.9	25.4	0	5.1	27.1	25.0	0	5.1	27.7	25.8	0	5.1
Wohnbereich	24.0	24.0	0	5.2	24.3	24.2	0	5.2	25.1	24.7	0	5.2	25.1	24.8	0	5.2
Eingang	27.5				28.6				28.3				29.5			
Badezimmer	27.4				28.4				28.2				29.3			

Tabelle 37: Maximal empfundene Temperaturen (Tmax), maximal empfundene Temperaturen während der Nutzungszeit (Tmax N), Anzahl Überhitzungsstunden (Ü-St.) sowie Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) in den verschiedenen Räumen der Wohnung während der Sommerperiode.

Abbildung 48 und Abbildung 49 zeigen die empfundene Temperatur im Schlafzimmer 1 und im Wohnbereich (beide Räume sind gekühlt) für die vier Betrachtungsjahre in Relation zu den Grenzwerten gemäss Norm SIA 180 (SIA, 2014a).

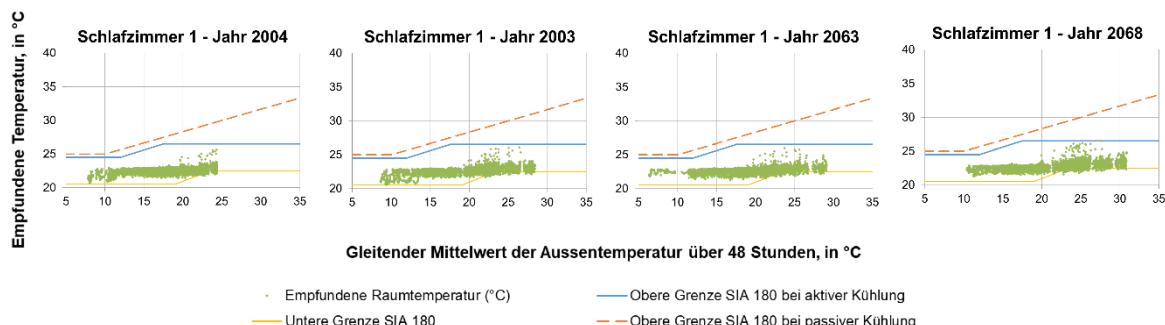


Abbildung 48: Empfundene Temperatur (15-minütiger Wert) im Schlafzimmer 1 im Zeitraum vom 15. April bis zum 16. Oktober für die vier betrachteten Jahre. Die Grenzwertlinien stellen den zulässigen Temperaturbereich in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwerts der Aussentemperatur gemäss Norm SIA 180 (SIA, 2014a) dar.

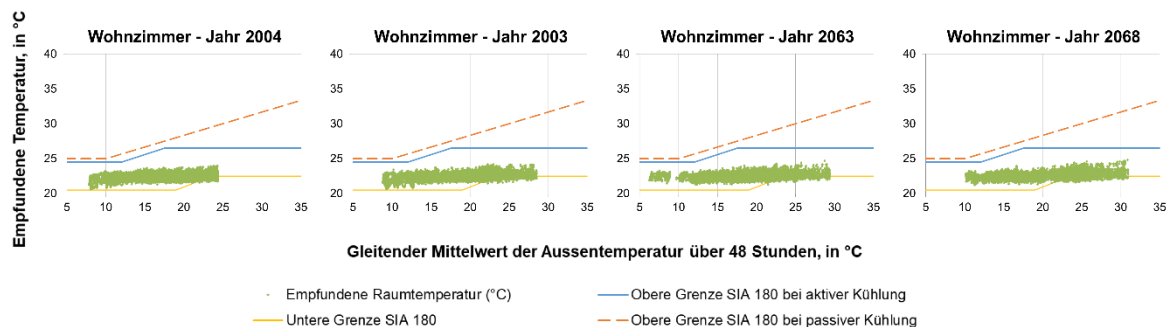


Abbildung 49: Empfundene Temperatur (15-minütiger Wert) im Wohnbereich (gekühlter Raum) im Zeitraum vom 15. April bis zum 16. Oktober für die vier betrachteten Jahre. Die Grenzwertlinien stellen den zulässigen Temperaturbereich in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwerts der Aussentemperatur gemäss Norm SIA 180 (SIA, 2014a) dar.

Wie in Abbildung 50 dargestellt, schwankt die Temperatur im Wohnbereich weniger als die Temperatur im Schlafzimmer, da die Temperatur während der Nacht (Nutzungszeit des Schlafzimmers) konstanter bleibt. Während der Nacht gibt es keine solaren Wärmeeinträge, weniger Wärmeeinträge von Geräten und keine Belegung im Wohnbereich. In den Schlafzimmern hingegen schwankt die Temperatur täglich viel stärker aufgrund der tagsüber anfallenden solaren und internen Wärmeeinträge (die Schlafzimmer werden tagsüber nicht konditioniert), nachts bleibt die Temperatur dank der Kühlung nahe dem Sollwert von 22 °C.

Während der Zeit, in der die Räume durch Fenster belüftet werden (von 06:00 bis 07:00 Uhr und von 18:00 bis 22:00 Uhr, wenn Aussen- und Raumlufttemperatur: $T_{AUL} < T_{RAL}$ & $T_{RAL} > 22$ °C wie in Abschnitt 3.5.3 beschrieben), sinkt die empfundene Temperatur um mehrere Grad. Im warmen Jahr der Periode A1B ist kein Kühlpotenzial durch Nachtauskühlung zu verzeichnen, da die Aussentemperatur kaum unter 22 °C fällt.

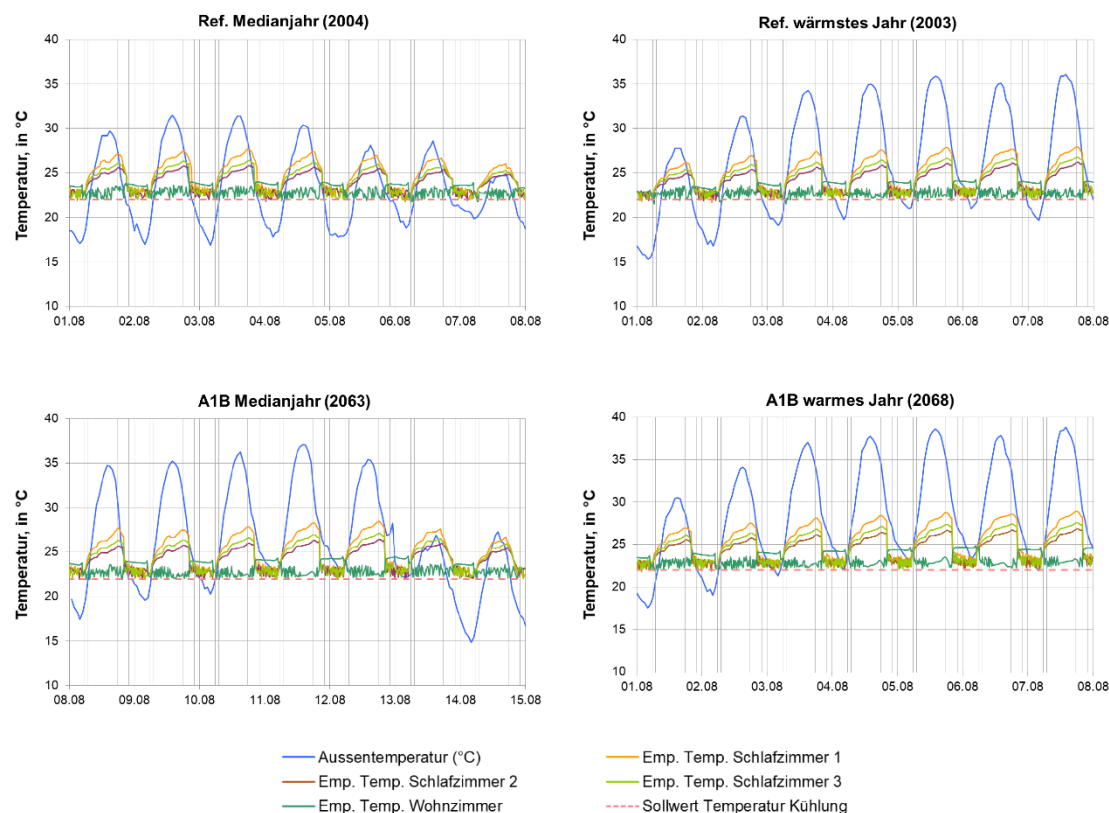


Abbildung 50: Aussentemperatur und empfundene Temperatur in den unterschiedlichen Räumen, während einer besonders warmen Woche vom 1. August bis 8. August mit Ausnahme des Jahres A1B Medianjahr (2063), in dem die besonders warme Woche der Woche vom 8. bis 15. August entspricht. Die vertikalen hellgrauen Linien entsprechen den Zeiträumen mit natürlicher Lüftung.

8.3.1.2 Klimakältebedarf und –verbrauch

Der Klimakältebedarf im Medianjahr der Referenzperiode beträgt 15.3 kWh/(m²a). Dieser Wert ist mehr als doppelt so hoch wie der Standardwert im SIA Merkblatt 2024 (SIA, 2015), welcher 6.6 kWh/(m²a) beträgt. Wobei der Standardwert im Merkblatt auf die Nettogeschossfläche bezogen ist, während der Klimakältebedarf in diesem Dokument der Energiebezugsfläche entspricht. Im Medianjahr der Periode A1B steigt der Klimakältebedarf auf 19.9 kWh/(m²a) an, was im Vergleich zur Referenzperiode einer Erhöhung um 30% entspricht. In einem warmen Jahr der Periode A1B beträgt der Klimakältebedarf 26.8 kWh/(m²a).

Die maximale elektrische Leistung entspricht in allen Jahren der installierten Leistung, da die Kompaktgeräte nur unter Volllast arbeiten. Der Stromverbrauch der Klimakälte steigt von 7.9 kW/(m²a) im Medianjahr der Referenzperiode auf 10.9 W/m² und 15.6 W/m² im Medianjahr bzw. im wärmsten Jahr der Referenzperiode.

Zone	Ref. Medianjahr (2004)				Ref. wärmstes Jahr (2003)				A1B Medianjahr (2063)				A1B warmes Jahr (2068)			
	Bed. (kWh/a)	Leist. Bed. (kW)	Verb. (kWh/a)	elek. Leist. (kW)	Bed. (kWh/a)	Leist. Bed. (kW)	Verb. (kWh/a)	elek. Leist. (kW)	Bed. (kWh/a)	Leist. Bed. (kW)	Verb. (kWh/a)	elek. Leist. (kW)	Bed. (kWh/a)	Leist. Bed. (kW)	Verb. (kWh/a)	elek. Leist. (kW)
Schlafz. 1	259	2.0	130	1.1	384	2.0	198	1.1	340	2.0	178	1.1	505	2.0	270	1.1
Schlafz. 2	331	2.0	182	1.1	429	2.0	238	1.1	381	2.0	217	1.1	553	2.0	313	1.1
Schlafz. 3	224	2.0	117	1.1	330	2.0	175	1.1	288	2.0	156	1.1	431	2.0	238	1.1
Wohnbereich	1153	3.5	588	1.8	1688	3.5	932	1.8	1551	3.5	846	1.8	1951	3.5	1183	1.8
TOTAL	1966	6.0	1016	3.2	2831	6.0	1543	3.2	2560	6.0	1397	3.2	3439	6.0	2004	3.2
pro m ²	15.3	46.7	7.9	24.6	22.0	46.7	12.0	24.6	19.9	46.7	10.9	24.6	26.8	46.7	15.6	24.6

Tabelle 38: Klimakältebedarf, Klimakälteleistungsbedarf, Stromverbrauch und elektrische Leistung für Klimakälte der verschiedenen simulierten Jahren.

8.3.1.3 Potenzial einer Photovoltaikanlage ohne und mit Batteriespeicher

Tabelle 39 zeigt den Stromverbrauch für die Kühlung sowie die anteilmässige Abdeckung des Stromverbrauchs für zwei Photovoltaikanlagen (ohne und mit Batteriespeicher). Die Photovoltaikanlage ist dimensioniert mit einer Leistung von 10 W/m²_{EBF} gemäss Artikel 1.27 der MuKE 2014 (EnDK, 2015), was einer Leistung von 1.2-1.3 kW_p (der Unterschied ist auf die Sonneneinstrahlung der Klimadatei zurückzuführen) in der Referenzperiode entspricht. Der Batteriespeicher hat eine Kapazität von 1.5 kWh, bei einer nützlichen Kapazität von 1.275 kWh. Eine Erhöhung der Effizienz der Systeme (Kühlung, Photovoltaikanlage oder Batteriespeicher) in der Periode A1B wurde berücksichtigt, wie im Abschnitt 3.3 erläutert. In der Periode A1B beträgt aufgrund des erwarteten, höheren Wirkungsgrades der Photovoltaikanlage die Leistung der Photovoltaikanlage 1.6 kW_p und die nutzbare Kapazität des Batteriespeichers 1.5 kWh.

In den vier Referenzjahren kann die Photovoltaikanlage direkt zwischen 16 % und 24 % des Stromverbrauchs für die Kühlung bereitstellen. Der hohe Stromverbrauch der mobilen Kompaktgeräte (Abbildung 51) sowie die Tatsache, dass die Kühlung eher ab den frühen Nachmittagsstunden notwendig ist, verhindern einen höheren direkten Deckungsanteil. Die Installation eines Batteriespeichers ermöglicht es, den Eigenverbrauch aus der Photovoltaikanlage um 15-23 % zu erhöhen. Dies ermöglicht in der Referenzperiode eine Verdoppelung des Eigenverbrauchs.

Strombilanz (kWh)	Ref. Medianjahr (2004)		Ref. wärmstes Jahr (2003)		A1B Medianjahr (2063)		A1B warmes Jahr (2068)	
	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie
	1.3 kW _p	1.3 kW _p + 1.5 kWh	1.2 kW _p	1.2 kW _p + 1.5 kWh	1.6 kW _p	1.6 kW _p + 1.5 kWh	1.6 kW _p	1.6 kW _p + 1.5 kWh
Total produzierte Strom (PV)	1334	1334	1478	1478	1981	1981	1931	1931
Total Stromverbrauch	1016	1016	1543	1543	1397	1397	2004	2004
Total Stromverbrauch aus der PV	161	161	262	262	338	338	455	455
Total Stromverbr. aus der Batterie		233		265		293		301
Total Stromverbr. aus dem Netz	855	630	1281	1016	1058	765	1549	1226
Total produzierte Strom eingespeist in das Netz	1173	909	1216	904	1642	1308	1476	1133
Anteil abgedeckte Stromverbr. durch PV (und Batterie)	16%	39%	17%	34%	24%	45%	23%	38%

Tabelle 39: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der Wohnung und Anteil des abgedeckten Stromverbrauchs für die Kühlung durch die Photovoltaikanlage mit und ohne Batteriespeicher in den verschiedenen simulierten Jahren.

Die Grafiken links in der Abbildung 51 zeigen, inwieweit der Stromverbrauch für die Kühlung mit der Stromproduktion der Photovoltaik zusammenfällt.

In den Jahren der Periode A1B ist zu erkennen, wie das Kompaktgerät im Wohnbereich (tagsüber) früher und länger in Betrieb genommen wird. Daher wird ein grösserer Teil des von der Photovoltaikanlage erzeugten Stroms für die Kühlung verwendet.

Bei der Integration eines Batteriespeichers (rechts in der Abbildung 51) kann der akkumulierte Strom den Stromverbrauch der Kühlung nur für kurze Zeit bereitstellen aufgrund des hohen Stromverbrauchs der Kompaktgeräte. Aus diesem Grund entleert sich der Batteriespeicher schnell, sobald die Photovoltaikanlage den Kühlbedarf nicht mehr decken kann. Zudem ist die kontinuierliche Leistung der Batterie tiefer als die Kühlleistung bei Volllast.

Die Leistung der Photovoltaikanlage reicht ebenso nicht aus, um die Leistung der Kühlung bei Volllast zu decken. Eine Verdopplung der Leistung der Photovoltaikanlage (bei gleichbleibender Leistung der Batterie) würde es ermöglichen, den Eigenverbrauch stärker zu erhöhen als bei einer Verdopplung der Batteriekapazität.

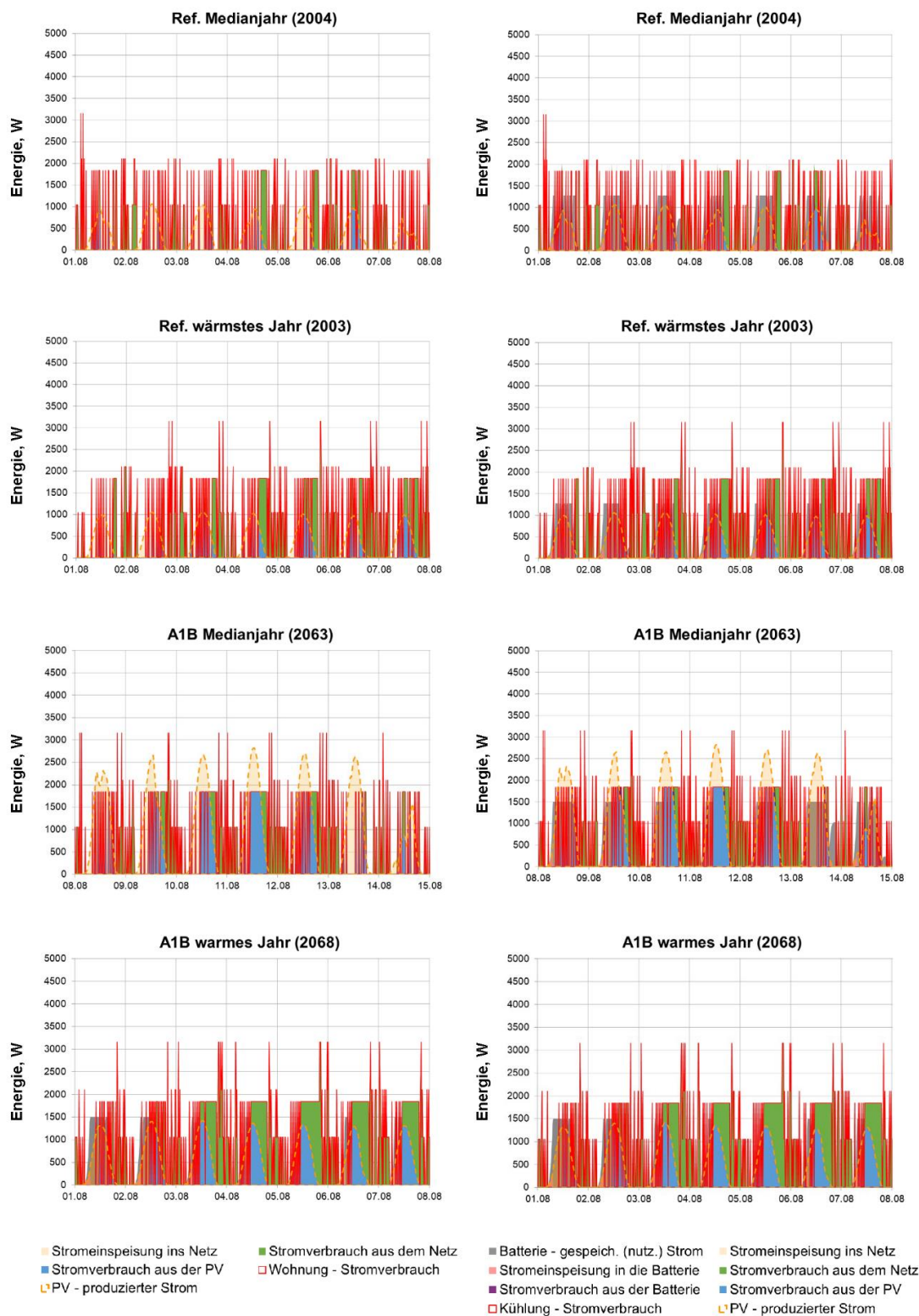


Abbildung 51: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der Kühlung aus der Photovoltaikanlage (linke Kolonne) und aus der Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher (rechte Kolonne). Für die beiden Referenzjahre sowie für das warme Jahr 2066 wurde der besonders warme Zeitraum vom 1. August bis 8. August dargestellt. Für das Jahres A1B Medianjahr (2063) ist der Zeitraum auf die besonders warme Woche vom 8. August bis 15. August verschoben.

Bei der Betrachtung des gesamten Stromverbrauchs in der Wohnung, einschliesslich des Stromverbrauchs von Beleuchtung und Geräten, wird eine Photovoltaikanlage mit einer Leistung von $30 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ dimensioniert (das Dreifache der bisherigen Photovoltaikanlage). Die Leistung der Photovoltaikanlage beträgt dabei $3.6\text{-}3.8 \text{ kW}_p$ in der Referenzperiode ($4.8\text{-}4.9 \text{ kW}_p$ in der Periode A1B) und in Kombination mit

einem Batteriespeicher von 4.5 kWh (nützliche Kapazität von 3.825 kWh in der Referenzperiode und 4.5 kWh in der Periode A1B).

Wie in Tabelle 40 dargestellt, kann die Photovoltaikanlage direkt zwischen 33 % und 39 % des Stromverbrauchs der Wohnung decken. Dieser Anteil würde sich erhöhen, wenn ausschliesslich der Kühlbedarf betrachtet werden würde, da der Stromverbrauch über den Tag und das Jahr verteilt ist und nicht mit der Spitzenproduktion der Photovoltaikanlage übereinstimmt. Die Batterie erhöht den Anteil des gedeckten Stromverbrauchs der Wohnung um bis zu 50%.

Strombilanz (kWh)	Ref. Medianjahr (2004)		Ref. wärmstes Jahr (2003)		A1B Medianjahr (2063)		A1B warmes Jahr (2068)	
	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie
	3.8 kW _p	3.8 kW _p + 4.5 kWh	3.6 kW _p	3.6 kW _p + 4.5 kWh	4.9 kW _p	4.9 kW _p + 4.5 kWh	4.8 kW _p	4.8 kW _p + 4.5 kWh
Total produzierte Strom (PV)	4002	4002	4433	4433	5942	5942	5793	5793
Total Stromverbrauch	3382	3382	3898	3898	3754	3754	4361	4361
Total Stromverbrauch aus der PV	1112	1112	1338	1338	1482	1482	1651	1651
Total Stromverbr. aus der Batterie		346		350		404		414
Total Stromverbr. aus dem Netz	2269	1923	2560	2202	2272	1867	2710	2287
Total produzierte Strom eingespeist in das Netz	2890	2483	3095	2683	4460	4007	4142	3679
Anteil abgedeckte Stromverbr. durch PV (und Batterie)	33%	43%	34%	43%	39%	50%	38%	47%

Tabelle 40: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der Wohnung und der Anteil des gedeckten Stromverbrauchs für die Kühlung durch die Photovoltaikanlage mit und ohne Batteriespeicher in den verschiedenen simulierten Jahren.

In Abbildung 52 wurde die nachfolgende Grafik für das wärmste Jahr der Referenzperiode nochmals vergrössert. In Abbildung 52 sowie in den Grafiken links in der Abbildung 53 ist zu erkennen, dass die elektrische Produktion der Photovoltaikanlage (gelb gestrichelte Linie) fast immer höher ist als der Stromverbrauch der Wohnung (rote Linie). Man kann den Unterschied zwischen dem Verbrauchsanteil, welcher durch den Strom aus der Photovoltaikanlage (blauer Bereich) gedeckt wird und demjenigen der aus dem Netz bezogen wird (grüner Bereich), erkennen. Dieser Stromverbrauch umfasst den Verbrauch für die Kühlung, aber auch für Geräte und Beleuchtung, weshalb dieser über den ganzen Tag verteilt ist. Die Verbrauchsspitzen aus dem Netz bedeuten, dass die Kompaktgeräte in Betrieb sind. Diese sind hoch aufgrund ihrer hohen elektrischen Leistung (siehe Abbildung 64 zum Vergleich mit denen von Split-Systemen). Der in der Batterie gespeicherte Strom (grauer Bereich) wird sehr schnell verbraucht (violetter Bereich) aufgrund der hohen Leistung der Klimageräte.

Ref. wärmstes Jahr (2003)

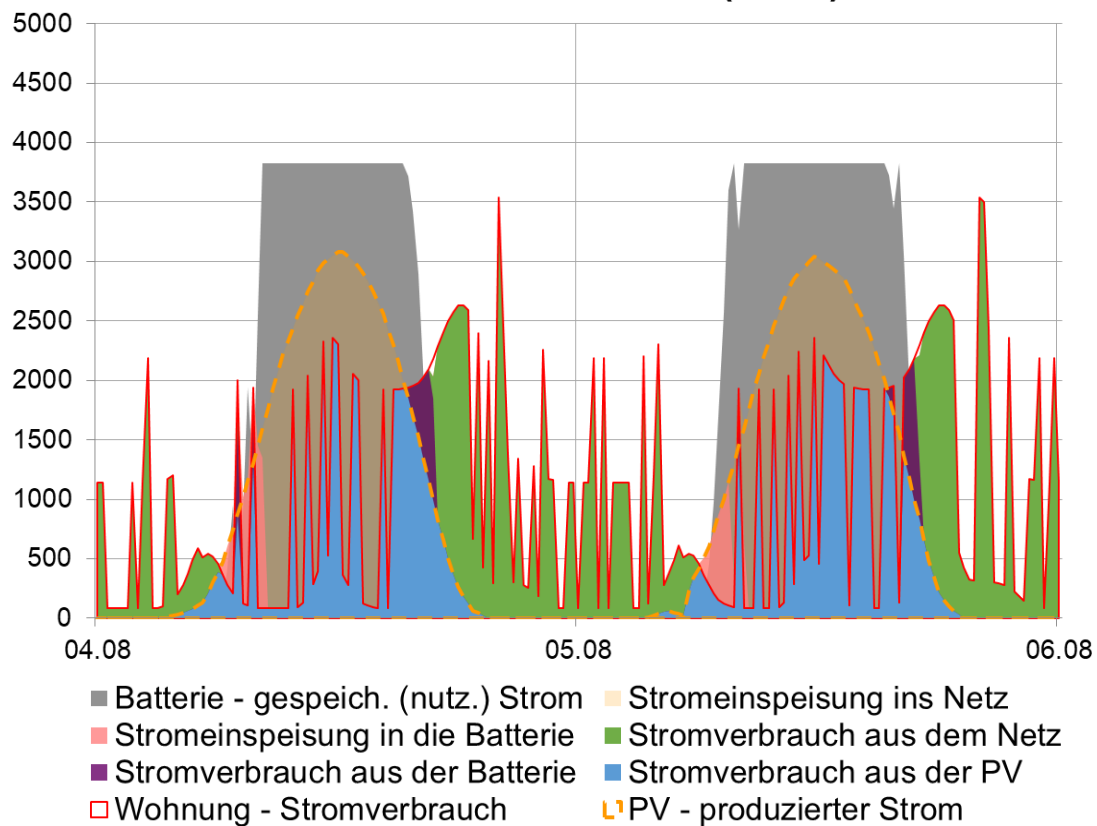


Abbildung 52: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der gesamten Wohnung aus der Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher vom 4. bis 6. August für das wärmste Jahr der Referenzperiode (2003).

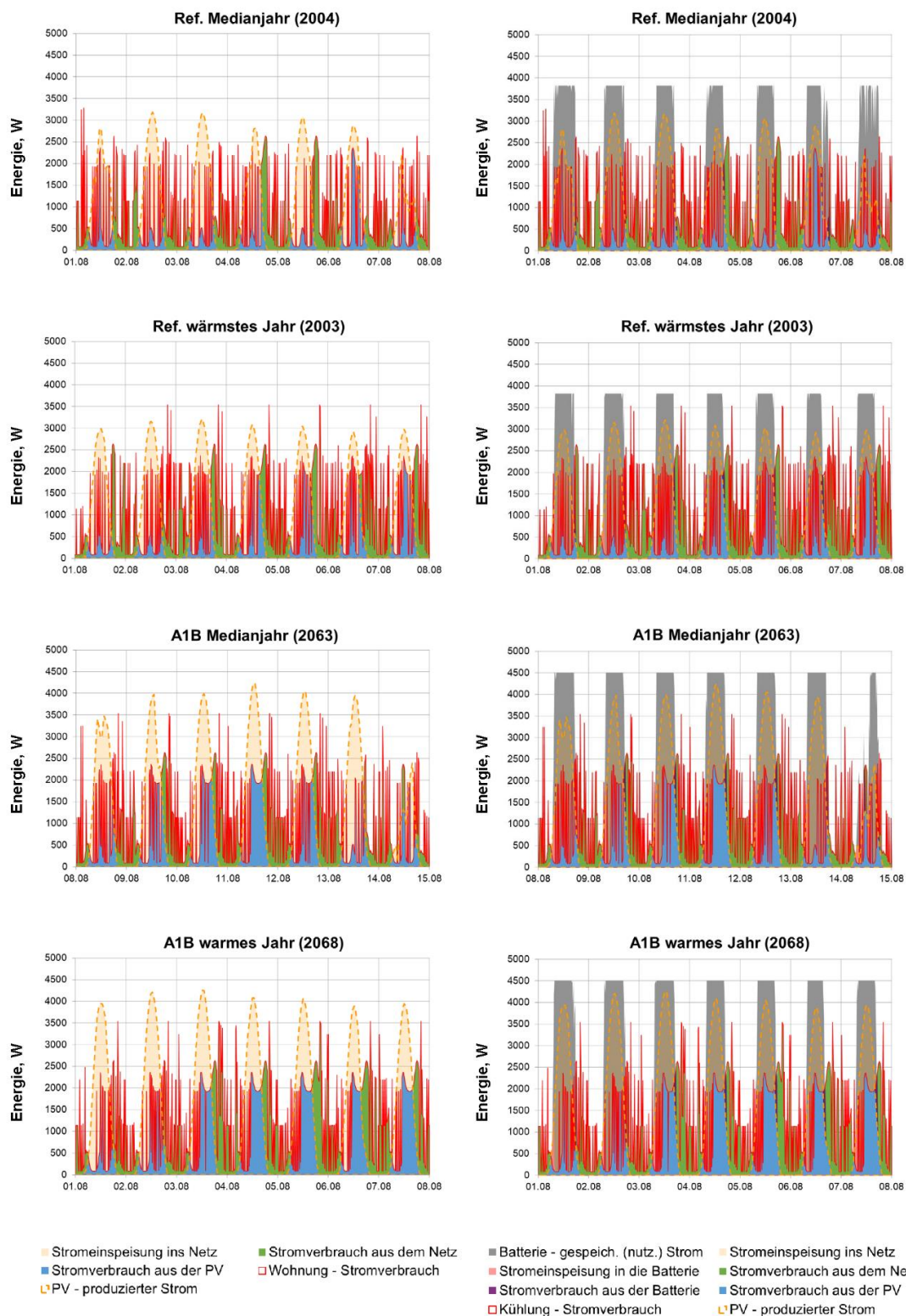


Abbildung 53: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der gesamten Wohnung aus der Photovoltaikanlage (linke Kolonne) und aus der Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher (rechte Kolonne) vom 1. bis 8. August respektive 8. bis 15. August für das Medianjahr der Periode A1B (2063).

8.3.2 Referenz Szenario: Kompaktgeräte

Im Referenzszenario werden die gleichen Bedingungen wie im «Worst-Case» Szenario angenommen, mit Ausnahme einer höheren Solltemperatur von 25.5 °C anstelle von 22 °C.

8.3.2.1 Thermische Behaglichkeit

Die Tabelle 41 stellt einen Überblick der maximal empfundenen Temperaturen, der jährlichen Anzahl Überhitzungsstunden sowie des Predicted Percentage of Dissatisfied PPD für die vier untersuchten Jahre in den Zonen der Referenzwohnung dar.

Nur im Medianjahr der Referenzperiode gibt es keine Überhitzungsstunden in den Schlafzimmern (mit Ausnahme von einer Stunde im Schlafzimmer 1). Wie im Abschnitt 3.5.7 erläutert, werden die Klimageräte über die Lufttemperatur geregelt; trotzdem die Solllufttemperatur einen Grad unter der Grenzkurve für die aktive Kühlung nach Norm SIA 180 (SIA, 2014a) liegt, steigt die empfundene Temperatur auf über 26.5 °C an. Die meisten Überhitzungsstunden treten bei einer Temperatur nahe 26.5 °C auf (wie in den Grafiken der Abbildung 54 dargestellt). An sehr heissen Tagen, an denen die Räume nicht natürlich belüftet werden können, ist das mobile Kompaktgeräte ungenügend effektiv, um die Raumtemperatur bei Inbetriebnahme der Anlage innerhalb kürzester Zeit auf die Solltemperatur zu senken. Damit die empfundene Temperatur immer unterhalb der Grenzkurve gehalten wird, wäre daher eine niedrigere Solltemperatur notwendig.

Im Wohnbereich treten mehr Überhitzungsstunden auf. Wie in der Grafik des Medianjahres der Referenzperiode in Abbildung 55 dargestellt ist, treten diese bereits an nicht sehr heissen Tagen auf, in dem Bereich in dem die obere Grenzkurve bei der aktiven Kühlung gemäss Norm SIA 180 (SIA, 2014a) bei 24.5 und 26.5 °C liegt. Im warmen Jahr der Periode A1B beträgt die Anzahl der Überhitzungsstunden 260.

Der Wert des PPD steigt von 6-6.5 % im Medianjahr der Referenzperiode auf 7-7.5 % im Medianjahr der Periode A1B.

Zone	Ref. Medianjahr (2004)				Ref. wärmstes Jahr (2003)				A1B Medianjahr (2063)				A1B warmes Jahr (2068)			
	Tmax (°C)	Tmax N (°C)	Ü-St.	PPD	Tmax (°C)	Tmax N (°C)	Ü-St.	PPD	Tmax (°C)	Tmax N (°C)	Ü-St.	PPD	Tmax (°C)	Tmax N (°C)	Ü-St.	PPD
Schlafz. 1	29.1	26.6	1	6.0	30.2	28.5	44	7.4	30.4	28.9	17	6.7	31.2	28.4	139	8.5
Schlafz. 2	27.4	26.4	0	6.5	28.8	28.2	30	7.8	28.8	26.9	19	7.4	29.4	28.1	83	8.7
Schlafz. 3	27.7	26.4	0	6.1	29.2	28.2	22	7.5	29.2	26.9	6	6.9	29.9	28.2	99	8.4
Wohnbereich	26.7	26.7	63	6.6	27.1	27.1	174	7.6	27.2	27.2	123	7.3	27.5	27.4	260	8.6
Eingang	28.9				30.5				29.9				31.4			
Badezimmer	29.0				30.5				30.0				31.3			

Tabelle 41: Maximal empfundene Temperaturen (Tmax), maximal empfundene Temperaturen während der Nutzungszeit (Tmax N), Anzahl Überhitzungsstunden (Ü-St.) sowie Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) in den verschiedenen Räumen der Wohnung während der Sommerperiode.

Abbildung 54 und Abbildung 55 zeigen die empfundene Temperatur im Schlafzimmer 1 und im Wohnbereich (beide Räume sind gekühlt) für die vier Betrachtungsjahre in Relation zu den Grenzwerten gemäss Norm SIA 180 (SIA, 2014a). Die Grafiken zeigen die Zunahme der empfundenen Temperatur im Vergleich zum «Worst-Case» Szenario mit einigen Stunden ausserhalb des Behaglichkeitsbereichs.

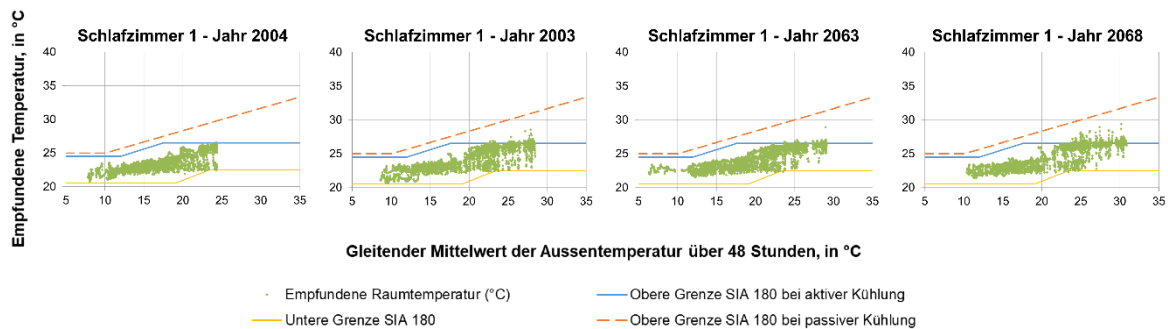


Abbildung 54: Empfundene Temperatur (15-minütiger Wert) im Schlafzimmer 1 im Zeitraum vom 15. April bis zum 16. Oktober für die vier betrachteten Jahre. Die Grenzwertlinien stellen den zulässigen Temperaturbereich in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwerts der Aussentemperatur gemäss Norm SIA 180 (SIA, 2014a) dar.

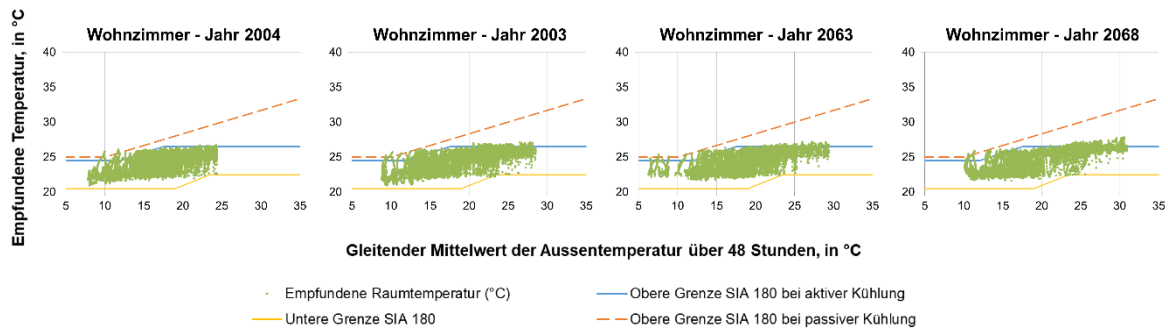


Abbildung 55: Empfundene Temperatur (15-minütiger Wert) im Wohnbereich (gekühlter Raum) im Zeitraum vom 15. April bis zum 16. Oktober für die vier betrachteten Jahre. Die Grenzwertlinien stellen den zulässigen Temperaturbereich in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwerts der Aussentemperatur gemäss Norm SIA 180 (SIA, 2014a) dar.

Die Temperaturverläufe in den verschiedenen Räumen in Abbildung 56 sind ähnlich wie diejenigen des «Worst-Case» Szenarios. Die minimale Temperatur der Räume hat sich auf 25.5 °C verschoben und auch die erreichten Maximaltemperaturen sind höher. Die Fensterlüftung von 06:00 bis 07:00 Uhr ermöglicht eine Absenkung der Temperatur unter 25.5 °C in allen Jahren, ausser im warmen Jahr der Periode A1B, in dem nur an den ersten beiden Tagen des Betrachtungszeitraums die Aussentemperatur unter 22 °C liegt.

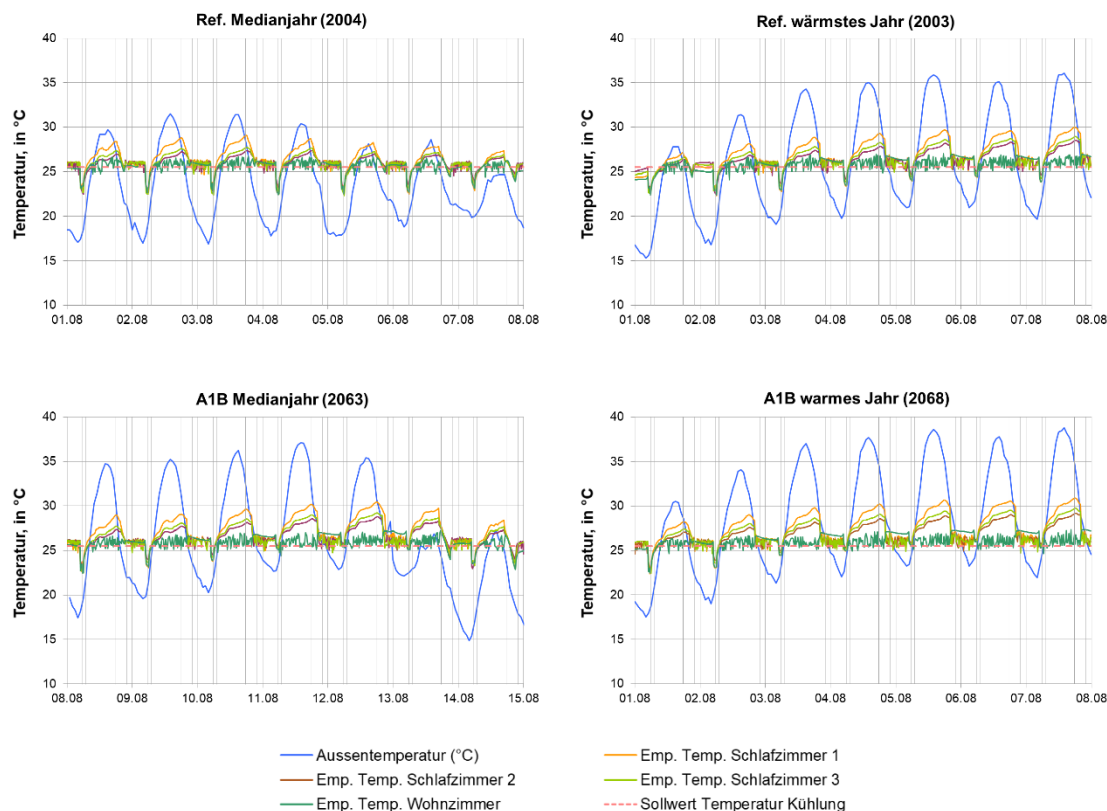


Abbildung 56: Aussentemperatur und empfundene Temperatur in den unterschiedlichen Räumen, während einer besonders warmen Woche vom 1. August bis 8. August mit Ausnahme des Jahres A1B Medianjahr (2063), in dem die besonders warme Woche der Woche vom 8. bis 15. August entspricht. Die vertikalen hellgrauen Linien entsprechen den Zeiträumen mit natürlicher Lüftung.

8.3.2.2 Klimakältebedarf und –verbrauch

Der Klimakältebedarf und –verbrauch (Tabelle 42) dieses Szenarios ist aufgrund der höheren Solltemperatur deutlich geringer als im «Worst-Case» Szenario.

Sowohl der Klimakältebedarf als auch der Klimakälteverbrauch im Medianjahr der Referenzperiode und Periode A1B wurden um mehr als 85% reduziert. In den anderen Jahren, welche wärmer sind, ist diese Reduktion weniger ausgeprägt. Im Medianjahr der Referenzperiode sinkt der Stromverbrauch für Klimakälte von 7.9 kWh/(m²a) im «Worst-Case» Szenario auf 1 kWh/(m²a) im Referenz Szenario. Im warmen Jahr der Referenzperiode kommt es zu einer Reduktion von 12.0 kWh/(m²a) auf 3.5 kWh/(m²a), was ca. 70 % entspricht. Im warmen Jahr der Periode A1B kommt es zu einer Reduktion von 15.6 kWh/(m²a) auf 6.1 kWh/(m²a), was ca. 60 % entspricht.

Bezogen auf die spezifische Leistung ist die Reduktion sehr gering. Die Kompaktgeräte arbeiten etwas effizienter, da die Solltemperatur etwas höher ist.

Zone	Ref. Medianjahr (2004)				Ref. wärmstes Jahr (2003)				A1B Medianjahr (2063)				A1B warmes Jahr (2068)			
	Bed. (kWh/a)	spez. Leist. Bed. (kW)	Verb. (kWh/a)	spez. Leist. Verb. (kW)	Bed. (kWh/a)	spez. Leist. Bed. (kW)	Verb. (kWh/a)	spez. Leist. Verb. (kW)	Bed. (kWh/a)	spez. Leist. Bed. (kW)	Verb. (kWh/a)	spez. Leist. Verb. (kW)	Bed. (kWh/a)	spez. Leist. Bed. (kW)	Verb. (kWh/a)	spez. Leist. Verb. (kW)
Schlafz. 1	14	2.0	8	1.0	89	2.0	43	1.0	45	2.0	23	1.0	185	2.0	92	1.0
Schlafz. 2	22	2.0	14	1.0	120	2.0	65	1.0	66	2.0	39	1.0	204	2.0	111	1.0
Schlafz. 3	9	2.0	5	1.0	78	2.0	40	1.0	39	2.0	22	1.0	141	2.0	73	1.0
Wohnbereich	216	3.5	103	1.7	607	3.5	297	1.7	439	3.5	221	1.7	959	3.5	508	1.7
TOTAL	261	6.0	130	2.9	894	6.0	445	2.9	590	6.0	304	2.9	1489	6.0	784	2.9
pro m ²	2.0	46.7	1.0	22.3	7.0	46.7	3.5	22.3	4.6	46.7	2.4	22.3	11.6	46.7	6.1	22.3

Tabelle 42: Klimakältebedarf, spezifischer Klimakälteleistungsbedarf, Stromverbrauch und spezifischer Stromleistungsverbrauch für Klimakälte der verschiedenen simulierten Jahre.

8.3.2.3 Potenzial einer Photovoltaikanlage ohne und mit Batteriespeicher

Tabelle 43 zeigt die Stromerzeugung, den Stromverbrauch für Kühlung und den Anteil des Eigenverbrauchs durch eine Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 1.2-1.3 kW_p in der Referenzperiode (1.6 kW_p in der Periode A1B) sowie durch eine gleiche Anlage gekoppelt mit einem Batteriespeicher mit einer Kapazität von 1.5 kWh (nützliche Kapazität von 1.275 kWh in der Referenzperiode, 1.5 kWh in der Periode A1B).

In den vier Referenzjahren kann die Photovoltaikanlage direkt zwischen 23 % und 37 % des Stromverbrauchs für die Kühlung bereitstellen. Da der Stromverbrauch für die Kühlung so drastisch reduziert wurde, kann mit der Photovoltaikanlage ein grösserer Teil dieses Verbrauchs gedeckt werden. Der grösste Teil der erzeugten Energie wird jedoch direkt ins Netz eingespeist. Die Installation eines Batteriespeichers ermöglicht es, den Anteil des Eigenverbrauchs an Strom aus der Photovoltaikanlage um bis zu 20-35 % zu erhöhen.

Strombilanz (kWh)	Ref. Medianjahr (2004)		Ref. wärmstes Jahr (2003)		A1B Medianjahr (2063)		A1B warmes Jahr (2068)	
	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie
	1.3 kW _p	1.3 kW _p + 1.5 kWh	1.2 kW _p	1.2 kW _p + 1.5 kWh	1.6 kW _p	1.6 kW _p + 1.5 kWh	1.6 kW _p	1.6 kW _p + 1.5 kWh
Total produzierte Strom (PV)	1334	1334	1478	1478	1981	1981	1931	1931
Total Stromverbrauch	130	130	445	445	304	304	784	784
Total Stromverbrauch aus der PV	33	33	101	101	112	112	227	227
Total Stromverbr. aus der Batterie		45		103		76		148
Total Stromverbr. aus dem Netz	96	54	344	241	192	116	557	402
Total produzierte Strom eingespeist in das Netz	1301	1250	1377	1255	1869	1782	1704	1536
Anteil abgedeckte Stromverbr. durch PV (und Batterie)	26%	61%	23%	46%	37%	62%	29%	48%

Tabelle 43: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der Wohnung und Anteil des gedeckten Stromverbrauchs für die Kühlung durch die Photovoltaikanlage mit und ohne Batteriespeicher in den verschiedenen simulierten Jahren.

Die Grafiken links in der Abbildung 57 zeigen, inwieweit der Stromverbrauch für die Kühlung mit der Stromproduktion der Photovoltaik zusammenfällt. Im Vergleich zum «Worst-Case» Szenario ist der Betrieb des Klimagerätes deutlich geringer. Um die Solltemperatur von 25.5 °C zu halten schaltet sich das Klimagerät ständig ein und aus und bleibt somit nicht stundenlang in Betrieb.

Am Vormittag kann die Photovoltaikanlage den Strom ins Netz einspeisen. Ab 18:00 Uhr ist die Stromerzeugung der Photovoltaikanlage sehr gering, so dass der Stromverbrauch für die Kühlung mit Strom aus dem Netz gedeckt werden muss.

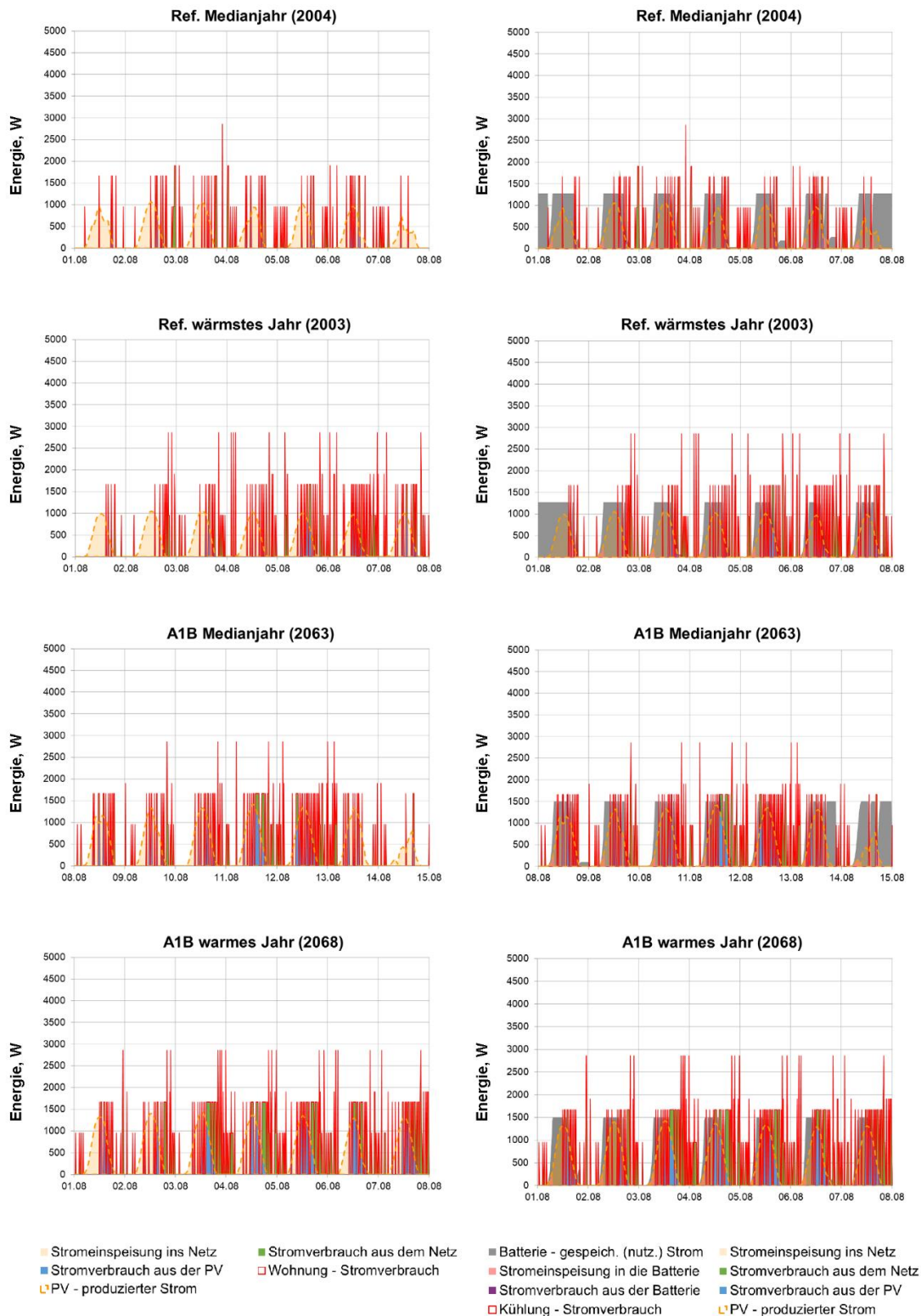


Abbildung 57: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der Kühlung aus der Photovoltaikanlage (linke Kolonne) und aus der Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher (rechte Kolonne). Für die beiden Referenzjahre sowie für das warme Jahr 2086 wurde der besonders warme Zeitraum vom 1. August bis 8. August dargestellt. Für das Medianjahr der Periode A1B (2063) ist der Zeitraum auf die besonders warme Woche vom 8. August bis 15. August verschoben.

Bei der Betrachtung des gesamten Stromverbrauchs in der Wohnung wird eine grosse Anlage mit einer Leistung von 3.6-3.8 kW_p in der Referenzperiode und ein Batteriespeicher mit einer Kapazität von 4.5 kWh berücksichtigt.

Wie in Tabelle 44 dargestellt, kann die Photovoltaikanlage direkt zwischen 34 % und 40 % des Stromverbrauchs der Wohnung decken. Die Batterie erhöht den Anteil des gedeckten Stromverbrauchs der Wohnung auf bis zu 50 %. Dieser prozentuale Anteil des Eigenverbrauchs ist sehr ähnlich dem, den man erhält, wenn nur die Kühlung mit einer kleineren Photovoltaikanlage gedeckt wird.

Der Stromverbrauch aus der Photovoltaikanlage und der Batterie ist aufgrund des zusätzlichen Verbrauchs für Geräte und Beleuchtung höher.

Strombilanz (kWh)	Ref. Medianjahr (2004)		Ref. wärmstes Jahr (2003)		A1B Medianjahr (2063)		A1B warmes Jahr (2068)	
	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie
	3.8 kW _p	3.8 kW _p + 4.5 kWh	3.6 kW _p	3.6 kW _p + 4.5 kWh	4.9 kW _p	4.9 kW _p + 4.5 kWh	4.8 kW _p	4.8 kW _p + 4.5 kWh
Total produzierte Strom (PV)	4002	4002	4433	4433	5942	5942	5793	5793
Total Stromverbrauch	2499	2499	2803	2803	2666	2666	3145	3145
Total Stromverbrauch aus der PV	841	841	986	986	1069	1069	1216	1216
Total Stromverbr. aus der Batterie		288		297		361		372
Total Stromverbr. aus dem Netz	1658	1370	1817	1513	1598	1236	1929	1550
Total produzierte Strom eingespeist in das Netz	3161	2823	3447	3097	1069	4469	4577	4162
Anteil abgedeckte Stromverbr. durch PV (und Batterie)	34%	45%	35%	46%	40%	54%	39%	50%

Tabelle 44: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der Wohnung und Anteil des gedeckten Stromverbrauchs durch Kühlung durch die Photovoltaikanlage mit und ohne Batteriespeicher in den verschiedenen simulierten Jahren.

Die Grafiken der Abbildung 59 zeigen, dass der Direktverbrauch aus der Photovoltaikanlage höher ist als im vorherigen Fall, in dem nur das Gebäude gekühlt wurde.

Abbildung 58 zeigt die nachfolgende Grafik für das wärmste Jahr der Referenzperiode etwas grösser dargestellt. Wie in den Grafiken links in der Abbildung 59 ist zu erkennen, dass die elektrische Produktion der Photovoltaikanlage (gelb gestrichelte Linie) fast immer höher ist als der Stromverbrauch der Wohnung (rote Linie), analog dem vorherigen Szenario. Dabei lässt sich der Unterschied zwischen dem Verbrauchsanteil, welcher durch den Strom aus der Photovoltaikanlage (blauer Bereich) gedeckt wird und demjenigen, der aus dem Netz (grüner Bereich) bezogen wird, erkennen. Dieser Stromverbrauch umfasst den Verbrauch für die Kühlung, aber auch für Geräte und Beleuchtung, weshalb der Verbrauch über den ganzen Tag verteilt ist. Im Vergleich zum vorherigen Szenario treten nicht nur die Verbrauchsspitzen aus dem Netz weniger oft auf, sondern auch der Stromverbrauch der Wohnung ist geringer, da weniger Energie aus dem Netz und aus der Photovoltaikanlage verbraucht wird. Der in der Batterie gespeicherte Strom (grauer Bereich) wird aufgrund der hohen Leistung der Klimageräte sehr schnell verbraucht (violetter Bereich).

Ref. wärmstes Jahr (2003)

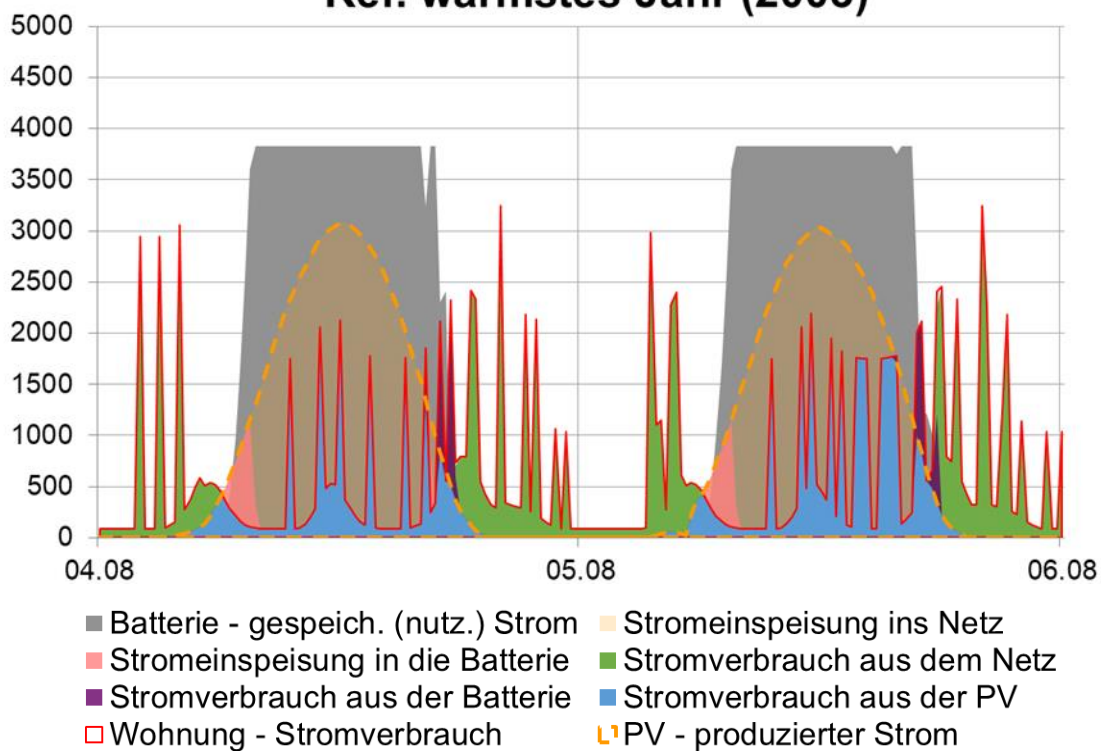


Abbildung 58: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der gesamten Wohnung aus der Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher vom 4. bis 6. August für das wärmste Jahr der Referenzperiode (2003).

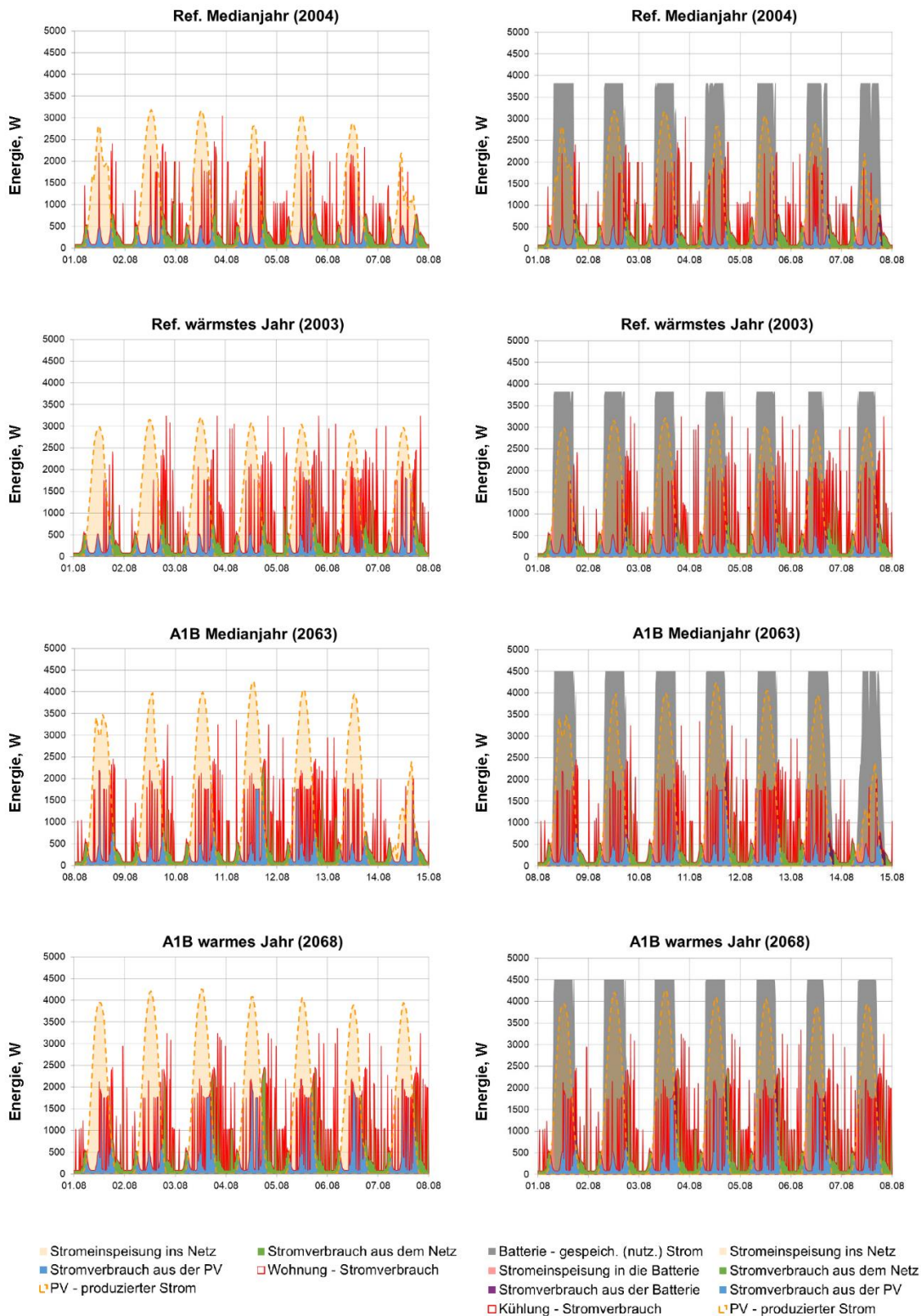


Abbildung 59: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der gesamten Wohnung aus der Photovoltaikanlage (linke Kolonne) und aus der Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher (rechte Kolonne) vom 1. bis 8. August respektive 8. bis 15. August für das Medianjahr der Periode A1B (2063).

8.3.3 Szenario 1: Multi-Split-System: Wohnung

Im Szenario 1 wird die Kühlung der Wohnung mit einem Sollwert der Lufttemperatur von 25.5 °C durch ein Multi-Split-System (ein Aussengerät angeschlossen an ein Innengerät im Zimmer und ein weiteres in jedem Schlafzimmer) mit einem SEER-Wert von 7.5 durchgeführt. Der Wohnbereich wird nur bei Belegung von 06:00 bis 21:00 Uhr gekühlt, während die Schlafzimmer von 21:00 bis 06:00 Uhr gekühlt werden. Dieses Szenario verfügt somit im Vergleich zum Referenz Szenario über ein effizienteres Kühlsystem.

8.3.3.1 Thermische Behaglichkeit

Die Tabelle 45 gibt einen Überblick der maximal empfundenen Temperaturen, der jährlichen Anzahl Überhitzungsstunden sowie des Predicted Percentage of Dissatisfied PPD für die vier untersuchten Jahre in den Zonen der Referenzwohnung.

Die empfundene Temperatur in den verschiedenen Räumen der Wohnung ist, wie im Referenz Szenario, aufgrund der höheren Solltemperatur etwas höher. Wie im Referenz Szenario gibt es bei einer Solltemperatur von 25.5 °C in allen Fällen, ausser in den Schlafzimmern, im Medianjahr der Referenzperiode Überhitzungsstunden. In diesem Fall ist die Anzahl der Überhitzungsstunden etwas geringer als im Referenz Szenario. In den Schlafzimmern übersteigt die Anzahl der Überhitzungsstunden in keinem der untersuchten Jahre 100 (obwohl die empfundene Temperatur in den warmen Jahren 28 °C erreicht). Im Wohnbereich werden 160 Überhitzungsstunden im warmen Jahr der Periode A1B mit einer empfundenen Temperatur von 27.4 °C erreicht.

Der Wert des PPD steigt von 6-6.5 % im Medianjahr der Referenzperiode auf 6.5-7 % im Medianjahr der Periode A1B.

Zone	Ref. Medianjahr (2004)				Ref. wärmstes Jahr (2003)				A1B Medianjahr (2063)				A1B warmes Jahr (2068)			
	Tmax (°C)	Tmax N (°C)	Ü-St.	PPD	Tmax (°C)	Tmax N (°C)	Ü-St.	PPD	Tmax (°C)	Tmax N (°C)	Ü-St.	PPD	Tmax (°C)	Tmax N (°C)	Ü-St.	PPD
Schlafz. 1	29.0	26.3	0	6.0	30.2	28.5	11	7.0	30.3	27.1	3	6.5	31.2	28.4	97	8.0
Schlafz. 2	27.2	26.3	0	6.3	28.6	27.5	5	7.3	28.6	26.8	12	7.0	29.4	28.1	65	8.3
Schlafz. 3	27.6	26.2	0	6.0	29.1	28.1	5	7.0	29.1	26.8	2	6.7	29.9	28.2	49	8.0
Wohnbereich	26.5	26.5	47	6.4	27.1	27.1	91	7.3	27.1	27.1	73	7.0	27.5	27.4	160	8.1
Eingang	28.8				30.4				29.8				31.4			
Badezimmer	28.9				30.4				29.9				31.3			

Tabelle 45: Maximal empfundene Temperaturen (Tmax), maximal empfundene Temperaturen während der Nutzungszeit (Tmax N), Anzahl Überhitzungsstunden (Ü-St.) sowie Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) in den verschiedenen Räumen der Wohnung während der Sommerperiode.

Abbildung 60 und Abbildung 61 zeigen die empfundene Temperatur im Schlafzimmer 1 und im Wohnbereich (beide Räume sind gekühlt) für die vier Betrachtungsjahre in Relation zu den Grenzwerten gemäss Norm SIA 180 (SIA, 2014a). Die Grafiken sind denen des Referenz Szenarios sehr ähnlich, jedoch mit etwas niedrigeren Temperaturen.

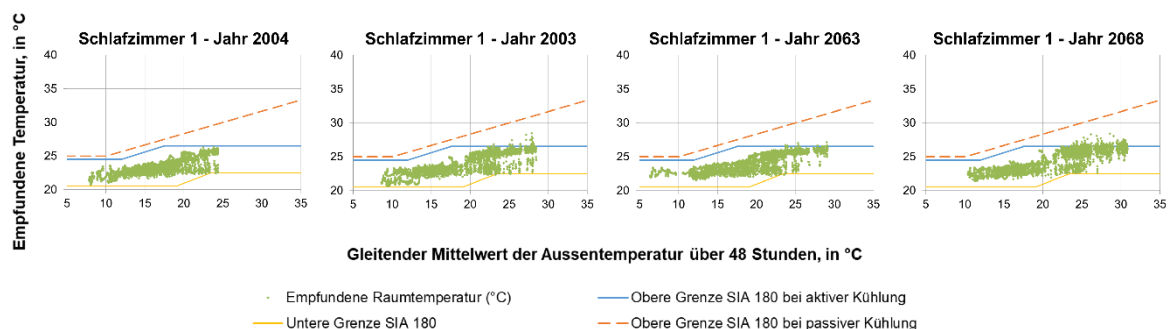


Abbildung 60: Empfundene Temperatur (15-minütiger Wert) im Schlafzimmer 1 (gekühlter Raum) während der Nutzungszeit (von 21:00 bis 06:00 Uhr) im Zeitraum vom 15. April bis zum 16. Oktober für die vier betrachteten Jahre. Die Grenzwertlinien stellen den zulässigen Temperaturbereich in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwerts der Aussentemperatur gemäss Norm SIA 180 (SIA, 2014a) dar.

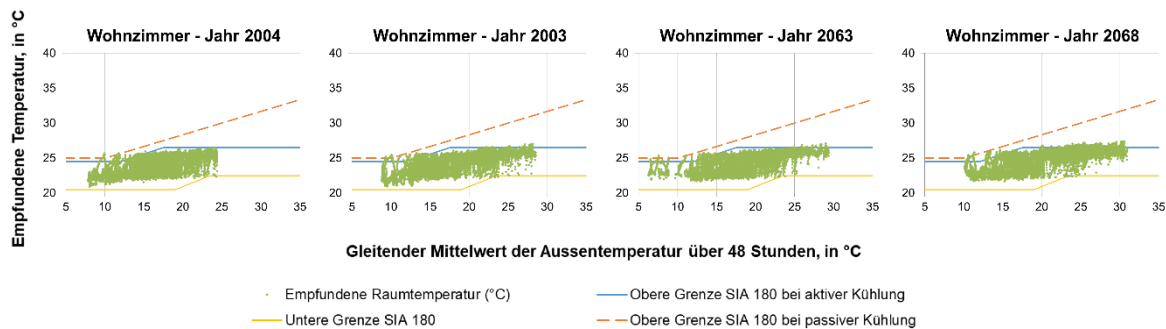


Abbildung 61: Empfundene Temperatur (15-minütiger Wert) im Wohnbereich (gekühlter Raum) während der Nutzungszeit (von 06:00 bis 21:00 Uhr) im Zeitraum vom 15. April bis zum 16. Oktober für die vier betrachteten Jahre. Die Grenzwertlinien stellen den zulässigen Temperaturbereich in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwerts der Aussentemperatur gemäss Norm SIA 180 (SIA, 2014a) dar.

Wie in Abbildung 62 dargestellt, sind die Temperaturverläufe der Räume im Vergleich zum Referenz Szenario sehr ähnlich. Die Temperaturschwankung in den Zeiträumen, in denen gekühlt wird, ist etwas niedriger als im Falle des Referenzszenarios. Die Split-Systeme können ihre Last anpassen und die Solltemperatur besser erreicht werden als mit Kompaktgeräten, welche ständig ein- und ausschalten.

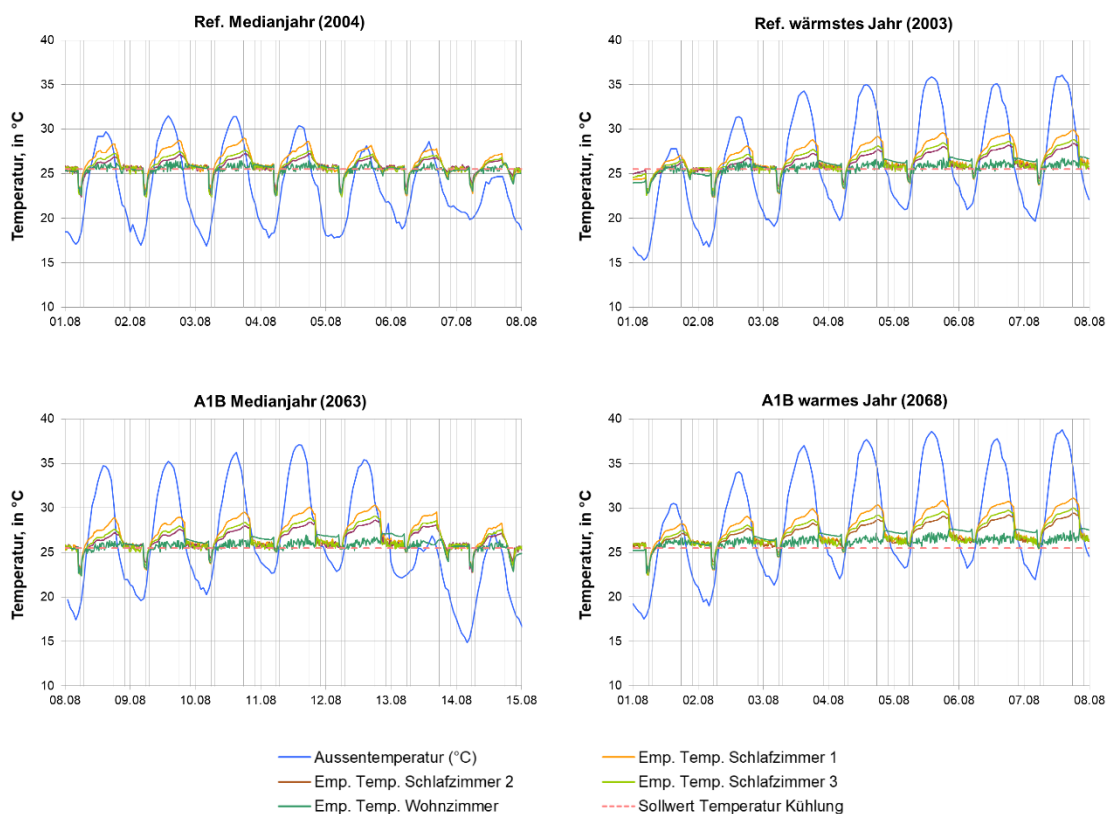


Abbildung 62: Aussentemperatur und empfundene Temperatur in den unterschiedlichen Räumen, während einer besonders warmen Woche vom 1. August bis 8. August mit Ausnahme des Medianjahrs der Periode A1B (2063), in dem die besonders warme Woche der Woche vom 8. bis 15. August entspricht. Die vertikalen, hellgrauen Linien entsprechen den Zeiträumen mit natürlicher Lüftung.

8.3.3.2 Klimakältebedarf und –verbrauch

Der Klimakälteverbrauch (Tabelle 46) dieses Szenarios ist aufgrund der besseren Effizienz des Klimagerätes geringer als im Referenz Szenario. Der Klimakältebedarf ist jedoch etwas höher, da das Multi-Split-System die Temperatur näher an 25.5 °C hält als das Kompaktgerät.

Der Stromverbrauch für Klimakälte im Medianjahr der Referenzperiode wurde im Vergleich zum «Worst-Case» Szenario um mehr als 90 % von 7.9 kWh/(m²a) auf 0.5 kWh/(m²a) reduziert. Im Vergleich zum Referenz Szenario beträgt diese Reduktion etwas weniger als 50 %. Bezogen auf das Medianjahr der Periode A1B sind die erreichten Reduktionen sehr ähnlich, während sie in den warmen Jahren beider Perioden etwas geringer sind. Im wärmsten Jahr der Referenzperiode beträgt der Kühlverbrauch 1.8 kWh/(m²a) und im warmen Jahr der Periode A1B 2.8 kWh/(m²a).

Bezogen auf die elektrische Leistung ist die Reduktion gross, weil das Multi-Split-System bei Teillast arbeiten kann. Im Medianjahr der Referenzperiode kommt es zu einer Reduktion im Vergleich zum Referenz Szenario von 22.3 W/m² auf einen Wert von 6.0 W/m², was ca. 70 % entspricht. Während im warmen Jahr der Periode A1B der Verbrauch von 22.3 W/m² auf 14.8 W/m² sinkt, was ungefähr ein Drittel beträgt.

Zone	Ref. Medianjahr (2004)				Ref. wärmstes Jahr (2003)				A1B Medianjahr (2063)				A1B warmes Jahr (2068)			
	Bed. (kWh/a)	Leist. Bed. (kW)	Verb. (kWh/a)	elek. Leist. (kW)	Bed. (kWh/a)	Leist. Bed. (kW)	Verb. (kWh/a)	elek. Leist. (kW)	Bed. (kWh/a)	Leist. Bed. (kW)	Verb. (kWh/a)	elek. Leist. (kW)	Bed. (kWh/a)	Leist. Bed. (kW)	Verb. (kWh/a)	elek. Leist. (kW)
Schlafz. 1	18	0.6	3	0.1	99	0.9	17	0.2	56	1.0	10	0.3	177	1.1	33	0.3
Schlafz. 2	24	0.6	4	0.1	125	0.9	21	0.2	71	0.9	12	0.3	189	1.1	35	0.3
Schlafz. 3	13	0.6	2	0.1	82	0.9	14	0.2	42	1.0	7	0.3	137	1.0	25	0.3
Wohnbereich	278	2.6	61	0.8	719	3.5	182	1.6	525	3.5	124	1.5	945	3.5	266	1.9
TOTAL	332	2.6	69	0.8	1025	3.5	235	1.6	694	3.5	154	1.5	1448	3.5	359	1.9
pro m²	2.6	20.2	0.5	6.0	8.0	27.3	1.8	12.2	5.4	27.3	1.2	11.8	11.3	27.3	2.8	14.8

Tabelle 46: Klimakältebedarf, Klimakälteleistungsbedarf, Stromverbrauch und elektrische Leistung für Klimakälte der verschiedenen simulierten Jahre.

8.3.3.3 Potenzial einer Photovoltaikanlage ohne und mit Batteriespeicher

Tabelle 47 zeigt die Stromerzeugung, den Stromverbrauch für Kühlung und den Anteil des Eigenverbrauchs durch eine Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 1.2-1.3 kW_p in der Referenzperiode (1.6 kW_p in der Periode A1B) sowie durch eine gleiche Anlage gekoppelt mit einem Batteriespeicher mit einer Kapazität von 1.5 kWh (nutzbare Kapazität von 1.275 kWh in der Referenzperiode, 1.5 kWh in der Periode A1B).

Die Photovoltaikanlage kann direkt zwischen 55 % und 71 % des Stromverbrauchs für die Kühlung decken, was einem höheren Prozentsatz als im «Worst-Case» und im Referenz Szenario entspricht. Das liegt nicht nur daran, dass der Stromverbrauch, sondern auch die benötigte Leistung, geringer ist.

Der Stromverbrauch aus dem Netz ist mit 20 kWh im Medianjahr der Referenzperiode und mit 161 kWh im warmen Jahr der Periode A1B sehr gering. Dementsprechend wäre es kontraproduktiv, einen Batteriespeicher zu installieren, selbst wenn der Eigenverbrauch bis zu 87 % beträgt, da der Stromverbrauch aus der Batterie sehr gering ist.

Strombilanz (kWh)	Ref. Medianjahr (2004)		Ref. wärmstes Jahr (2003)		A1B Medianjahr (2063)		A1B warmes Jahr (2068)	
	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie
	1.3 kW _p	1.3 kW _p + 1.5 kWh	1.2 kW _p	1.2 kW _p + 1.5 kWh	1.6 kW _p	1.6 kW _p + 1.5 kWh	1.6 kW _p	1.6 kW _p + 1.5 kWh
Total produzierte Strom (PV)	1334	1334	1478	1478	1981	1981	1931	1931
Total Stromverbrauch	69	69	235	235	154	154	359	359
Total Stromverbrauch aus der PV	49	49	126	126	106	106	198	198
Total Stromverbr. aus der Batterie		11		32		21		46
Total Stromverbr. aus dem Netz	20	11	109	77	48	27	161	114
Total produzierte Strom eingespeist in das Netz	1285	1273	1351	1314	1875	1851	1733	1681
Anteil abgedeckte Stromverbr. durch PV (und Batterie)	71 %	87 %	54 %	67 %	69 %	82 %	55 %	68 %

Tabelle 47: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der Wohnung und Anteil des gedeckten Stromverbrauchs für die Kühlung durch die Photovoltaikanlage mit und ohne Batteriespeicher in den verschiedenen simulierten Jahren.

Die Grafiken links in der Abbildung 63 zeigen, inwieweit der Stromverbrauch für die Kühlung mit der Stromproduktion der Photovoltaikanlage zusammenfällt. Der Stromverbrauch des Multi-Split-Systems ist nicht konstant. Seine Last variiert je nach Bedarf und lässt somit keine Verbrauchsspitzen auftreten. Die Integration eines Batteriespeichers (rechts in der Abbildung 63) würde aufgrund des geringen Stromverbrauchs dieses Szenarios keinen nennenswerten Beitrag leisten.

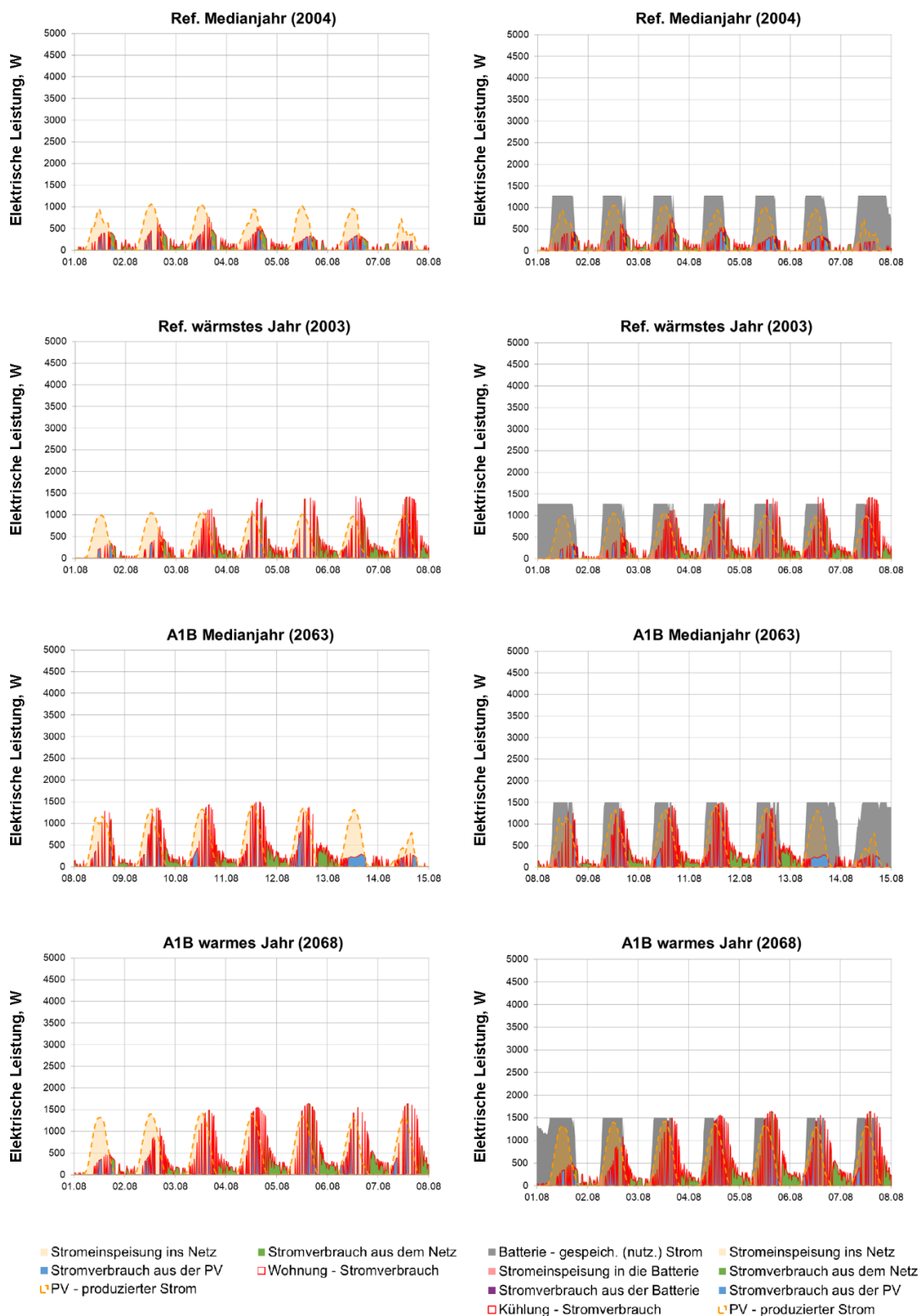


Abbildung 63: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der Kühlung aus der Photovoltaikanlage (linke Kolonne) und aus der Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher (rechte Kolonne). Für die beiden Referenzjahre sowie für das warme Jahr 2086 wurde der besonders warme Zeitraum vom 1. August bis 8. August dargestellt. Für das Medianjahr der Periode A1B (2063) ist der Zeitraum auf die besonders warme Woche vom 8. August bis 15. August verschoben.

Bei der Betrachtung des gesamten Stromverbrauchs in der Wohnung wird eine grosse Anlage mit einer Leistung von 3.6-3.8 kW_p in der Referenzperiode und ein Batteriespeicher mit einer Kapazität von 4.5 kWh berücksichtigt.

Wie in Tabelle 48 erkennbar, kann die Photovoltaikanlage je nach Jahr zwischen 34 % und 40 % des Stromverbrauchs der Wohnung direkt decken. In Kombination mit einem Batteriespeicher beträgt die Deckung des Stromverbrauchs 45-54 %. Die Ergebnisse sind praktisch gleich wie im Referenz Szenario, da die Kühlung in beiden Fällen nur einen kleinen Teil des Gesamtverbrauchs ausmacht. Daher bleibt die Bilanz trotz der Tatsache, dass der Klimakälteverbrauch in diesem Szenario geringer ist, sehr ähnlich.

Strombilanz (kWh)	Ref. Medianjahr (2004)		Ref. wärmstes Jahr (2003)		A1B Medianjahr (2063)		A1B warmes Jahr (2068)	
	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie
	3.8 kW _p	3.8 kW _p + 4.5 kWh	3.6 kW _p	3.6 kW _p + 4.5 kWh	4.9 kW _p	4.9 kW _p + 4.5 kWh	4.8 kW _p	4.8 kW _p + 4.5 kWh
Total produzierte Strom (PV)	4002	4002	4433	4433	5942	5942	5793	5793
Total Stromverbrauch	2438	2438	2593	2593	2515	2515	2720	2720
Total Stromverbrauch aus der PV	822	822	922	922	1003	1003	1068	1068
Total Stromverbr. aus der Batterie		277		284		352		354
Total Stromverbr. aus dem Netz	1616	1339	1671	1382	1512	1160	1652	1291
Total produzierte Strom eingespeist in das Netz	3180	2854	3511	3177	4939	4546	4725	4329
Anteil abgedeckte Stromverbr. durch PV (und Batterie)	34 %	45 %	36 %	46 %	40 %	54 %	39 %	52 %

Tabelle 48: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der Wohnung und Anteil des gedeckten Stromverbrauchs für die Kühlung durch die Photovoltaikanlage mit und ohne Batteriespeicher in den verschiedenen simulierten Jahren.

Wie in Abbildung 65 dargestellt reicht der direkt verbrauchte und in der Batterie gespeicherte Strom nicht aus, um den täglichen Stromverbrauch der Wohnung zu decken. In diesem Fall ist die erzeugte Leistung der Photovoltaikanlage höher als die elektrische Leistung für Kühlung, Geräte und Beleuchtung.

In Abbildung 64 ist die Grafik für das wärmste Jahr der Referenzperiode nochmals grösser dargestellt. In den Grafiken links in der Abbildung 65 ist zu erkennen, dass die elektrische Produktion der Photovoltaikanlage (gelb gestrichelte Linie) immer höher ist als der Stromverbrauch der Wohnung (rote Linie); mit Kompaktgeräten dies war nicht der Fall. Der Unterschied zwischen dem Verbrauchsanteil, welcher durch Strom aus der Photovoltaikanlage (blauer Bereich) gedeckt wird und demjenigen, der aus dem Netz (grüner Bereich) bezogen wird, ist zu erkennen. Dieser Stromverbrauch umfasst den Verbrauch für die Kühlung sowie für Geräte und Beleuchtung, weshalb der Verbrauch über den ganzen Tag verteilt ist. Im Vergleich zu den Szenarien mit Kompaktgeräten treten nicht nur die Verbrauchsspitzen aus dem Netz viel weniger oft auf, sondern auch der Stromverbrauch der Wohnung ist geringer. Somit muss weniger Energie aus dem Netz und aus der Photovoltaikanlage bezogen werden. Der in der Batterie gespeicherte Strom (grauer Bereich) wird dabei sehr schnell verbraucht (violetter Bereich), eine grössere Batterie wäre von Vorteil.

Ref. wärmstes Jahr (2003)

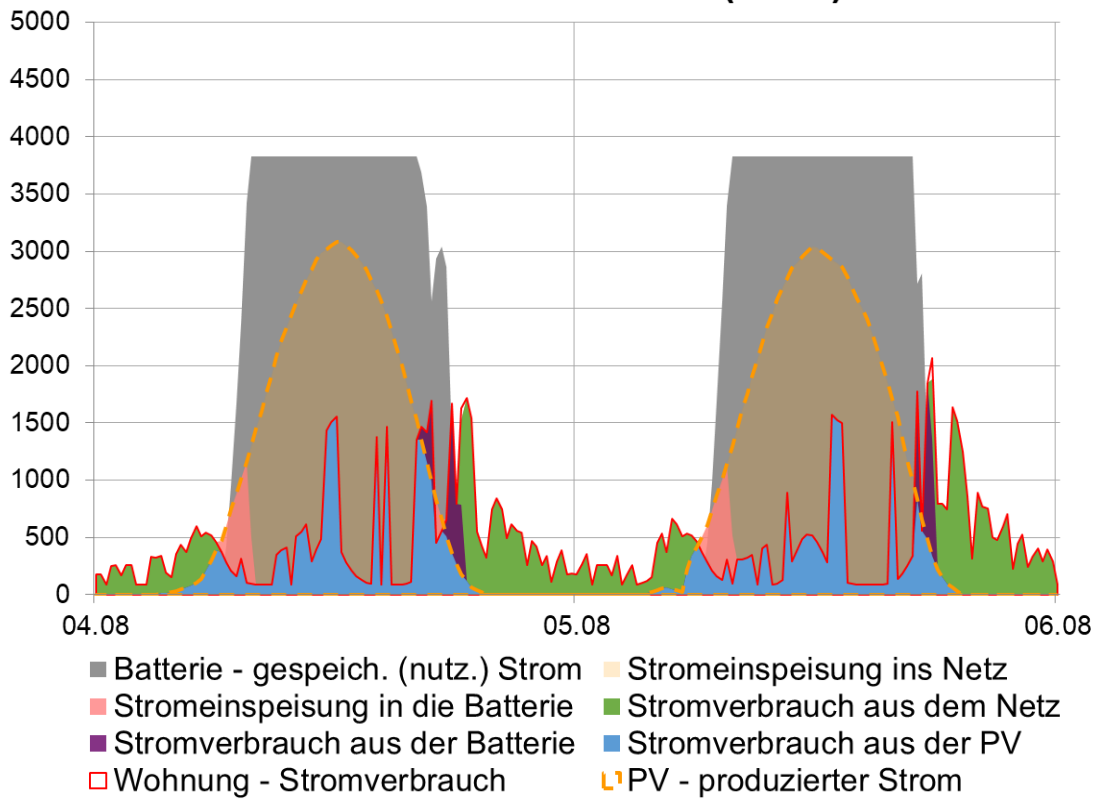


Abbildung 64: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der gesamten Wohnung aus der Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher vom 4. bis 6. August für das wärmste Jahr der Referenzperiode (2003).

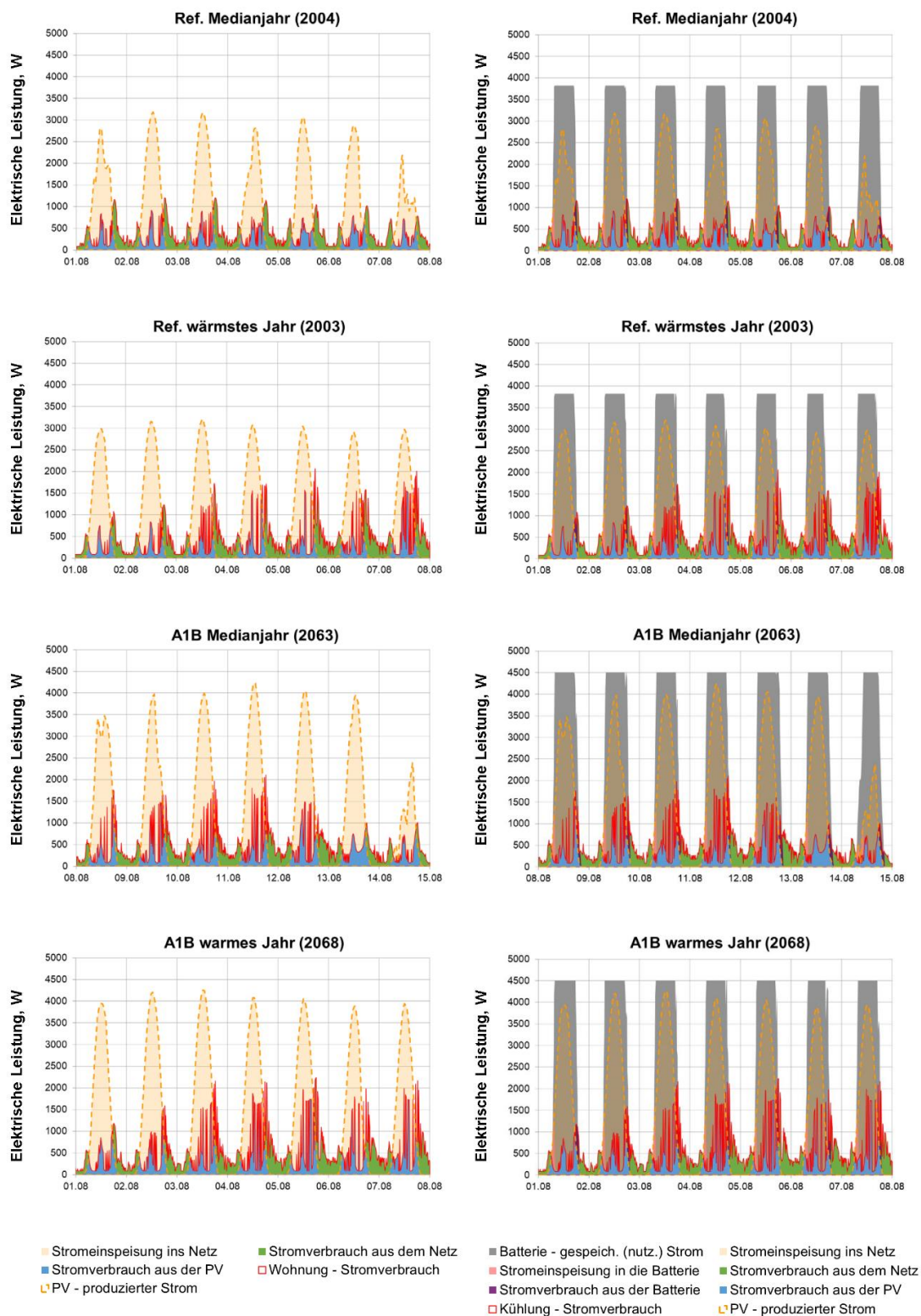


Abbildung 65: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der gesamten Wohnung aus der Photovoltaikanlage (linke Kolonne) und aus der Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher (rechte Kolonne) vom 1. bis 8. August respektive 8. bis 15. August für das Medianjahr der Periode A1B (2063).

8.3.4 Szenario 2: Split-System: Wohnbereich

In Szenario 2 wurde ein Single-Split-System (mit einem SEER-Wert von 7.5 analog zum Szenario 1) im Wohnbereich mit einer Solltemperatur von 25.5 °C simuliert. Der Wohnbereich wird nur bei Belegung von 06:00 bis 21:00 Uhr gekühlt, während keines der Schlafzimmer gekühlt wird.

8.3.4.1 Thermische Behaglichkeit

Die Tabelle 49 gibt einen Überblick der maximal empfundenen Temperaturen, der jährlichen Anzahl Überhitzungsstunden sowie des Predicted Percentage of Dissatisfied PPD für die vier untersuchten Jahre in den Zonen der Referenzwohnung.

Der Wohnbereich ist der einzige gekühlte Raum in diesem Szenario. Trotzdem treten einige Überhitzungsstunden auf, da durch die Solltemperatur (das Klimagerät ist durch die Raumlufttemperatur geregelt) nicht garantiert werden kann, dass die empfundene Temperatur immer unter 26.5 °C bleibt. In allen simulierten Jahren bleibt die Anzahl Überhitzungsstunden aber unter 100 und mit einer maximal empfundenen Temperatur bei Belegung von 27.6 °C. Der PPD-Wert bleibt in allen Jahren unter 8 %.

In den Schlafzimmern, die nicht gekühlt werden, werden im Medianjahr der Referenzperiode etwa 100 Überhitzungsstunden mit einer maximalen empfundenen Temperatur bei Belegung (von 21:00 bis 06:00 Uhr) von ca. 27.7 °C erreicht. Im Medianjahr der Periode A1B gibt es ca. 200 Überhitzungsstunden in den Schlafzimmern 1 und 3 und 270 h im Schlafzimmer 2. Im wärmsten Jahr der Referenzperiode gibt es mehr als 600 Überhitzungsstunden. Der PPD-Wert aller Schlafzimmer bleibt im Medianjahr der Periode A1B bei rund 10 %, während der PPD-Wert der Schlafzimmer im warmen Jahr der Periode A1B bis auf 23 % ansteigen kann.

Zone	Ref. Medianjahr (2004)				Ref. wärmstes Jahr (2003)				A1B Medianjahr (2063)				A1B warmes Jahr (2068)			
	Tmax (°C)	Tmax N (°C)	Ü-St.	PPD	Tmax (°C)	Tmax N (°C)	Ü-St.	PPD	Tmax (°C)	Tmax N (°C)	Ü-St.	PPD	Tmax (°C)	Tmax N (°C)	Ü-St.	PPD
Schlafz. 1	29.4	27.7	75	6.4	31.8	30.5	351	11.0	31.8	30.3	197	8.9	33.9	32.5	620	18.7
Schlafz. 2	28.0	27.7	108	7.3	30.9	30.6	514	13.5	30.3	30.1	270	10.6	32.8	32.3	692	23.1
Schlafz. 3	28.1	27.4	81	6.6	31.2	30.6	418	12.0	30.7	30.2	220	9.4	33.3	32.6	657	20.9
Wohnbereich	26.5	26.5	48	6.4	27.1	27.1	75	7.3	27.3	27.2	56	7.0	27.8	27.6	88	7.9
Eingang	29.0				31.3				30.4				32.9			
Badezimmer	29.0				30.6				30.0				31.6			

Tabelle 49: Maximal empfundene Temperaturen (Tmax), maximal empfundene Temperaturen während der Nutzungszeit (Tmax N), Anzahl Überhitzungsstunden (Ü-St.) sowie Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) in den verschiedenen Räumen der Wohnung während der Sommerperiode.

Abbildung 66 und Abbildung 67 zeigen die empfundene Temperatur im Schlafzimmer 1 (ohne Kühlung) und im Wohnzimmer (gekühlter Raum) für die vier Betrachtungsjahre in Relation zu den Grenzwerten nach Norm SIA 180 (SIA, 2014a).

Abbildung 66 verdeutlicht, dass die empfundene Raumtemperatur der Schlafzimmer in allen Jahren die Grenzkurve für die aktive Kühlung gemäss Norm SIA 180 (SIA, 2014a) überschreitet. Die empfundene Temperatur im Wohnzimmer (Abbildung 67) bleibt meistens innerhalb der Komfortgrenzen nach Norm SIA 180 (SIA, 2014a).

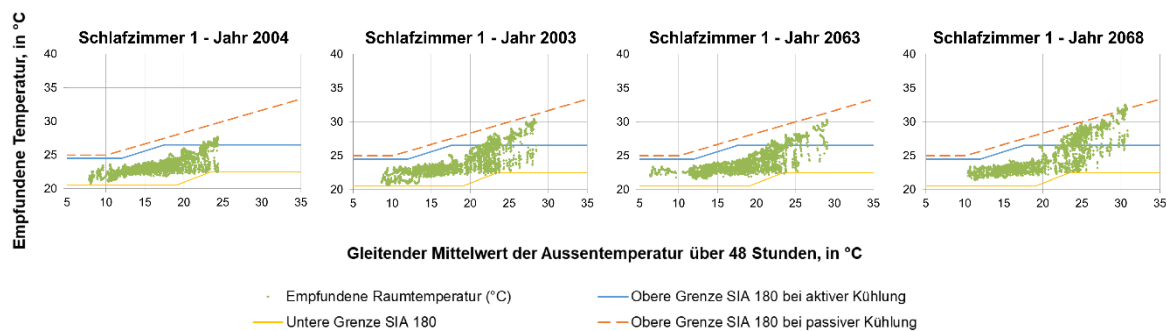


Abbildung 66: Empfundene Temperatur (15-minütiger Wert) im Schlafzimmer 1 (ohne Kühlung) im Zeitraum vom 15. April bis zum 16. Oktober für die vier betrachteten Jahre. Die Grenzwertlinien stellen den zulässigen Temperaturbereich in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwerts der Aussentemperatur gemäss Norm SIA 180 (SIA, 2014a) dar.

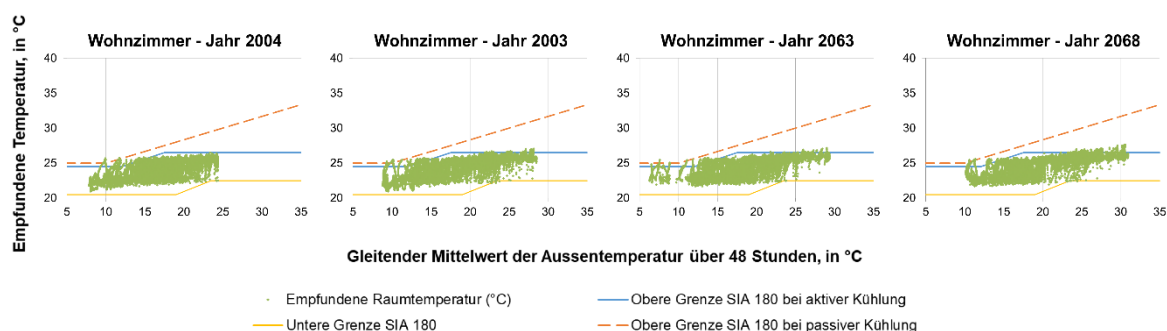


Abbildung 67: Empfundene Temperatur (15-minütiger Wert) im Wohnbereich (gekühlter Raum) im Zeitraum vom 15. April bis zum 16. Oktober für die vier betrachteten Jahre. Die Grenzwertlinien stellen den zulässigen Temperaturbereich in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwerts der Aussentemperatur gemäss Norm SIA 180 (SIA, 2014a) dar.

Wie in Abbildung 68 dargestellt, bleibt die empfundene Temperatur im Wohnbereich in den vier Referenzjahren über 25.5 °C und somit über dem Sollwert der Lufttemperatur. In den warmen Jahren kommt es zu einem Temperaturanstieg im Wohnbereich während der Nacht (wenn dieser nicht gekühlt wird), was auf die höheren Temperaturen in den Schlafzimmern zurückzuführen ist, da die Aussentemperatur normalerweise niedriger ist.

In allen Jahren, ausser im Medianjahr der Referenzperiode, ist zu beobachten, dass die Temperatur in den Schlafzimmern während einer Hitzeperiode täglich ansteigt. Während im Medianjahr der Referenzperiode die empfundene Temperatur in den Schlafzimmern in der Nacht 27 °C nie übersteigt, steigt sie im warmen Jahr der Periode A1B auf über 32 °C an.

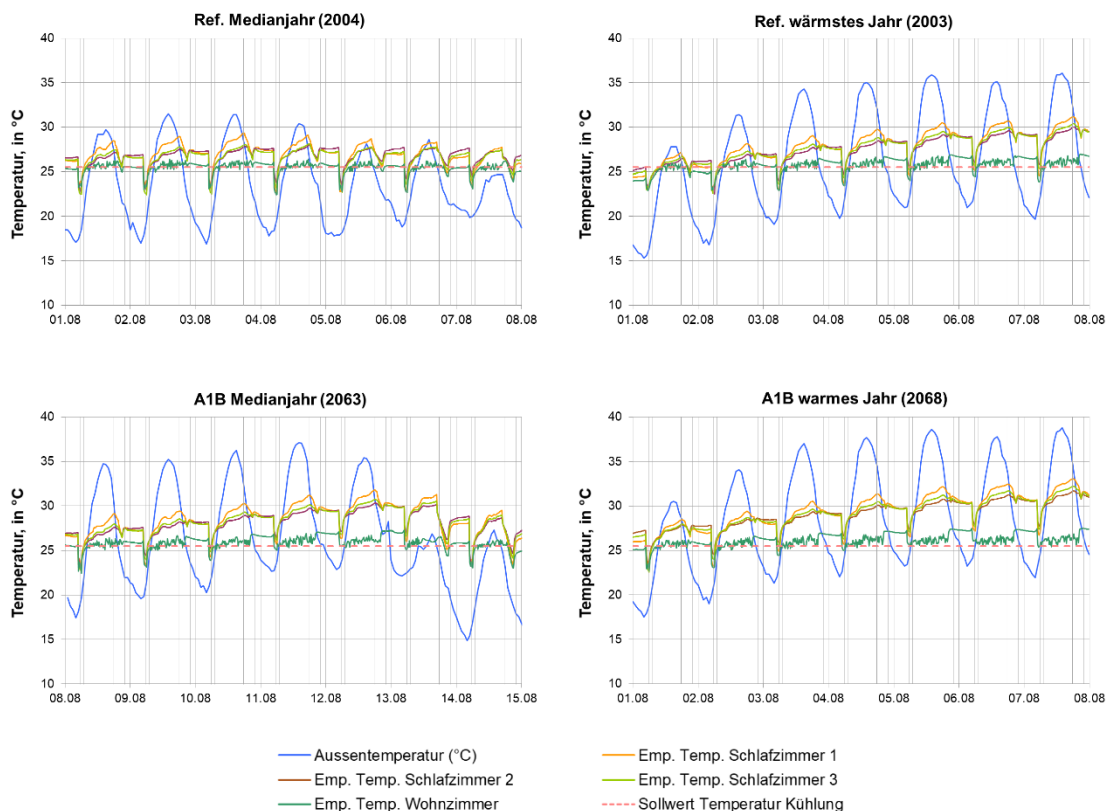


Abbildung 68: Aussentemperatur und empfundene Temperatur in den unterschiedlichen Räumen, während einer besonders warmen Woche vom 1. August bis 8. August, mit Ausnahme des Medianjahrs der Periode A1B (2063), in dem die besonders warme Woche in der Woche vom 8. bis 15. August stattfand. Die vertikalen, hellgrauen Linien entsprechen den Zeiträumen mit natürlicher Lüftung.

8.3.4.2 Klimakältebedarf und -verbrauch

Eine Kühlung nur im Wohnbereich ermöglicht eine Reduzierung des Klimakältebedarfs und -verbrauchs im Vergleich zum Szenario 1. Diese Reduzierung ist jedoch moderat, da die Schlafzimmer (nur nachts gekühlt) einen sehr geringen Energieverbrauch im Szenario 1 haben. Im Gegenzug erhöht sich der Klimakältebedarf im Wohnbereich leicht.

Der Klimakälteverbrauch beträgt 0.5 kWh/(m²a) im Medianjahr der Referenzperiode, 1.4 kWh/(m²a) im wärmsten Jahr der Referenzperiode und 2.3 kWh/(m²a) im warmen Jahr der Periode A1B. Im Vergleich zum Szenario 1 ist die gekühlte Fläche in diesem Szenario deutlich kleiner. Der Klimakälteverbrauch wird jedoch nicht proportional reduziert, da der Klimakälteverbrauch der Schlafzimmer - die nur nachts gekühlt werden - sehr gering ist und ein Teil der in den Schlafzimmern verbrauchten Energie durch einen etwas höheren Verbrauch im Wohnbereich kompensiert wird. Auf jeden Fall ist zu berücksichtigen, dass es in den Schlafzimmern für viele Stunden während des ganzen Tags zu sehr hohen Temperaturen kommt.

Der spezifische Klimakälteleistungsbedarf bleibt konstant im Vergleich zum Szenario 1. Im wärmsten Jahr der Referenzperiode bzw. im warmen Jahr der Periode A1B liegt die elektrische Leistung bei 12.4 kW/m² und 14.8 kW/m².

Zone	Ref. Medianjahr (2004)				Ref. wärmstes Jahr (2003)				A1B Medianjahr (2063)				A1B warmes Jahr (2068)			
	Bed. (kWh/a)	Leist. Bed. (kW)	Verb. (kWh/a)	elek. Leist. (kW)	Bed. (kWh/a)	Leist. Bed. (kW)	Verb. (kWh/a)	elek. Leist. (kW)	Bed. (kWh/a)	Leist. Bed. (kW)	Verb. (kWh/a)	elek. Leist. (kW)	Bed. (kWh/a)	Leist. Bed. (kW)	Verb. (kWh/a)	elek. Leist. (kW)
Schlafz. 1	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Schlafz. 2	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Schlafz. 3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Wohnbereich	298	2.6	65	0.8	699	3.5	176	1.6	532	3.5	126	1.5	1066	3.5	296	1.9
TOTAL	298	2.6	65	0.8	699	3.5	176	1.6	532	3.5	126	1.5	1066	3.5	296	1.9
pro m ²	2.3	20.5	0.5	6.0	5.4	27.3	1.4	12.4	4.1	27.3	1.0	11.9	8.3	27.3	2.3	14.8

Tabelle 50: Klimakältebedarf, Klimakälteleistungsbedarf, Stromverbrauch und elektrische Leistung für Klimakälte der verschiedenen simulierten Jahre.

8.3.4.3 Potenzial einer Photovoltaikanlage ohne und mit Batteriespeicher

Tabelle 51 zeigt die Stromerzeugung, den Stromverbrauch für Kühlung und den Anteil des Eigenverbrauchs durch eine Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 1.2-1.3 kW_p in der Referenzperiode (1.6 kW_p in der Periode A1B), sowie durch eine gleiche Anlage gekoppelt mit einem Batteriespeicher mit einer Kapazität von 1.5 kWh (nutzbare Kapazität von 1.275 kWh in der Referenzperiode, 1.5 kWh in der Periode A1B).

Die Photovoltaikanlage kann zwischen 73 % und 85 % des Stromverbrauchs für die Kühlung direkt decken. Wie auch im Szenario 1 liegt das daran, dass sowohl der Stromverbrauch als auch die benötigte Leistung gering ist. In diesem Fall ist der Stromverbrauch aus der Batterie noch geringer, daher ist eine solche Installation unnötig.

Strombilanz (kWh)	Ref. Medianjahr (2004)		Ref. wärmstes Jahr (2003)		A1B Medianjahr (2063)		A1B warmes Jahr (2068)	
	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie
	1.3 kW _p	1.3 kW _p + 1.5 kWh	1.2 kW _p	1.2 kW _p + 1.5 kWh	1.6 kW _p	1.6 kW _p + 1.5 kWh	1.6 kW _p	1.6 kW _p + 1.5 kWh
Total produzierte Strom (PV)	1334	1334	1478	1478	1981	1981	1931	1931
Total Stromverbrauch	65	65	176	176	126	126	296	296
Total Stromverbrauch aus der PV	53	53	124	124	107	107	216	216
Total Stromverbr. aus der Batterie		10		29		14		43
Total Stromverbr. aus dem Netz	13	4	52	23	19	5	80	36
Total produzierte Strom eingespeist in das Netz	1281	1271	1354	1320	1873	1857	1715	1666
Anteil abgedeckte Stromverbr. durch PV (und Batterie)	81 %	96 %	70 %	87 %	85 %	96 %	73 %	88 %

Tabelle 51: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der Wohnung und Anteil des gedeckten Stromverbrauchs für die Kühlung durch die Photovoltaikanlage mit und ohne Batteriespeicher in den verschiedenen simulierten Jahren.

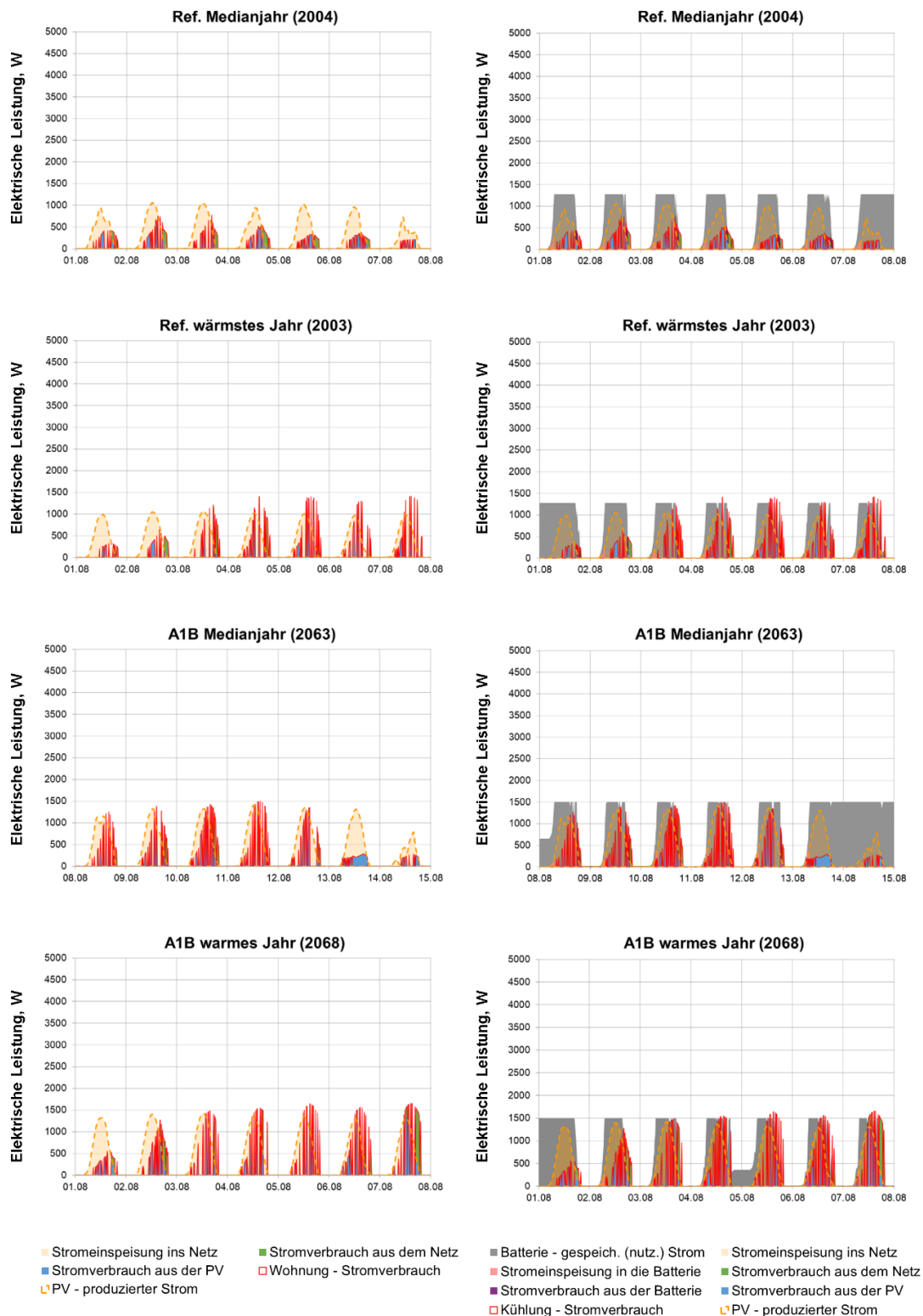


Abbildung 69: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der Kühlung aus der Photovoltaikanlage (linke Kolonne) und aus der Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher (rechte Kolonne). Für die beiden Referenzjahre sowie für das warme Jahr 2086 wurde der besonders warme Zeitraum vom 1. August bis 8. August dargestellt. Für das Medianjahr der Periode A1B (2063) ist der Zeitraum auf die besonders warme Woche vom 8. August bis 15. August verschoben.

Unter Berücksichtigung des gesamten Stromverbrauchs in der Wohnung wird eine grosse Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 3.6-3.8 kW_p in der Referenzperiode und ein Batteriespeicher mit einer Kapazität von 4.5 kWh angenommen.

Die Photovoltaikanlage deckt direkt zwischen 34 % und 41 % des Stromverbrauchs der Wohnung. Die Kombination der Photovoltaikanlage mit einer Batterie ermöglicht es rund 50 % des Stromverbrauchs zu decken. Diese Ergebnisse sind auch sehr ähnlich wie die Ergebnisse im Szenario 1.

Strombilanz (kWh)	Ref. Medianjahr (2004)		Ref. wärmstes Jahr (2003)		A1B Medianjahr (2063)		A1B warmes Jahr (2068)	
	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie
	3.8 kW _p	3.8 kW _p + 4.5 kWh	3.6 kW _p	3.6 kW _p + 4.5 kWh	4.9 kW _p	4.9 kW _p + 4.5 kWh	4.8 kW _p	4.8 kW _p + 4.5 kWh
Total produzierte Strom (PV)	4002	4002	4433	4433	5942	5942	5793	5793
Total Stromverbrauch	2436	2436	2534	2534	2489	2489	2657	2657
Total Stromverbrauch aus der PV	826	826	919	919	1004	1004	1088	1088
Total Stromverbr. aus der Batterie		277		283		352		355
Total Stromverbr. aus dem Netz	1610	1333	1615	1327	1485	1133	1569	1208
Total produzierte Strom eingespeist in das Netz	3176	2849	3514	3181	4937	4545	4705	4309
Anteil abgedeckte Stromverbr. durch PV (und Batterie)	34 %	45 %	36 %	47 %	40 %	54 %	41 %	54 %

Tabelle 52: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der Wohnung und Anteil des gedeckten Stromverbrauchs für die Kühlung durch die Photovoltaikanlage mit und ohne Batteriespeicher in den verschiedenen simulierten Jahren.

In Abbildung 70 ist die Grafik für das wärmste Jahr der Referenzperiode nochmals grösser dargestellt. In den Grafiken links in der Abbildung 71 ist zu erkennen, dass die elektrische Produktion der Photovoltaikanlage (gelb gestrichelte Linie) immer höher ist als der Stromverbrauch für die Kühlung des Wohnbereichs (rote Linie); mit Kompaktgeräten war dies nicht der Fall. Der Unterschied zwischen dem Verbrauchsanteil, welcher durch den Strom aus der Photovoltaikanlage (blauer Bereich) gedeckt wird und demjenigen, der aus dem Netz (grüner Bereich) bezogen wird, ist erkennbar. Dieser Stromverbrauch umfasst den Verbrauch für Kühlung sowie für Geräte und Beleuchtung, weshalb der Verbrauch über den ganzen Tag verteilt ist. Der Stromverbrauch hat zwei Tagesspitzen, von denen eine mit dem höchsten Klimakälteverbrauch mittags und eine weitere Spitze um 18:00-20:00 Uhr mit dem Betrieb der Geräte und der Beleuchtung zusammenfällt. Diese zweite Spitze wird mit dem Strom von der Photovoltaikanlage nicht mehr direkt gedeckt und muss demnach aus dem Netz bezogen oder durch eine Batterie gedeckt werden. Der in der Batterie gespeicherte Strom reicht jedoch nicht aus, um den gesamten Stromverbrauch an einem Tag einer warmen Woche mit einem hohen Kühlverbrauch zu gewährleisten.

Ref. wärmstes Jahr (2003)

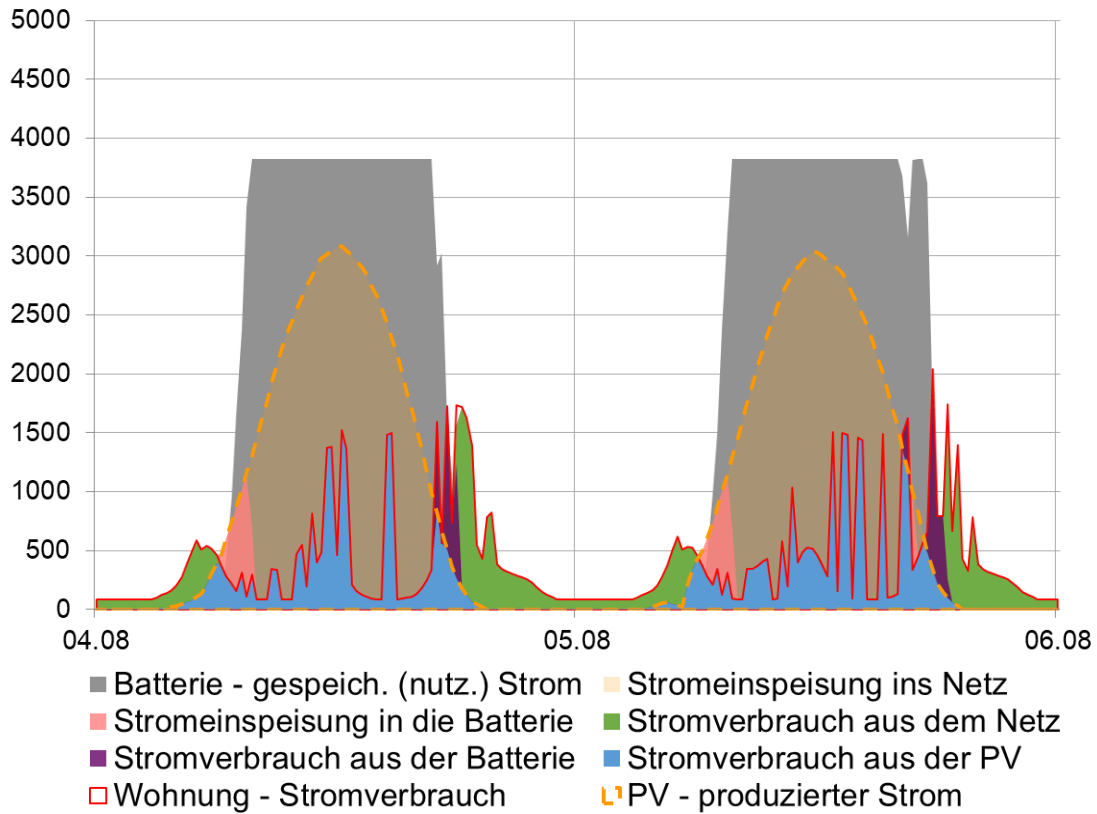


Abbildung 70: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der gesamten Wohnung aus der Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher vom 4. bis 6. August für das wärmste Jahr der Referenzperiode (2003).

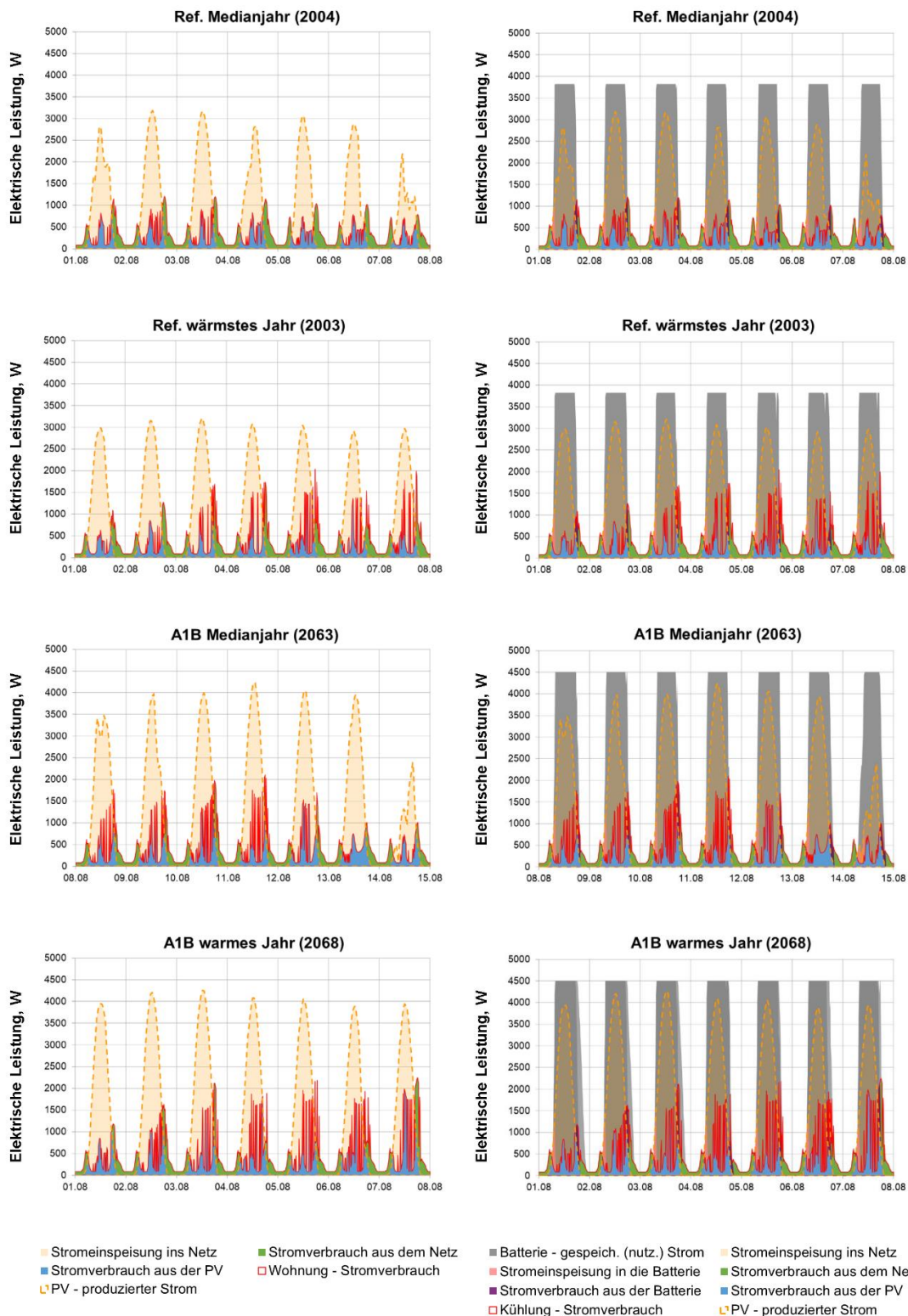


Abbildung 71: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der gesamten Wohnung aus der Photovoltaikanlage (linke Kolonne) und aus der Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher (rechte Kolonne) vom 1. bis 8. August respektive 8. bis 15. August für das Medianjahr der Periode A1B (2063).

8.3.5 Szenario 3: Split-System: Schlafzimmer

In Szenario 3 wurde ein Multi-Split-System (mit einem SEER-Wert von 7.5 analog zum Szenario 1) mit einem Innengerät pro Schlafzimmer mit einer Solltemperatur von 25.5 °C simuliert. Die Schlafzimmer werden nur bei Belegung von 21:00 bis 06:00 Uhr gekühlt. Der Wohnbereich wird nicht gekühlt.

8.3.5.1 Thermische Behaglichkeit

Die Tabelle 53 gibt einen Überblick der maximal empfundenen Temperaturen, der jährlichen Anzahl Überhitzungsstunden sowie des Predicted Percentage of Dissatisfied PPD für die vier untersuchten Jahre in den Zonen der Referenzwohnung.

Die empfundene Temperatur in den Schlafzimmern bleibt im Medianjahr der Referenzperiode immer innerhalb der Komfortgrenzen nach Norm SIA 180 (SIA, 2014a). Im Gegensatz dazu treten im Wohnbereich mehr als 400 Überhitzungsstunden auf, da dieser Raum tagsüber zwischen 06:00 und 21:00 Uhr belegt ist. Dabei ist laut SIA Merkblatt 2024 (SIA, 2015) für die Nutzung von Mehrfamilienhäusern keine Belegung zwischen 08:00 bis 12:00 Uhr und von 14:00 bis 17:00 Uhr vorgesehen, wenn die Innenraumtemperaturen zu hoch sind. In den warmen Jahren der beiden Perioden werden sogar 1'000 Überhitzungsstunden im Wohnbereich überschritten.

In den Schlafzimmern gibt es in der wärmsten Referenzperiode und im Medianjahr der Periode A1B bis zu 12 Überhitzungsstunden und im warmen Jahr der Periode A1B bleiben diese unter 50 h. Der PPD-Wert bleibt in allen Jahren in allen Schlafzimmern unter 8 %, während dafür der PPD-Wert vom Wohnbereich auf bis zu 25 % ansteigt.

Zone	Ref. Medianjahr (2004)				Ref. wärmstes Jahr (2003)				A1B Medianjahr (2063)				A1B warmes Jahr (2068)			
	Tmax (°C)	Tmax N (°C)	Ü-St.	PPD	Tmax (°C)	Tmax N (°C)	Ü-St.	PPD	Tmax (°C)	Tmax N (°C)	Ü-St.	PPD	Tmax (°C)	Tmax N (°C)	Ü-St.	PPD
Schlafz. 1	29.1	26.4	0	6.0	30.5	28.6	12	7.1	30.5	29.0	6	6.6	31.4	28.4	47	7.8
Schlafz. 2	27.4	26.3	0	6.3	28.9	28.2	6	7.3	28.8	26.9	12	7.0	29.6	28.2	24	8.0
Schlafz. 3	27.6	26.2	0	6.0	29.1	28.1	5	7.0	29.1	26.8	3	6.7	29.9	28.2	21	7.7
Wohnbereich	30.3	30.3	428	8.5	33.1	33.1	1080	16.5	32.8	32.8	803	13.1	34.9	34.9	1268	25.8
Eingang	29.1				31.3				30.4				32.6			
Badezimmer	29.8				32.6				31.5				34.4			

Tabelle 53: Maximal empfundene Temperaturen (Tmax), maximal empfundene Temperaturen während der Nutzungszeit (Tmax N), Anzahl Überhitzungsstunden (Ü-St.) sowie Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) in den verschiedenen Räumen der Wohnung während der Sommerperiode.

Wie in Abbildung 72 dargestellt, bleibt die empfundene Temperatur im Schlafzimmer 1 meistens innerhalb der Komfortgrenzen nach Norm SIA 180 (SIA, 2014a). Im Gegenteil dazu, schwankt die Temperatur im Wohnbereich viel stärker und führt zu einer signifikanten Anzahl an Überhitzungsstunden, welche oberhalb der Grenzkurve für Räume mit einer aktiven Kühlung nach Norm SIA 180 (SIA, 2014a) liegt.

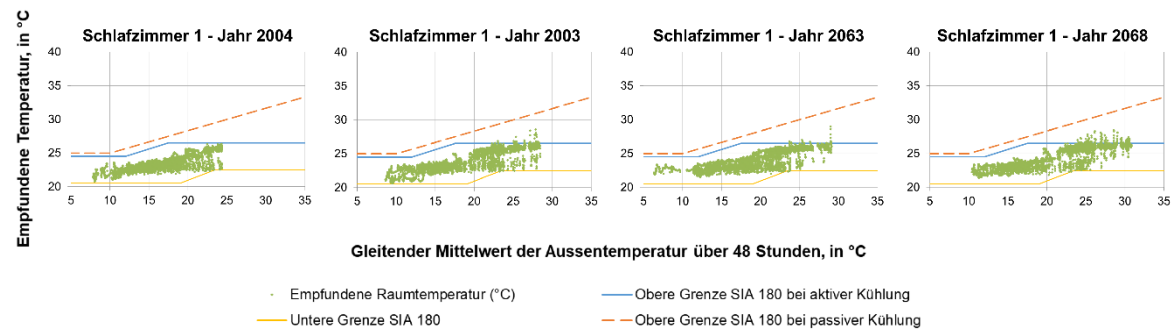


Abbildung 72: Empfundene Temperatur (15-minütiger Wert) im Schlafzimmer 1 (gekühlter Raum) im Zeitraum vom 15. April bis zum 16. Oktober für die vier betrachteten Jahre. Die Grenzwertlinien stellen den zulässigen Temperaturbereich in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwerts der Aussentemperatur gemäss Norm SIA 180 (SIA, 2014a) dar.

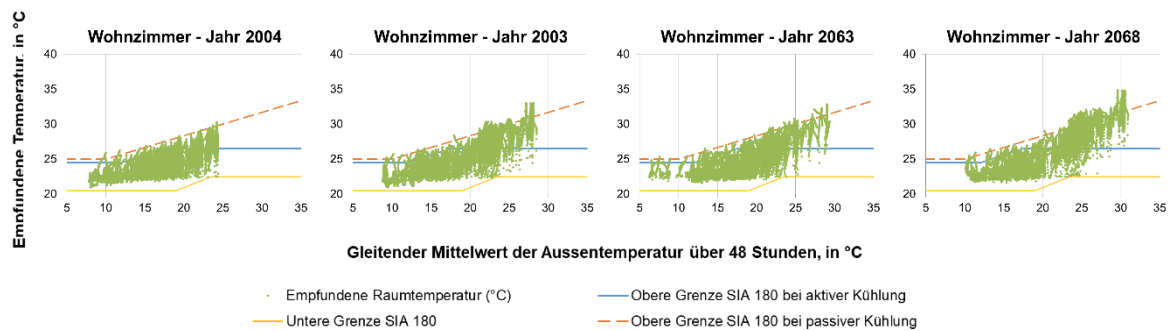


Abbildung 73: Empfundene Temperatur (15-minütiger Wert) im Wohnbereich (nicht gekühlt) im Zeitraum vom 15. April bis zum 16. Oktober für die vier betrachteten Jahre. Die Grenzwerlinien stellen den zulässigen Temperaturbereich in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwerts der Aussentemperatur gemäss Norm SIA 180 (SIA, 2014a) dar.

Die Temperaturverläufe in den verschiedenen Räumen in Abbildung 74 steigen tagsüber stark an. In den Schlafzimmern kann die Temperatur dank der Nachtkühlung und der mechanischen Kühlung auf 25.5-26 °C gesenkt werden. Im Wohnbereich kann die Temperatur abends zwar leicht gesenkt werden, die eingeschränkte Fensterlüftung von 18:00 bis 22:00 Uhr verhindert aber eine ausreichende Kühlung. Daher bleibt die Temperatur hoch und steigt weiter an, wenn es mehrere aufeinanderfolgende Tage mit sehr hohen Aussentemperaturen gibt, wie es in den warmen Jahren beider Perioden zu sehen ist.

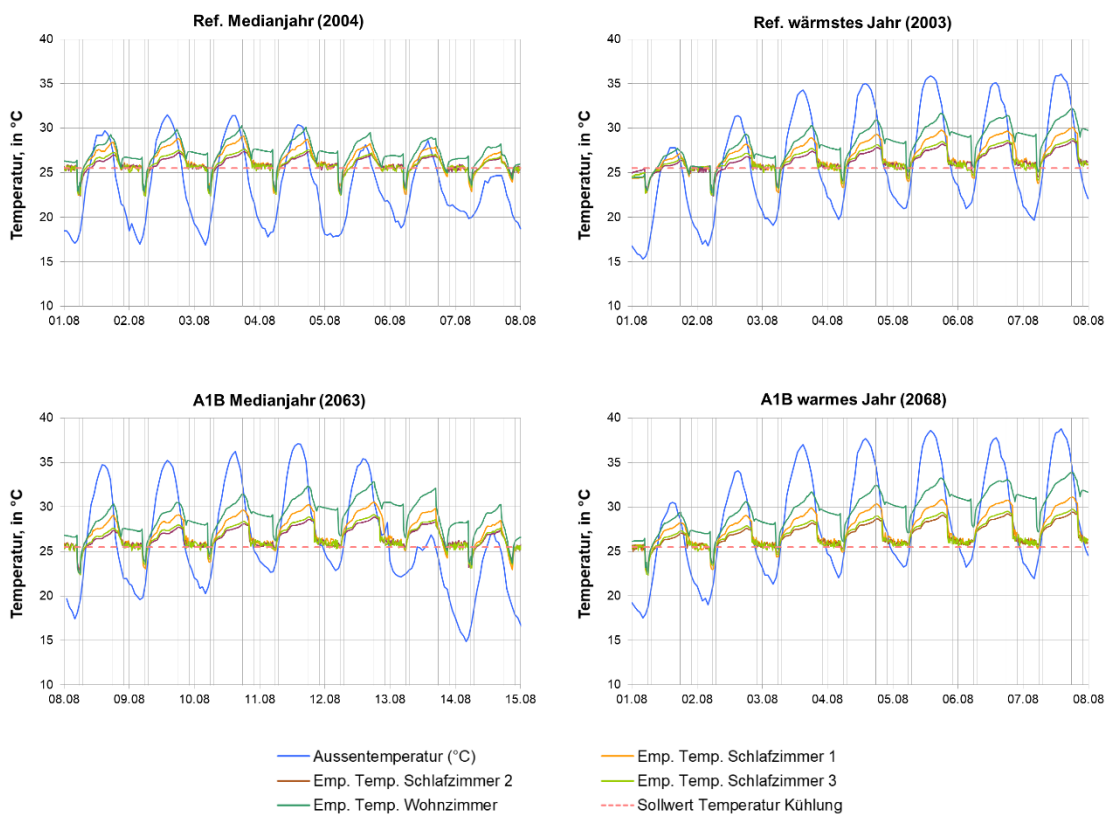


Abbildung 74: Aussentemperatur und empfundene Temperatur in den unterschiedlichen Räumen, während einer besonders warmen Woche vom 1. August bis 8. August, mit Ausnahme des Medianjahrs der Periode A1B (2063), in dem die besonders warme Woche in der Woche vom 8. bis 15. August stattfand. Die vertikalen, hellgrauen Linien entsprechen den Zeiträumen mit natürlicher Lüftung.

8.3.5.2 Klimakältebedarf und –verbrauch

Werden nur die Schlafzimmer gekühlt, führt das zu einer zusätzlichen Senkung des Klimakältebedarfs im Vergleich zum Szenario 1 von mehr als 70 % im Medianjahr beider Perioden und von ca. 60 % in den warmen Jahren. Dies liegt daran, dass die Schlafzimmer nur während der Nacht gekühlt werden, wenn die Temperaturen ohnehin niedriger sind.

Der Kühlungsverbrauch beträgt 0.1 kWh/(m²a) im Medianjahr der Referenzperiode, 0.4 kWh/(m²a) im wärmsten Jahr der Referenzperiode und 0.9 kWh/(m²a) im warmen Jahr der Periode A1B. Dies liegt nicht nur daran, dass die zu kühlende Fläche deutlich reduziert wurde, sondern auch daran, dass nur nachts gekühlt wird, wenn die Temperaturen aufgrund der berücksichtigten Fensterlüftung von 18:00 bis 22:00 Uhr niedriger sind. Der Wohnbereich und die Schlafzimmer erreichen tagsüber jedoch für viele Stunden sehr hohen Temperaturen.

Der spezifische Klimakälteleistungsbedarf bleibt mit 2.3 kW/m² und 5.0 kW/m² im Medianjahr bzw. wärmsten Jahr der Referenzperiode tief und steigt im warmen Jahr der Periode A1B auf bis zu 9.3 kW/m² an.

Zone	Ref. Medianjahr (2004)				Ref. wärmstes Jahr (2003)				A1B Medianjahr (2063)				A1B warmes Jahr (2068)			
	Bed. (kWh/a)	Leist. Bed. (kW)	Verb. (kWh/a)	elek. Leist. (kW)	Bed. (kWh/a)	Leist. Bed. (kW)	Verb. (kWh/a)	elek. Leist. (kW)	Bed. (kWh/a)	Leist. Bed. (kW)	Verb. (kWh/a)	elek. Leist. (kW)	Bed. (kWh/a)	Leist. Bed. (kW)	Verb. (kWh/a)	elek. Leist. (kW)
Schlafz. 1	18	0.6	3	0.1	105	0.9	18	0.2	60	1.2	11	0.3	214	1.4	40	0.4
Schlafz. 2	29	0.6	4	0.1	134	0.9	23	0.2	83	1.1	14	0.3	230	1.4	43	0.4
Schlafz. 3	12	0.6	2	0.1	83	0.9	14	0.2	45	1.0	8	0.3	152	1.4	28	0.4
Wohnbereich	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
TOTAL	58	1.6	9	0.3	323	2.5	55	0.6	188	2.6	33	0.7	595	4.1	111	1.2
pro m²	0.5	12.7	0.1	2.3	2.5	19.5	0.4	5.0	1.5	20.0	0.3	5.3	4.6	31.6	0.9	9.3

Tabelle 54: Klimakältebedarf, Klimakälteleistungsbedarf, Stromverbrauch und elektrische Leistung für Klimakälte der verschiedenen simulierten Jahre.

8.3.5.3 Potenzial einer Photovoltaikanlage ohne und mit Batteriespeicher

Tabelle 55 zeigt die Stromerzeugung, den Stromverbrauch für Kühlung und den Anteil des Eigenverbrauchs durch eine Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 1.2-1.3 kW_p in der Referenzperiode (1.6 kW_p in der Periode A1B) sowie durch eine gleiche Anlage gekoppelt mit einem Batteriespeicher mit einer Kapazität von 1.5 kWh (nutzbare Kapazität von 1.275 kWh in der Referenzperiode, 1.5 kWh in der Periode A1B).

Der geringe Verbrauch in diesem Szenario sowie die Tatsache, dass die Kühlung nachts erfolgt, macht eine Photovoltaikanlage sowohl ohne und mit Batteriespeicher bedeutungslos. Wie in Abbildung 75 dargestellt, fällt der Stromverbrauch für die Kühlung in der Nacht an, wenn keine Stromerzeugung stattfindet. Daher beträgt der Eigenverbrauch aus der Photovoltaikanlage bestenfalls 3 %. Mit der Installation von einem Batteriespeicher erhöht sich dieser Prozentsatz, der von der Batterie verbrauchten Stroms zwar, dieser bleibt jedoch sehr gering.

Strombilanz (kWh)	Ref. Medianjahr (2004)		Ref. wärmstes Jahr (2003)		A1B Medianjahr (2063)		A1B warmes Jahr (2068)	
	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie
	1.3 kW _p	1.3 kW _p + 1.5 kWh	1.2 kW _p	1.2 kW _p + 1.5 kWh	1.6 kW _p	1.6 kW _p + 1.5 kWh	1.6 kW _p	1.6 kW _p + 1.5 kWh
Total produzierte Strom (PV)	1334	1334	1478	1478	1981	1981	1931	1931
Total Stromverbrauch	9	9	55	55	33	33	111	111
Total Stromverbrauch aus der PV	0	0	1	1	0	0	1	1
Total Stromverbr. aus der Batterie		6		18		13		28
Total Stromverbr. aus dem Netz	9	4	54	36	33	20	110	81
Total produzierte Strom eingespeist in das Netz	1334	1327	1476	1455	1980	1965	1930	1898
Anteil abgedeckte Stromverbr. durch PV (und Batterie)	3 %	70 %	2 %	35 %	1 %	40 %	1 %	27 %

Tabelle 55: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der Wohnung und Anteil des gedeckten Stromverbrauchs für die Kühlung durch die Photovoltaikanlage mit und ohne Batteriespeicher in den verschiedenen simulierten Jahren.

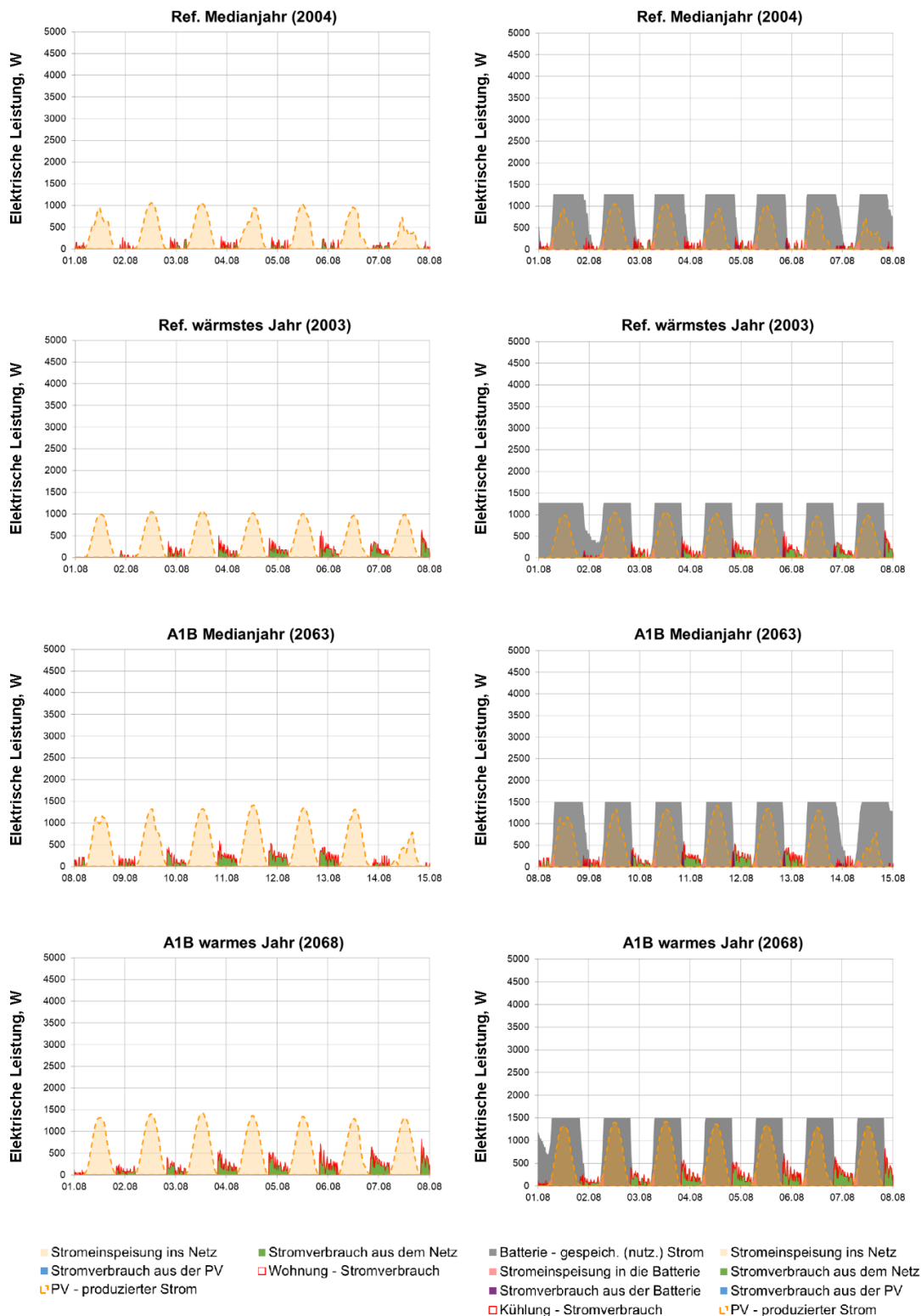


Abbildung 75: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der Kühlung aus der Photovoltaikanlage (linke Kolonne) und aus der Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher (rechte Kolonne). Für die beiden Referenzjahre sowie für das warme Jahr 2086 wurde der besonders warme Zeitraum vom 1. August bis 8. August dargestellt. Für das Medianjahr der Periode A1B (2063) ist der Zeitraum auf die besonders warme Woche vom 8. August bis 15. August verschoben.

Unter Berücksichtigung des gesamten Stromverbrauchs in der Wohnung wird eine grosse Anlage mit einer Leistung von 3.6-3.8 kW_p in der Referenzperiode und ein Batteriespeicher mit einer Kapazität von 4.5 kWh angenommen.

Die Photovoltaikanlage kann zwischen 33 % und 38 % des Stromverbrauchs der Wohnung direkt decken. Die Kombination einer Photovoltaikanlage mit einer Batterie ermöglicht es rund 50 % des Stromverbrauchs zu decken. Diese Ergebnisse sind sehr ähnlich wie die Ergebnisse der Szenarien 1 und 2, da der grösste Verbrauch für Geräte und Beleuchtung anfällt und dieser Verbrauch bei allen Szenarien sehr ähnlich ist.

Strombilanz (kWh)	Ref. Medianjahr (2004)		Ref. wärmstes Jahr (2003)		A1B Medianjahr (2063)		A1B warmes Jahr (2068)	
	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie	nur PV	mit Batterie
	3.8 kW _p	3.8 kW _p + 4.5 kWh	3.6 kW _p	3.6 kW _p + 4.5 kWh	4.9 kW _p	4.9 kW _p + 4.5 kWh	4.8 kW _p	4.8 kW _p + 4.5 kWh
Total produzierte Strom (PV)	4002	4002	4433	4433	5942	5942	5793	5793
Total Stromverbrauch	2380	2380	2416	2416	2397	2397	2473	2473
Total Stromverbrauch aus der PV	777	777	795	795	901	901	867	867
Total Stromverbr. aus der Batterie		277		282		351		353
Total Stromverbr. aus dem Netz	1604	1327	1621	1334	1495	1144	1606	1248
Total produzierte Strom eingespeist in das Netz	3225	2899	3638	3306	5040	4648	4927	4533
Anteil abgedeckte Stromverbr. durch PV (und Batterie)	33 %	44 %	33 %	45 %	38 %	52 %	35 %	49 %

Tabelle 56: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der Wohnung und Anteil des gedeckten Stromverbrauchs für die Kühlung durch die Photovoltaikanlage mit und ohne Batteriespeicher in den verschiedenen simulierten Jahren.

In Abbildung 76 ist die Grafik für das wärmste Jahr der Referenzperiode nochmals grösser dargestellt. In den Grafiken links in der Abbildung 77 ist zu erkennen, dass die elektrische Produktion der Photovoltaikanlage (gelb gestrichelte Linie) immer viel höher ist als der Stromverbrauch zur Kühlung der Schlafzimmer Wohnbereichs (rote Linie). Der Unterschied zwischen dem Verbrauchsanteil, welcher durch den Strom aus der Photovoltaikanlage (blauer Bereich) gedeckt wird und demjenigen, der aus dem Netz (grüner Bereich) bezogen wird, ist erkennbar. Dieser Stromverbrauch umfasst den Verbrauch für Kühlung sowie für Geräte und Beleuchtung, weshalb der Verbrauch über den ganzen Tag verteilt ist. Tagsüber gibt es in diesem Szenario dabei nur den Verbrauch für Geräte und Beleuchtung. Aufgrund des geringen Verbrauchs des Multi-Split-Systems in den Schlafzimmern, der nur von 21.00 bis 6.00 Uhr a anfällt und gleichzeitig die Aussentemperaturen niedriger sind, gibt es keine Verbrauchsspitzen. Der in der Batterie gespeicherte Strom reicht jedoch nicht aus, um den gesamten Stromverbrauch an einem Tag einer warmen Woche mit einem hohen Kühlverbrauch zu gewährleisten. Eine Batterie mit einer grösseren Kapazität wäre von Vorteil.

Ref. wärmstes Jahr (2003)

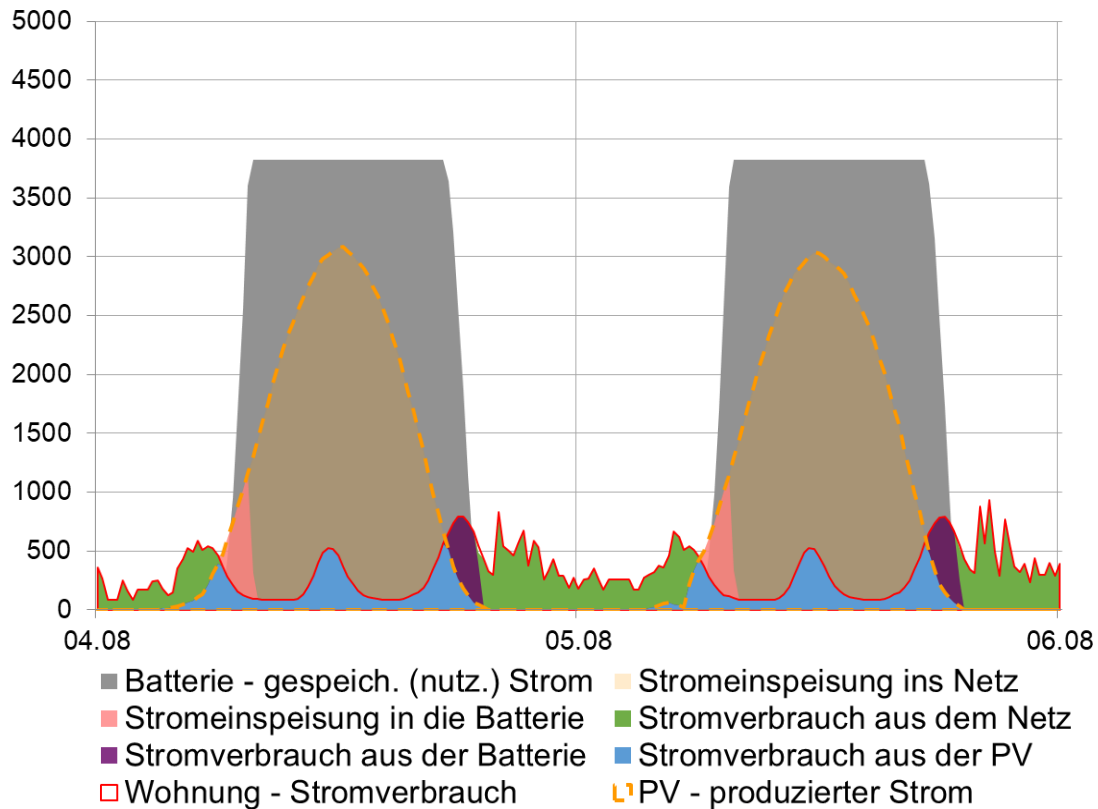


Abbildung 76: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der gesamten Wohnung aus der Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher vom 4. bis 6. August für das wärmste Jahr der Referenzperiode (2003).

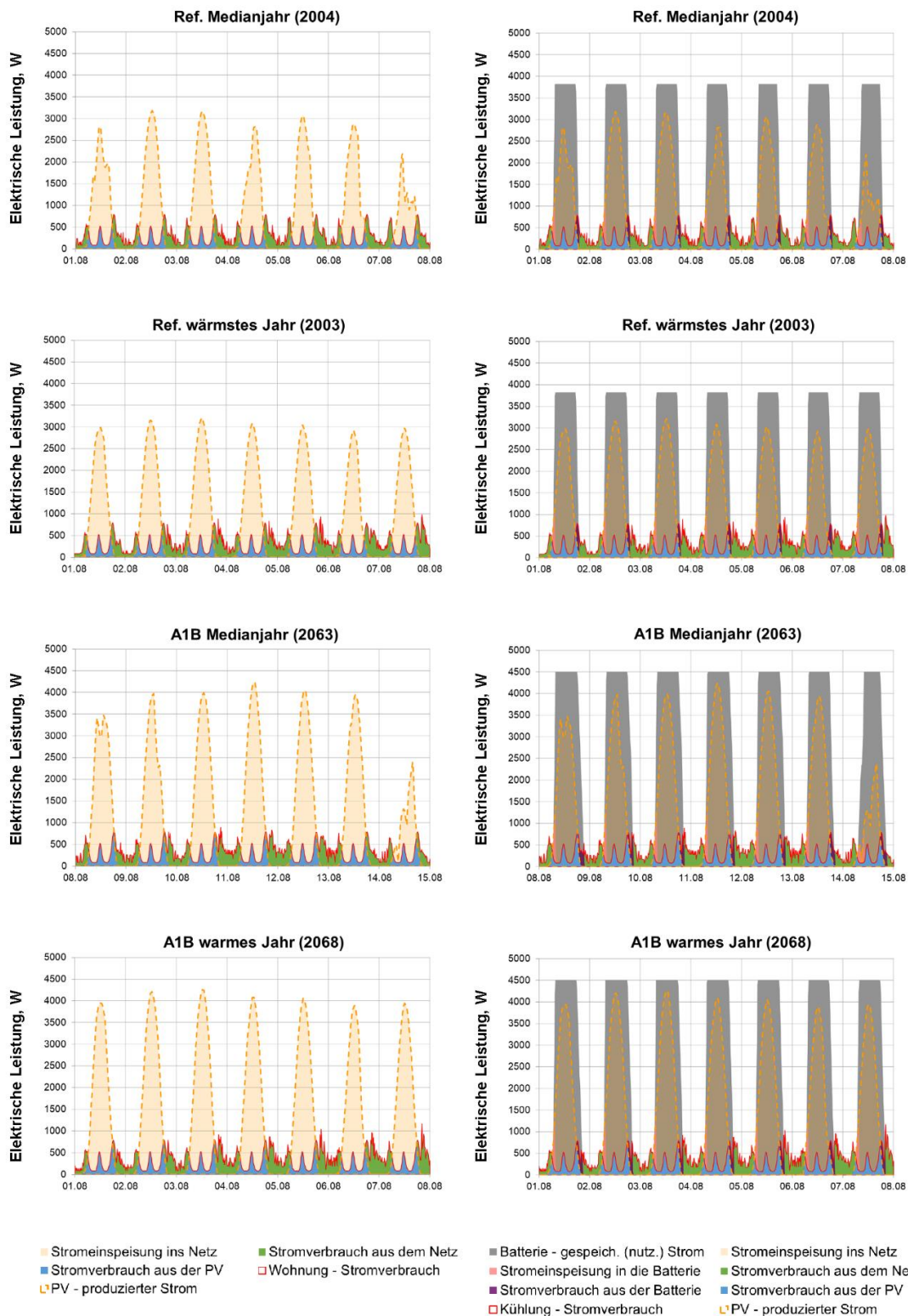


Abbildung 77: Erzeugter Strom aus der Photovoltaikanlage, Stromverbrauch der gesamten Wohnung aus der Photovoltaikanlage (linke Kolonne) und aus der Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher (rechte Kolonne) vom 1. bis 8. August respektive vom 8. bis 15. August für das Medianjahr der Periode A1B (2063).