

Schlussbericht, 30. November 2020

Bericht «SolSimCC»

Einfluss von Klimawandel und
Nutzerverhalten auf das
Kosten/Nutzenverhältnis solarer
Energieerzeugung am Gebäude



energie schweiz

Unser Engagement: unsere Zukunft.

Autoren

Jeremias Schmidli, SPF

Igor Bosshard, SPF

Mattia Battaglia, SPF

Dr. Michel Haller, SPF

Dr. Daniel Carbonell, SPF

**Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.
Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.**

Adresse

EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE
Pulverstrasse 13, CH-3063 Ittigen. Postadresse: Bundesamt für Energie BFE, CH-3003 Bern
Infoline 0848 444 444, www.infoline.energieschweiz.ch
energieschweiz@bfe.admin.ch, www.energieschweiz.ch, twitter.com/energieschweiz

Zusammenfassung

Im Projekt SolSimCC wurde der Einfluss von Klimawandel und Nutzerverhalten auf das Kosten/Nutzenverhältnis solarer Energieerzeugung am Gebäude untersucht. Dabei wurde zuerst in einer Literaturstudie die Auswirkungen des Klimawandels und des Nutzerverhaltens auf den Energiebedarf von Gebäuden untersucht. Anschliessend wurden Simulationen mit unterschiedlichen Klimaszenarien für verschiedene Heizsysteme durchgeführt. Unterschieden wurde dabei zwischen einem idealen Nutzerverhalten – welches der Auslegung nach Norm entspricht – und einem realistischen Nutzerverhalten – welches auf Messungen beruht. Es wurden zwei Systeme mit Solarthermie und zwei Systeme mit Photovoltaik untersucht. Solarthermie wurde einerseits nur für die Warmwasserbereitstellung simuliert, andererseits für die Warmwasserbereitstellung in Kombination mit Heizungsunterstützung. Als Backup und Vergleich System wurde ein Gasbrenner mit Biogas verwendet. Photovoltaik wurde in Kombination mit einer Luftwärmepumpe verwendet. Einerseits wurde ein Warmwasser- / Raumheizungs-System untersucht, andererseits ein System mit zusätzlicher Raumkühlung. Zum Kostenvergleich wurde ein Wärmepumpen-System ohne Photovoltaik genommen. Die Simulationen ergaben für das Jahr 2050 eine Reduktion des Heizwärmebedarfs zwischen 10% und 24% beim idealen Nutzerverhalten, beziehungsweise 10% und 17% beim realistischen Nutzerverhalten. Der Strombedarf für die Kühlung stieg um 45% bis 81% (ideales Nutzerverhalten) beziehungsweise 41% bis 75% (realistisches Nutzerverhalten). Um die Auswirkungen auf die Kosten zu untersuchen wurde der Unterschied der Energiegestehungskosten ermittelt. Mit den getroffenen Annahmen sind alle vier untersuchten Solarsysteme wirtschaftlich. Dabei führte das realistische Nutzerverhalten im Vergleich zum idealen Nutzerverhalten zu höheren Kosteneinsparungen beim Solarthermie-System – bei den PV-Systemen führte es jedoch zu kleineren Kosteneinsparungen.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Inhaltsverzeichnis	4
Abkürzungsverzeichnis	5
1 Einleitung	6
1.1 Ausgangslage und Projektziele	6
1.2 Literaturstudie	7
1.2.1 Einfluss des Klimawandels	7
1.2.2 Einfluss des Nutzerverhaltens	13
2 Vorgehen und Methode	16
2.1 Wetterdaten	16
2.2 Simulations-Methodik	16
2.2.1 TRNSYS Modell	17
2.2.2 Nutzerverhalten	18
2.2.3 Kennzahlen	19
2.3 Kostenanalyse	19
2.3.1 Berechnungsmethodik	19
2.3.2 Stromtarife	20
2.3.3 Gaspreis	20
2.3.4 Komponentenpreise	21
3 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	22
3.1 Simulationsresultate	22
3.1.1 System 1 - Solarthermie in Kombination mit Gasbrenner für Warmwasser.....	22
3.1.2 System 2 - Solarthermie in Kombination mit Gasbrenner für Raumheizung und Warmwasser	22
3.1.3 System 3 - Photovoltaik in Kombination mit Luftwärmepumpe für Raumheizung und Warmwasser.....	23
3.1.4 System 4 - Photovoltaik in Kombination mit Luftwärmepumpe für Raumheizung, Warmwasser und Raumkühlung	24
3.1.5 Kostenvergleich	25
3.2 Konferenzen, Synergien und Networking.....	26
4 Fazit und Ausblick	26
5 Referenzen	29

Abkürzungsverzeichnis

BFE	Bundesamt für Energie
SPF	Institut für Solartechnik
OST	Ostschweizer Fachhochschule
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
RCP	Remote Concentration Pathway
RF	Radiative Forcing
GMT	Globale Mitteltemperatur
HDD	Heating Degree Days (Akkumulierte Temperaturdifferenzen Heizen)
CDD	Cooling Degree Days (Akkumulierte Temperaturdifferenzen Kühlen)
BER	Bern
MFH	Mehrfamilienhaus
EBF	Energiebezugsfläche
MuKE	Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich
WW	Warmwasser
RH	Raumheizung
RK	Raumkühlung
ST	Solarthermie
PV	Photovoltaik
LWP	Luftwärmepumpe
GB	Gasbrenner
Δ LCOE	<i>Unterschied der Energiegestehungskosten (Levelized Cost of Energy)</i>

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Projektziele

Durch den Klimawandel und die Berücksichtigung von realem Nutzerverhalten verändert sich die Produktionscharakteristik solarer Energieerzeugung im Gebäude. Um diese Auswirkungen genauer zu untersuchen, wurden folgende Ziele formuliert:

- Zusammentragen der Resultate aus Studien zur Auswirkung des Klimawandels (Prognosen bis 2050) und des realen (nicht idealen) Nutzerverhaltens auf den Wärme- und Kältebedarf von Gebäuden zu verschiedenen Jahreszeiten
- Simulation solarer Energieerzeugung (jeweils Photovoltaik oder Solarwärme) und Ermittlung der Auswirkung von Klimawandel und Nutzerverhalten auf die Erträge und den ökonomischen Nutzen (Ersatz von Netzstrom, Ersatz von Heizöl oder Erdgas) dieser Anlagen. Ergänzung mit Resultaten die aus anderen Projekten am SPF bereits zur Verfügung stehen oder erarbeitet werden.

1.2 Literaturstudie

1.2.1 Einfluss des Klimawandels

Übersicht zum Klimawandel

In den letzten Jahren wurde die Klimaveränderung in der Schweiz deutlich, kein Jahrzehnt war so warm wie das aktuelle. Die Jahresdurchschnittstemperatur ist seit 1864 um rund 2.1 K angestiegen. Seit rund 30 Jahren war kein Jahr in der Schweiz mehr kühler als der Durchschnittswert der Jahre 1961 bis 1990. Eindrücklich kann dies mit der nachfolgenden Grafik von MeteoSchweiz aufgezeigt werden. Im Vergleich zur globalen Temperaturentwicklung mit 1 K (2019) ist der Anstieg in der Schweiz rund doppelt so hoch seit Messbeginn im Jahr 1864 [1].

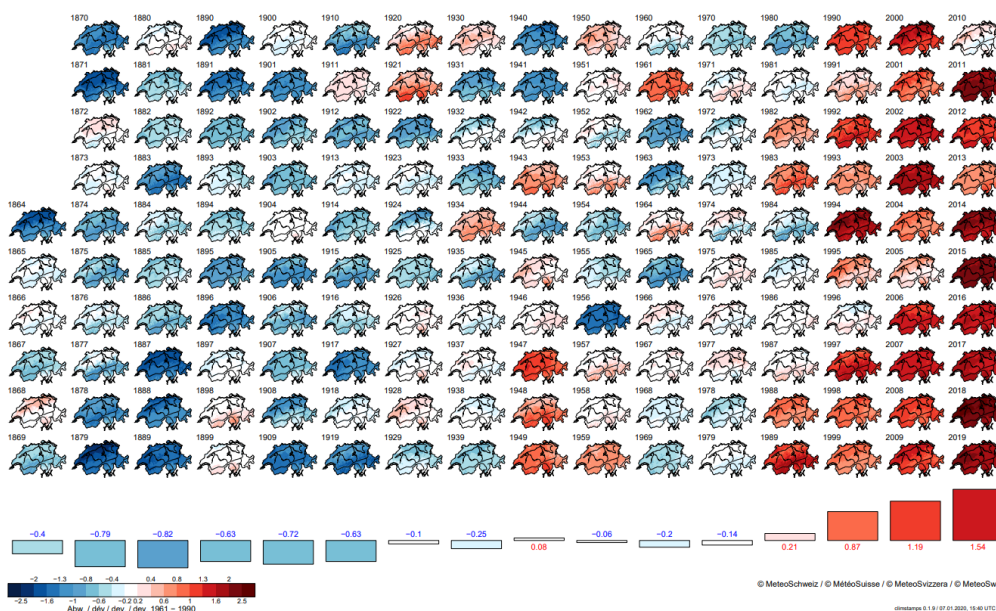


Abbildung 1: Temperaturabweichungen vom Mittel 1961-1990 in der Schweiz für jedes Jahr seit 1864. Jahre unter dem Mittel sind in blau, Jahre über dem Mittel rot dargestellt. Im unteren Teil der Grafik sind die Abweichungen der Jahrzehnte als eingefärbte Säulen dargestellt [1].

Nicht nur die Temperatur wird vom Klimawandel beeinflusst, sondern auch die Niederschlagsmenge und -stärke. Den Einfluss des Niederschlages auf den Gebäudeenergiebedarf erachten wir jedoch als nicht wesentlich. Anders sieht es für die Energieproduktion am Gebäude aus. Ob im Winter viel Schnee fällt oder ob die solaren Energiegewinne durch häufige und lange Regenschauer reduziert sind, kann für die Produktion von Energie aus Solaranlagen wesentlich sein. Für Gebäude welche zu 100 Prozent solar beheizt werden sind Sonnenscheindauer, Schneedecke und Wärmebedarf in den kältesten Monaten entscheidende Faktoren für die Auslegung, insbesondere für die Grösse saisonaler Wärmespeicher. Ähnlich verhält es sich mit Heizungssystemen die einen Eisspeicher als Hauptquelle verwenden der über Solarwärme regeneriert wird.

Um den Einfluss des Klimawandels auf den Gebäudepark abzuschätzen, werden Klimaszenarien meist auf Grund der IPCC¹ Szenarien [2] modelliert. Welches Szenario jedoch das wahrscheinlichste ist, ist sehr schwer abzuschätzen. Einerseits sind die Fortschritte zum Klimaschutz in der EU weiterhin ungenügend [3], andererseits sinken die CO₂-Emissionen in China zum Beispiel aufgrund des Strukturwandels [4]. In Abbildung 2 sind die bekanntesten und am häufigsten genutzten "Representative Concentration Pathways" (RCP) für die Modellierung von Zukunftsszenarien dargestellt. Der Klimawandel der Erde wird mit dem "Radiative Forcing" (RF) Faktor beschrieben. Dieser ist ein Mass für die Veränderung der Energiebilanz der Erde. Er wird nicht nur durch die CO₂-Emissionen beeinflusst, sondern beispielsweise auch durch die Sonnenaktivität. Jedoch sind die Treibhausgase (Methan, CO₂, N₂O) die grössten Treiber für die aktuelle – und für die Zukunft prognostizierte - Zunahme des RF-Wertes [2]. In nachfolgender Abbildung sind die aktuellsten Szenarien bezüglich der Veränderung des RF-Wertes dargestellt. Dabei stellt die Zahl am Schluss der Szenariobezeichnung die Veränderung des RF-Wertes bis zum Jahr 2100 dar (z.B.: RCP8.5 = +8.5 W/m² bis 2100).

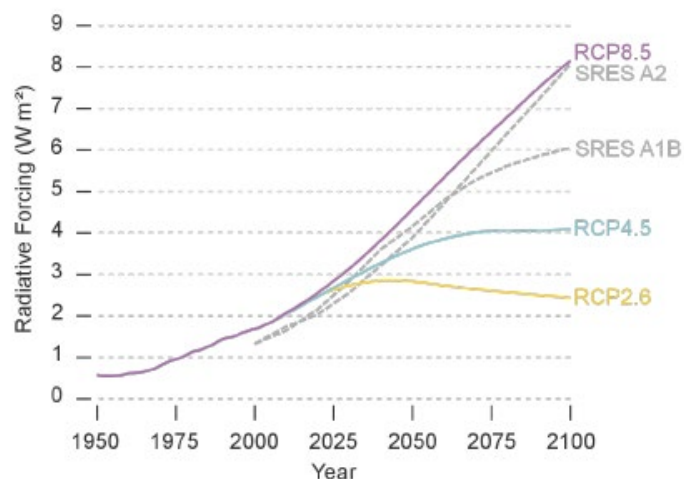


Abbildung 2: Entwicklung des Strahlungsantriebs (radiative forcing) für unterschiedliche Szenarien [5]. Die RCP-Szenarien basieren auf den neusten Modellen. Zusätzlich sind die Szenarien die auf älteren Modellen basieren zu Vergleichszwecken mit aufgeführt (SRES A1B & A2).

Das RCP2.6 Szenario entspricht in etwa den Zielen des Pariser Klimaabkommens von 2015, in welchem die Erderwärmung auf unter +2 K gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter (1850 – 1900) gehalten werden soll. Im RCP4.5 Szenario geht man davon aus, dass die Treibhausgasemissionen ab 2050 zurückgehen, die Klimaziele von Paris aber nicht eingehalten werden (>2 K). Im Fall von RCP8.5 wird davon ausgegangen, dass die CO₂-Emissionen weiter steigen wie bisher. In Tabelle 1 sind die drei beschriebenen Szenarien mit den Konsequenzen für die Erderwärmung, die CO₂-Konzentration und den Strahlungsantrieb (RF) zusammengefasst.

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change

Tabelle 1: Zusammenfassung der wichtigsten Szenarien. GMT = Globale Mitteltemperatur, RF = Radiative Forcing

Szenario	Entwicklungspfad	Globale Veränderung bis 2100 im Vergleich zu 1850 bis 1900
RCP8.5	Weiter wie bisher	Kontinuierlicher Anstieg von RF (8.5 W/m ²), CO ₂ Konzentration von 940 ppm [6], GMT +3-5 K
RCP4.5	Steigende Treibhausgasemissionen bis 2050, danach sinkend. Nicht Klimaabkommen konform!	Stabilisierung von RF bei 4.5 W/m ² , CO ₂ Konzentration von 540 ppm [6], GMT ~+2.5 K
RCP2.6	Klimaabkommen konform, starke Absenkung der Treibhausgasemissionen zu einem frühen Zeitpunkt.	Reduktion von RF auf 2.6 W/m ² , CO ₂ Konzentration von 420 ppm [6], GMT < +2 K
Jahr 2000	Als Vergleich der Zustand im Jahr 2000	RF ~ 1.7 W/m ² , CO ₂ -Konzentration = 370 ppm, GMT +0.4 K (Schweiz ~ +2 K)

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweiz werden im CH2018 Bericht [5] eindrücklich aufgezeigt. Dieser bezieht sich mehrheitlich auf das RCP8.5 Szenario. Tabelle 2 fasst die darin prognostizierte Veränderung für den Gebäudepark und die solare Energieproduktion zusammen. Die Veränderungen aufgrund des Klimawandels wurden vom Projektteam zusätzlich qualitativ bewertet (grün positiv, rot negativ).

Den grössten Einfluss auf den Gebäudepark hat die steigende Aussentemperatur. Speziell im Winter wird diese den Wärmebedarf über alle Gebäudekategorien reduzieren. Vermehrte Hitzetage und Tropennächte die mit einer erhöhten Aussentemperatur im Sommer einhergehen werden den Kühlbedarf erhöhen. Stark betroffen werden Gebäude mit einem hohen Glasanteil sein, wie dies häufig bei modernen Verwaltungsgebäuden vorzufinden ist. Höhere Temperaturen führen auch dazu, dass PV-Module eine Effizienzeinbusse von ungefähr 0.4%/K aufweisen und sich entsprechend der solare Ertrag verringert.

Die Solarstrahlung ist ein wesentlicher Parameter für die Energieproduktion mittels Solarwärme oder Photovoltaik, aber auch bezüglich des Heiz- und Kühlbedarfs von Gebäuden welche relevante passiv-solare Gewinne erzielen. Bei der Modellierung der Globalstrahlung für die verschiedenen Klimaszenarien zeigen sich jedoch grosse Unsicherheiten. Die Klimaberechnungen (EURO-CORDEX) auf denen die CH2018 Berechnungen beruhen, haben die Schwäche, dass Aerosole nur ungenügend abgebildet sind, weshalb die Bestimmung der Sonnenscheindauer mit grosser Unsicherheit behaftet ist [5]. Die Auswertung der vergangenen Messdaten lässt aktuell keinen Schluss zu ob der Klimawandel einen signifikanten Einfluss auf die Sonnenscheindauer hat [5]. In den Berechnungsmodellen geht man derzeit davon aus, dass die Globalstrahlung im alpinen Raum leicht zunehmen wird. Eine leichte Verringerung der Strahlung wird dafür in der ganzen Schweiz für den Frühling und Herbst erwartet. Dies aufgrund erhöhter Niederschläge.

Die Sonnenscheindauer ist jedoch auch stark von der Luftverschmutzung beeinflusst, wie dies in der Abbildung 3 deutlich zu sehen ist. Für drei verschiedene Schweizer Standorte ist über

mehrere Jahrzehnte die Sonnenscheindauer dargestellt. Dabei fällt auf, dass für Lugano und das Schweizer Mittelland (Swiss Plateau) die mittlere Sonnenscheindauer ab 1960 stark abnimmt und ab 1980 wieder zunimmt. Im gleichen Zeitraum ist für die Messungen auf dem Säntis kein eindeutiger Trend feststellbar.

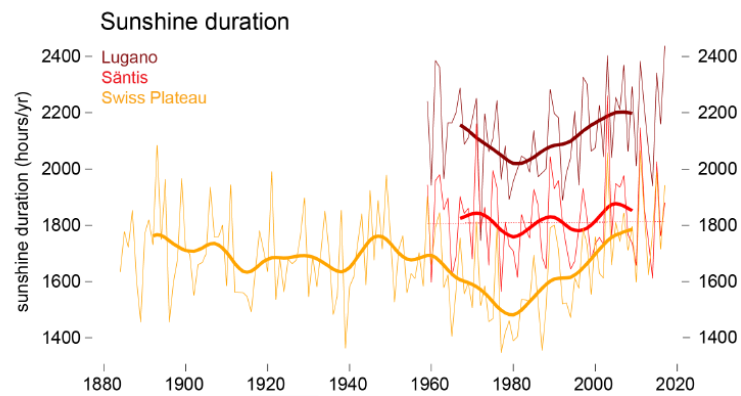


Abbildung 3: Entwicklung der Sonnenscheindauer für drei Schweizer Standorte [5].

Tabelle 2: Veränderungen aufgrund des Klimawandels und deren Einfluss auf die Energieerzeugung und Energiebedarf von Gebäuden. Datenbasis Klimaszenarien CH2018 [5]. Die Angaben in Klammern in der zweiten Spalte entsprechen den bekannten Werten aus den Jahren 2018 und 2019.

Art der Veränderung	Veränderung in Zahlen um das Jahr 2060 (2018/2019)	Einfluss auf solare Energieproduktion (Solar = PV & Solarthermie)	Einfluss auf den Energiebedarf von Gebäuden
Anstieg der Nullgradgrenze (Winter)	um 400 – 650 m	Erhöhter <u>Solarertrag</u> (geringere Bedeckung durch Schnee, geringere Verluste) Reduktion PV-Ertrag (leicht höhere Modultemperatur)	Reduktion des Heizwärmebedarfs
Anstieg der Wintertemperatur	+1.8 bis 3.3 °C		
Abnahme Kälteextreme und -wellen	+2.2 bis +6.8 °C		
Reduktion von Schneefall und Schneebedeckung	Schneefall: -50%, Bedeckung: -80% unter 800 hm		vernachlässigbar
Anstieg der Sommertemperatur	+2.3 bis 4.4 °C	Erhöhter Solarthermie-Ertrag Reduktion PV-Ertrag	Anstieg des Kühlbedarfs, im Speziellen Spitzenlast
Zunahme der Hitzetage	+3 bis 17 Tage (1 Tag pro Sommer)	Erhöhter PV-Eigenverbrauch durch PV-Kühlung	
Mehr Tropennächten	+15 Nächte (wenige)	Evt. Nachfragezunahme von PV+WP + Kältespeicher für Kühlung	Erhöhter Kühlbedarf (im Speziellen Wohngebäuden) Passive Kühlung häufig nicht mehr ausreichend
Anstieg der Höchsttemperaturen (Hitzewellen und extrem Temperaturen)	+4 bis +8.5 °C	Reduktion PV-Ertrag (höhere Modultemperatur) Erhöhter Solarthermie-Ertrag (geringere Verluste)	Erhöhter Kühlbedarf, im Speziellen Spitzenlast
Globalstrahlung im Winter und Frühling geringer	Keine detaillierte Informationen	Reduktion <u>Solarertrag</u>	
Globalstrahlung im Sommer höher (vor allem im <u>alpinen</u> Raum)	Keine detaillierte Informationen	Erhöhter <u>Solarertrag</u> , Mehr Sommerüberschuss	vernachlässigbar

Einfluss auf Energieverbrauch und -produktion

Nachfolgend wird, basierend auf bestehender Literatur, der Einfluss des Klimawandels auf den Energiebedarf von Gebäuden und die Energieproduktion (vorwiegend Solar) zusammengefasst. Die älteste Studie die ermittelt werden konnte und einen Fokus auf dem Gebäudepark der Schweiz hat, datiert aus dem Jahr 2005 [7]. Im Rahmen dieser Literaturstudie wurden fünf Beiträge bezüglich des Klimaeinflusses auf den Energiebedarf von Gebäuden untersucht. Das vorgehen und die Methodik der untersuchten Studien können in folgende Kategorien unterteilt werden:

- Gebäudesimulation mit Variation von Gebäudeparametern und Klimadaten [7,8]
- Vereinfachte Berechnungen aufgrund von Effizienzkenwerten und Gebäudestatistiken [9]
- Vergleich der Heiz- und Kühlgradtage (engl. HDD/CDD) für unterschiedliche Klimaszenarien und anschliessende Abschätzung auf den Gebäudebereich [10,11]

In der nachfolgenden Tabelle sind die Resultate der fünf Studien zusammengefasst.

Tabelle 3: Übersicht der Resultate der untersuchten Schweizer Studien. Ohne spezifische Angaben gelten die Werte für die gesamte Schweiz und den gesamten Gebäudepark. Methodik: Sim = Simulation, Stat = Statistik (vereinfachte Berechnung), DD = Gradtage (HDD/CDD)

Studie	Publi- kation	Klimaszenario	Zeit- horizont	Einfluss auf Wärmebedarf	Einfluss auf Kältebedarf	Methodik
Th. Frank [7]	2005	+4.4 K GMT ~ RCP8.5	1990 - 2100	-33% bis -44% (Wohngeb.) -36% bis -58% (Bürogeb.)	+13.9 kWh/m ² (Bürogeb.)	Sim
G. Settembri ni et. al. [8]	2017	~ +3.5 K GMT zwischen RCP4.5 und 8.5	1995 - 2060	-33% (Wohngeb.)	+2.6 - 3.0 kWh/m ² (Wohngeb.)	Sim
C. U. Brunner et. al. [9]	2007	+3.5 K GMT (unklar)	2005 - 2035	Keine Angaben	+61% (el. Bedarf gesamte Schweiz)	Stat
M. Christens on et. al. [11]	2006	Zwischen RCP2.6 und 8.5	1975 - 2085	-13% bis -87% HDD	+700 Kd (CDD, für Zürich)	DD
M. Berger et. al. [10]	2019	RCP8.5	1981 - 2099	-40% HDD	+380 Kd CDD (Mittelwert CH)	DD

In der Literatur werden extrem hohe relative Anstiege der Kühlgradtage (engl. CDD) ausgewiesen, was darauf zurückzuführen ist, dass in der Vergleichsperiode kaum Tage mit Kühlbedarf vorkommen. Deshalb erscheint der relative Vergleich sinnlos. Aus diesem Grund

wurde in der Tabelle 3 drauf verzichtet diese Werte zum Kühlbedarf auszuweisen. Für eine Abschätzung kann davon ausgegangen werden, dass der Bedarf an Heiz- oder Kühlenergie eines Gebäudes in etwa proportional zu den Heiz- und Kühlgradtagen ist. Bei detaillierter Betrachtung, gerade für Einzelgebäude, wäre jedoch eine direkte Übertragung der Veränderung von HDD und CDD nicht zu empfehlen da es sich um eine starke Vereinfachung handelt und gerade bei gut gedämmten Gebäuden zu einer grossen Unsicherheit führt (siehe Resultate des Projektes KlimaGapLite [12]).

Sowohl Settembrini et. al. [8] als auch Th. Frank [7] betrachten zusätzlich zur Energie auch die Komfortsituation in den Gebäuden. Die Untersuchungen zeigen, dass gerade ältere Gebäude ohne Kühlung eine hohe Anzahl an Überhitzungsstunden aufweisen werden (2060: +833 h/a, ausgehend von 27 h im Jahr 1995 [8]). Dies könnte dazu führen, dass Bewohner eigenständig ineffiziente Klimageräte installieren, was den elektrischen Bedarf weiter erhöhen würde. Einen grossen Einfluss auf den Kühlenergiebedarf hat der Gebäudenutzer mit der Bedienung des Sonnenschutzes und der Fenster in der Nacht (passive Nachtauskühlung), was im nachfolgenden Kapitel genauer diskutiert wird.

Wie sich der Klimawandel auf die solare Energieproduktion auswirkt, wurde in der Literatur noch wenig diskutiert. Gerade für die Schweiz konnten keine Studien gefunden werden, welche die Produktion und den Bedarf mit unterschiedlichen Klimaszenarien in Verbindung setzen. Deshalb wird im vorliegenden Projekt für ausgewählte Objekte untersucht, welchen Einfluss der Klimawandel auf den Ertrag und die Wirtschaftlichkeit von Solaranlagen (sowohl Solarthermie als auch PV) hat. Mit dem deutlich zunehmenden Kältebedarf in Zukunft kann davon ausgegangen werden, dass der PV Eigenverbrauch durch PV-Kühlung deutlich zunehmen wird. Eine Abschätzung des stündlichen PV Potenzials für die gesamte Schweiz, wurde von Walch et. al [13] durchgeführt. Die Berechnungen basieren jedoch auf den heutigen Klimaverhältnissen. Aus unserer Sicht sollte diese hochaufgelöste Potenzialanalyse auch mit Zukunftsszenarien durchgeführt werden.

1.2.2 Einfluss des Nutzerverhaltens

Diverse Studien zum Thema "Energy Performance Gap"² [14] haben in den letzten 10 Jahren aufgezeigt, dass der Heizwärmebedarf von Gebäuden stark vom Benutzerverhalten abhängig ist. Untersuchungen von umfangreichen, realen Verbrauchsdaten von Wohngebäuden lassen darauf schliessen, dass der Wärmebedarf gerade in der Übergangszeit höher ausfällt, als dies Norm-Berechnungen erwarten lassen [14,15]. Dies wird in den nachfolgenden Grafiken deutlich, welche repräsentativ aus einer Studie mit 65 Mehrfamilienhäusern (MFH) ausgewählt wurden. Abbildung 4 zeigt den Vergleich des real gemessenen Heizwärmebedarfs und des Bedarfs nach Norm-Berechnung, jeweils in Abhängigkeit des Monatsmittels der Aussentemperatur.

² Der sogenannte "Energy Performance Gap" beschreibt die Abweichung des Energiebedarfs von Gebäuden zwischen Planung und Messung.

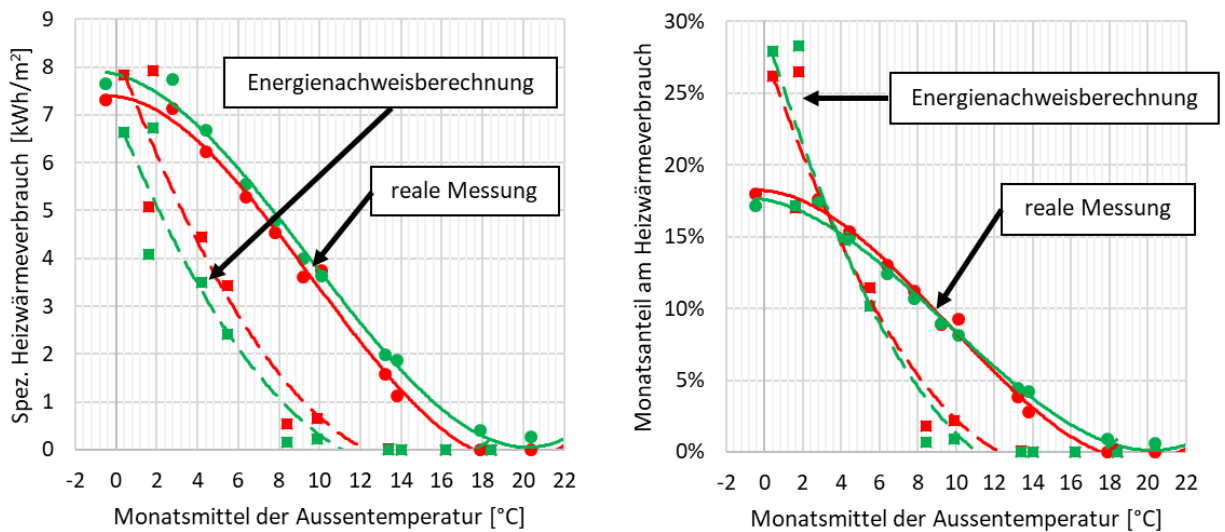


Abbildung 4: Vergleich von real gemessenen und nach Norm berechneten Energiedaten von zwei repräsentativen Gebäuden (rot und grün) Links: Spezifischer Heizwärmebedarf in Abhängigkeit der Aussentemperatur. Rechts: Monatlicher Anteil am Heizwärmeverbrauch in Abhängigkeit der Aussentemperatur.

Mittels dynamischen Jahressimulationen eines Referenzgebäudes in IDA ICE konnte mit der Variation des Benutzerverhaltens der Unterschied zwischen realen Messungen und den Standardberechnungen (Energienachweis) nachvollzogen werden [14]. In Abbildung 5 ist der Einfluss der Sonnenschutznutzung für zwei unterschiedliche Verhaltensweisen auf die Energiesignatur des Referenzgebäudes dargestellt. Bei einem schönen, jedoch kalten Tag würde man erwarten, dass durch die passiven, solaren Gewinne über die Fenster der Leistungsbedarf geringer ist als an Tagen die kalt sind und wenig Solarstrahlung aufweisen (Abbildung links). In Realität ist jedoch die Auswirkung der solaren Gewinne weit weniger ausgeprägt (Abbildung rechts), was auf vermehrtes Verschatten selbst an kalten Tagen zurückgeführt werden kann.

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf den Wärmebedarf ist die Raumtemperatur, welche im Schnitt bei 22 – 23 °C liegt [14]. Eine Erhöhung der Raumtemperatur um ein Grad, führt bei gut gedämmten Gebäuden zu einer Steigerung des Wärmebedarfs um etwa 10-13%.

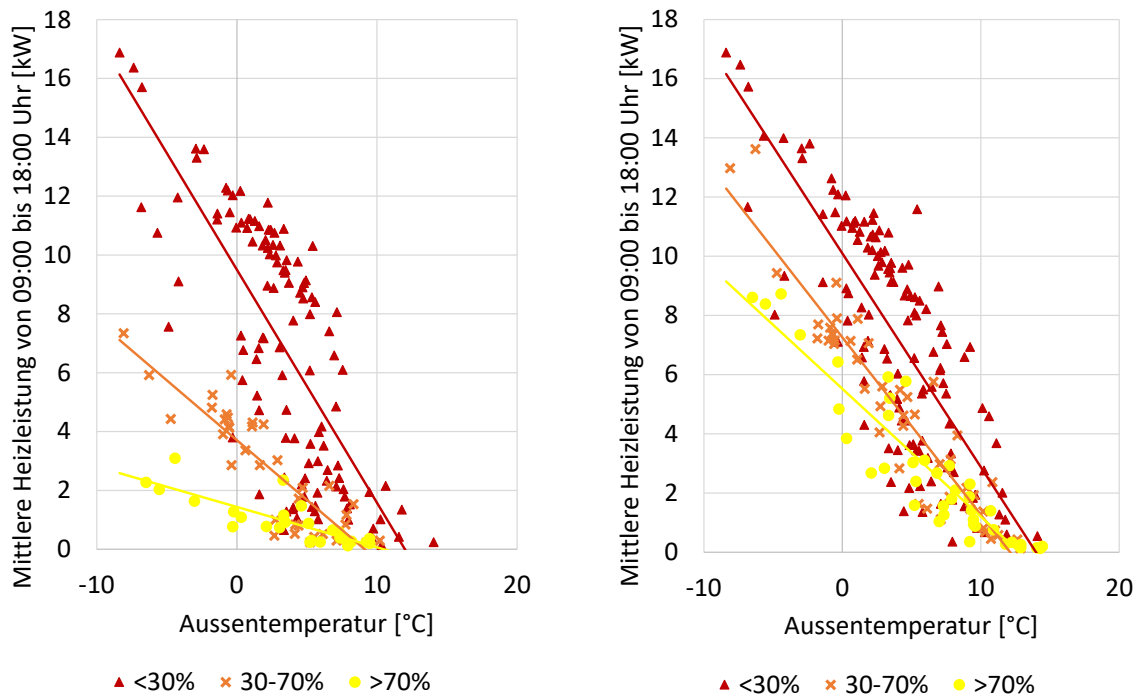


Abbildung 5: Mittlere Tagesheizleistung in Abhängigkeit der Tagesmitteltemperatur. Links mit „idealer Verschattung“ und rechts mit „wahrscheinlicher Verschattung“ mit zusätzlicher Unterscheidung von sonnigen (>70%), mittel sonnigen (30 – 70%) und eher bewölkten (<30%) Tagen (relativer Vergleich der Sonnenstunden zu den maximal möglichen Sonnenstunden).

In Abbildung 6 sind die Simulationsergebnisse für das Referenzgebäude mit "realistischem" und idealem Nutzerverhalten zusammengefasst. Das simulierte, "realistische" Nutzerverhalten führt zu ähnlichen Ergebnissen wie dies bei den realen Energiemessungen (65 MFH) festgestellt wurde.

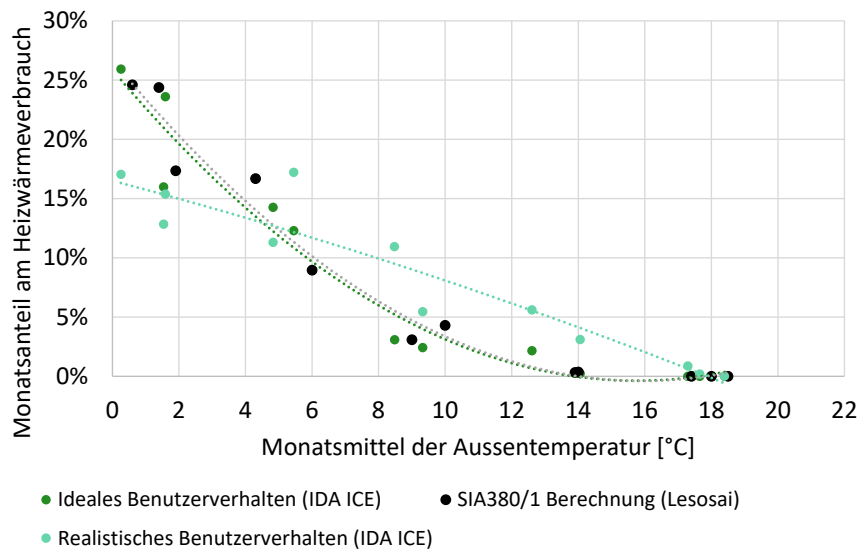


Abbildung 6: Energiekennlinie des Referenzgebäudes für ein realistisches Nutzerverhalten ($T_R=23\text{ °C}$, Kipfenster gelegentlich geöffnet, Sonnenschutz häufig aktiviert) und ein ideales Nutzerverhalten ($T_R=21\text{ °C}$, keine offenen Fenster, Sonnenschutz selten aktiviert).

2 Vorgehen und Methode

2.1 Wetterdaten

Für die Simulationen werden Wetterdaten für verschiedene Klimaszenarien verwendet. Als Grundlage werden dabei Daten welche über Meteonorm 8 [16] verfügbar sind gebraucht. Für die Untersuchungen wurde der Standort Bern (BER) verwendet. Neben dem Referenzdatensatz (Ref), welcher von Meteonorm aufgrund von gemessenen Monatswerten interpoliert wird (Messungsperiode Strahlung: 1996 – 2015, Temperatur: 2000 – 2019), werden die Zukunftsszenarien RCP2.6 (geringe Erwärmung), RCP4.5 (mittlere Erwärmung) und RCP8.5 (starke Erwärmung), welche auf Basis des IPCC Report 2014 von Meteonorm generiert wurden, verwendet. Für die Untersuchungen wurde das Jahr 2050 gewählt. Die entsprechenden Temperatur- und Strahlungsverläufe sind in Abbildung 7 dargestellt. Die Erwärmung ist auf der linken Seite gut ersichtlich. Auf der rechten Seite sind die Strahlungsverläufe dargestellt. Für alle Szenarien ist ein deutlicher Anstieg sowohl der Temperaturen als auch der Strahlung im Sommer zu beobachten. Die dazugehörigen jährlichen Werte sind in Tabelle 4 aufgeführt.

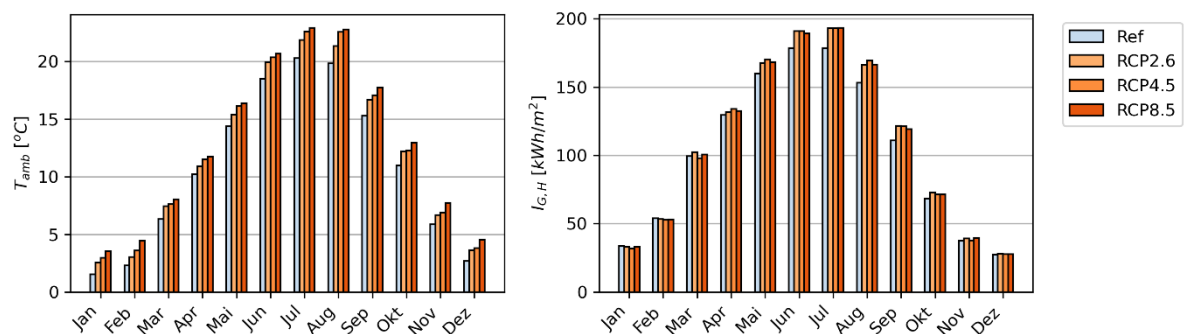


Abbildung 7: Temperatur- und Strahlungsverläufe der verschiedenen Wetterdatensätze.

Tabelle 4: Jährliche Durchschnittstemperatur und globale Horizontalstrahlung, beziehungsweise entsprechende Differenz zum Referenzdatensatz.

	T_{amb} [°C]	ΔT_{amb} [K]	$I_{G,H}$ [kWh/m ²]	$\Delta I_{G,H}$ [kWh/m ²]
Ref	10.7	-	1231	-
RCP2.6	11.9	1.2	1300	69
RCP4.5	12.3	1.6	1297	66
RCP8.5	12.8	2.1	1294	63

2.2 Simulations-Methodik

Dynamische Simulationen mit TRNSYS-17 [17] werden verwendet, um den Einfluss verschiedener Klimaszenarien auf Systeme, in welche solare Energieerzeugung eingebunden sind, zu evaluieren. Dabei werden die folgenden Systeme für ein Mehrfamilienhaus (MFH) simuliert:

1. Solarthermie (ST) in Kombination mit Gasbrenner (GB) für Warmwasser (WW).
2. Solarthermie in Kombination mit Gasbrenner für Raumheizung (RH) und Warmwasser.
3. Photovoltaik (PV) in Kombination mit Luftwärmepumpe (LWP) für Raumheizung und Warmwasser.
4. Photovoltaik in Kombination mit Luftwärmepumpe für Raumheizung, Warmwasser und Raumkühlung (RK).

Für alle vier Systeme wurde zusätzlich das äquivalente System ohne solare Energiequelle simuliert.

2.2.1 TRNSYS Modell

Alle Untersuchungen wurden für das gleiche MFH durchgeführt. Bei diesem handelt es sich um ein Minergie-Gebäude mit 6 Wohnungen. Das Gebäude wurde von Mojic u. a. [14] beschrieben und hat eine Energiebezugsfläche (EBF) von 1205 m². Für den Referenzdatensatz (BER) beträgt der Warmwasserverbrauch (Q_{WW}) 16.9 MWh/a, der Raumheizungsbedarf (Q_{RH}) 25.7 MWh/a für das ideale, beziehungsweise 40.7 MWh/a für das realistische Nutzerverhalten und der Kühlbedarf (Q_{RK}) 7.78 MWh/a (ideales Nutzerverhalten) beziehungsweise 7.92 MWh/a (realistisches Nutzerverhalten). Der Haushaltsstromverbrauch beträgt 16.2 MWh/a (nur für die PV-Systeme relevant).

Folgende Komponenten wurden je nach Simulation verwendet:

- Abgedeckte thermische Solarkollektoren
 - 24.1 m² für das WW-System (entspricht 2% der EBF nach MuKE³ 2014)
 - 84.4 m² für das System mit WW und RH (entspricht 7% der EBF nach MuKE³ 2014)
- Photovoltaik Module
 - 12.2 kWp installierte Leistung (entspricht 10 Wp/m²_{EBF} EBF nach MuKE³ 2014)
- Sensible Speicher für Warmwasser beziehungsweise Heizung / Kühlung
 - 1 m³ für den RH-/RK-Speicher
 - 2 m³ für den WW-Speicher
- Gasbrenner
 - Durchschnittliche Effizienz von 93% bezüglich des Brennwertes
- Luftwärmepumpe
 - Nennleistung 20 kW bei A0W35
 - Kann sowohl für Heizen als auch für Kühlen verwendet werden
- Bodenheizung
 - Kann auch zum Kühlen verwendet werden

Die Wärmepumpe in den PV-Systemen ist Bedarfsgesteuert, wodurch die PV-Produktion keinen Einfluss auf die Wärmepumpensteuerung hat. Überschüssiger Strom wird ins Netz eingespeist, es wurde keine Batterie simuliert. Raumkühlung wird von der Wärmepumpe via

³ Mustervorschrift der Kantone im Energiebereich

Fussbodenheizung bereitgestellt, wobei die Vorlauftemperatur auf 19°C geregelt ist, um Kondensationsschäden bei etwaig tieferen Temperaturen zu verhindern.

2.2.2 Nutzerverhalten

Wie im Kapitel 1.3.2 beschrieben, hat das Nutzerverhalten einen wesentlichen Einfluss auf den Heizwärmebedarf von Gebäuden und somit auch auf die Wärmeerzeugungsanlagen und ihre Wirtschaftlichkeit. Um diesen Effekt zu ermitteln wurden ein ideales Nutzerverhalten einem möglichst realistischen Verhalten gegenübergestellt. Das ideale Nutzerverhalten entspricht einer Standardberechnung nach SIA 380/1. Für das "reale" Nutzerverhalten wurde die Fenster- und Storennutzung sowie die Raumtemperatur dem aktuellen wissenschaftlichen Stand angepasst [18,19]. In Abbildung 8 ist der Einfluss der verschiedenen Nutzerprofile auf die monatliche Verteilung des Heizwärmebedarfs dargestellt.

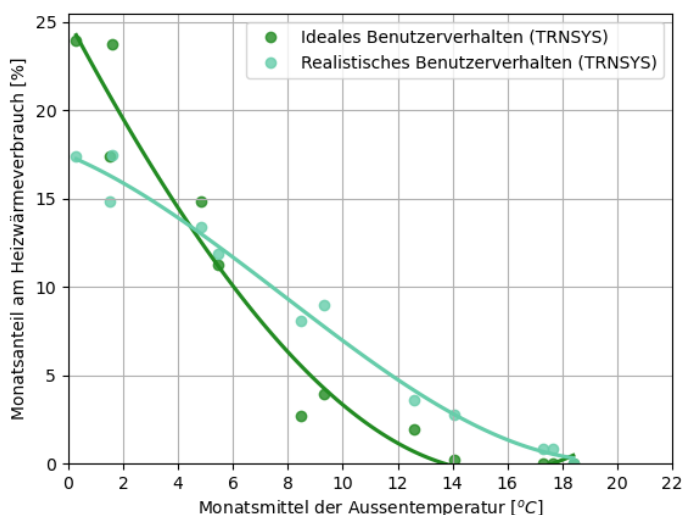


Abbildung 8: Monatsanteil des Heizwärmeverbrauchs in Abhängigkeit der Temperatur für realistisches und ideales Nutzerverhalten.

Tabelle 5: Vergleich der wichtigsten Parameter zwischen realen und idealem Nutzerverhalten im Heizfall.

	Ideales Nutzerverhalten	Reales Nutzerverhalten
Verschattung	Ab 200 W/m ² Einstrahlung auf Fassade & Raumtemperatur > 24 °C (SIA380/1)	Ab 200 W/m ² Einstrahlung auf Fassade & Raumtemperatur > 20.5 °C (SIA180)
Fensteröffnung	Konstante Infiltration von 0.7 m ³ /hm ² (SIA380/1)	Konstante Infiltration von 0.15 m ³ /hm ² & Fensteröffnung in Abhängigkeit der Aussentemperatur nach Schröder et. al. [18]
Raumtemperatur	21 °C (SIA2024)	23 °C (Medianwert von real gemessenen Wohnungen) [14]

Im Kühlfall werden die Fenster bei Erfüllung aller nachfolgender Kriterien geöffnet (Nachtauskühlung):

- Nacht (21.00 bis 08.00 Uhr)
- Tagesmittel der Aussentemperatur über 18 °C
- Raumtemperatur über 24 °C
- Aussenlufttemperatur 2 K kühler als Raumtemperatur

2.2.3 Kennzahlen

Für die beiden Systeme mit Solarthermie wird der Solare Deckungsgrad (F_{solar}) als Kennzahl verwendet. Dieser ist folgendermassen definiert:

$$F_{solar} = \frac{Q_{col}}{Q_{col} + Q_{GB}} \quad \text{Gl. 1}$$

Dabei ist Q_{col} die vom Kollektor aufgenommene Energie, Q_{GB} ist die vom Gasbrenner abgegebene Energie.

Zur Beurteilung der beiden PV-Systeme wird die Netzaufwandszahl (R_{net}) verwendet:

$$R_{net} = \frac{E_{NB}}{E_{nutz}} \quad \text{Gl. 2}$$

Wobei E_{NB} für den Netzbezug steht, E_{nutz} steht für den Gesamt-Nutzenergiebedarf:

$$E_{nutz} = E_{HH} + Q_{WW} + Q_{RH} + Q_{RK} \quad \text{Gl. 3}$$

Dabei ist E_{HH} der Haushaltsstromverbrauch, Q_{WW} der Warmwasserverbrauch, Q_{RH} der Raumheizungsbedarf und Q_{RK} der Stromverbrauch der Wärmepumpe für die Raumkühlung.

2.3 Kostenanalyse

2.3.1 Berechnungsmethodik

Der ökonomische Nutzen der Solarenergie wird über den Unterschied der Energiegestehungskosten ($\Delta LCOEn$) im Vergleich mit einem System ohne Solaranlage untersucht. Dieser Wert wird mit der nachfolgenden Formel berechnet:

$$\Delta LCOEn = \frac{KE - WK - I \cdot a}{E_{nutz}} \quad \text{Gl. 4}$$

mit

$I = \text{Investitionskosten der Solaranlage}$

$$a = \text{Annuitätenfaktor} = \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}$$

$i = \text{Kalkulationszinssatz}$

$n = \text{Nutzungsdauer}$

KE = jährliche Kosteneinsparung

WK = jährliche Wartungskosten

Für den Kalkulationszinssatz wurde 1%, für die jährlichen Wartungskosten 0.25% der Investitionskosten und für die Nutzungsdauer 30 Jahre angenommen. Für die Berechnung der Kosteneinsparung wird jeweils der in Kapitel 2.3.2 und 2.3.3 beschriebene Preis des eingesparten Energieträgers genommen. Bei PV-Anlagen wird zusätzlich noch die Einspeisevergütung mitberücksichtigt. Subventionen werden in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt. Dies basierend auf der Tatsache, dass diese schon in den letzten sieben Jahren deutlich abgenommen haben und laut dem Bundesamt für Energie (BFE) die Förderung bis 2030 ausläuft [20].

2.3.2 Stromtarife

Für den Haushaltsstrom wurde der kantonale Maximal- und Minimaltarif für die Verbrauchskategorie H4 gewählt. Die Zahlen basieren auf den Angaben der Eidgenössischen Elektrizitätskommission ElCom⁴. Die Tarife für die PV-Einspeisung basieren auf den Daten des Verbandes für unabhängige Energieerzeuger (vese)⁵ wobei die Tarife der 30 grössten Elektrizitätswerke (EW) der Schweiz berücksichtigt wurden. Alle Daten in Tabelle 6 beziehen sich auf das Jahr 2019, es ist zu berücksichtigen, dass die Strompreise bezogen auf die Kantone von Jahr zu Jahr stark variieren können. Einige EW's gewähren eine Preisreduktion für Gebäude mit Wärmepumpen, jedoch wird dies von EW zu EW unterschiedlich gehandhabt. Es gibt keine einheitliche Regelung dazu, weshalb die Preisreduktion für Gebäude mit Wärmepumpen in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt wird.

Tabelle 6: Zusammenfassung der in der Studie verwendeten Stromtarife und PV-Einspeisetarife

	Wertebereich	Haushaltsstrom [Rp/kWh]	Referenz
Stromtarif	Max	27.84	Kt. BS, IWB
	Min	16.79	Kt. ZH, EKZ
	Median	19.3	Alle EW's
PV-Einspeisung	Max	13	IWB
	Min	6.23	SAK
	Median	9.0	30 grösste EW's

2.3.3 Gaspreis

Für natürliches Gas wurde der Schweizer Durchschnittspreis von 8.18 Rp/kWh angenommen. Dieser wird jährlich vom Preisüberwacher des Eidgenössischen Department für Wirtschaft,

⁴ www.strompreis.elcom.admin.ch

⁵ www.vese.ch/pvtarif

Bildung und Forschung (WBF) publiziert⁶. Aufgrund der Verpflichtung der Schweiz die CO₂-Emissionen bis 2050 zu senken (Pariser Klimaabkommen) wird angenommen, dass nur noch Biogas oder synthetisches Gas verwendet werden darf. Biogas ist heute ca. 50%-60% teurer als natürliches Gas (Preisliste energie360°). Deshalb wurde für das Jahr 2050 ein Gaspreis von 12.68 Rp/kWh gewählt.

2.3.4 Komponentenpreise

Die Gesamtkosten der PV- und Solarthermieanlagen basieren auf der BFE Studie HiPerPVT [21] welche Ende 2021 abgeschlossen wird. Die spezifischen Kosten in Abhängigkeit der Anlagengrösse ist in Abbildung 9 dargestellt. Die ausgewiesenen Kosten sind Gesamtkosten und enthalten somit die Installationsarbeiten als auch Anlagenkomponenten wie z.B. den thermischen Speicher oder den Wechselrichter (keine Batterien!). Es sind keine Subventionen berücksichtigt.

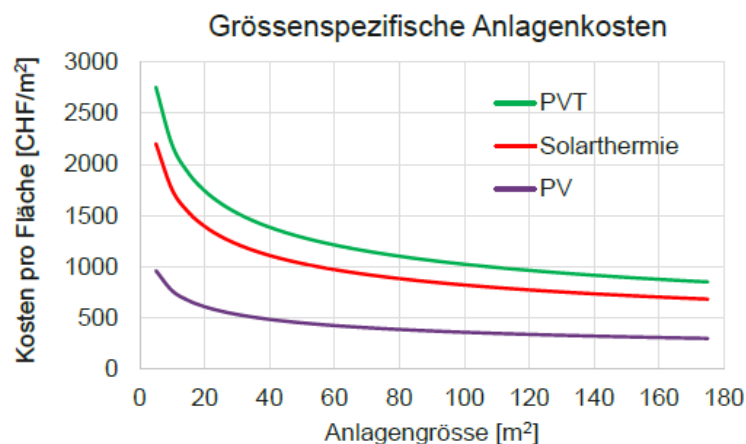


Abbildung 9: Spezifische Anlagenkosten in Abhängigkeit der Anlagengrösse [22].

Als Ausgangslage für die Kostenermittlung dienen Beispiellofferten aus unterschiedlichen Quellen [23,24]. Ausgehend von diesen Beispielanlagen wurde eine Skalierung mit der Gleichung 5 vorgenommen, welche auch im Solardachrechner des BFE verwendet wird [25]. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass im Gegensatz zur PV für die Solarthermie keine exakten Marktdaten zur Verfügung stehen um diese Skalierung mit einer grossen Datenmenge zu validieren.

$$\text{Skalierungsfaktor} = \left(\frac{\text{Fläche}}{40 \text{ m}^2} \right)^{-0.33} \quad \text{Gl. 5}$$

Angenommene Investitionskosten für eine Anlage mit einer installierten Fläche von 40 m²:

- PV-Anlage: 484 CHF/m² (bzw. 2835 CHF/kWp bei einer Anlagengrösse von Total ~7 kW)
- Solarthermie: 1100 CHF/m²

⁶ gaspreise.preisueberwacher.ch

3 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

3.1 Simulationsresultate

In diesem Kapitel werden die Simulationsergebnisse für die 4 verschiedenen Systeme zusammengefasst. Bei der gewählten Definition des Unterschiedes der Energiegestehungskosten ($\Delta LCOE_n$) entsprechen positive Werte einer Kosteneinsparung beim System mit solarer Energieerzeugung gegenüber dem Referenzsystem.

3.1.1 System 1 - Solarthermie in Kombination mit Gasbrenner für Warmwasser

Beim Solarthermie-System, für welches nur der Warmwasserverbrauch – ohne Raumheizung – simuliert wurde, gibt es einen deutlichen Anstieg des Kollektorsertrags, wie in Abbildung 10 (links) gesehen werden kann. Dies ist aufgrund der höheren Einstrahlung nachvollziehbar. Der Wärmebedarf für Warmwasser sinkt leicht aufgrund der steigenden Umgebungstemperaturen welche zu höheren Grundwassertemperaturen führen (Mitte links). Steigender Kollektorsertrag und sinkender WW-Wärmebedarf haben zur Folge, dass sowohl der solare Deckungsgrad (Abbildung 10, Mitte rechts), als auch die Kosteneinsparungen (Abbildung 10, rechts) bei gleicher Kollektorgröße steigen.

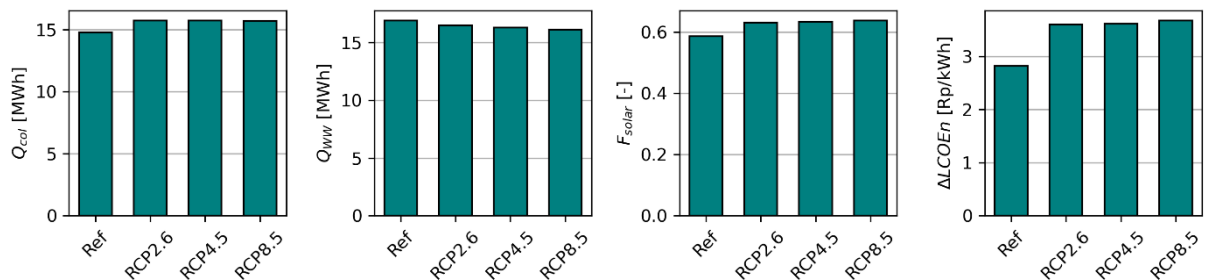


Abbildung 10: Resultate des ST-GB-WW-Systems. Links: Jährlicher Kollektorsertrag (Q_{col}); Mitte Links: Jährlicher Wärmebedarf für Warmwasser; Mitte Rechts: Jährlicher solarer Deckungsgrad (F_{solar}); Rechts: Unterschied der Energiegestehungskosten ($LCOE_n$) im Vergleich mit System ohne Solaranlage

3.1.2 System 2 - Solarthermie in Kombination mit Gasbrenner für Raumheizung und Warmwasser

Resultate für das zweite Solarthermie-System, bei dem sowohl WW als auch RH simuliert wurde, sind in Abbildung 11 dargestellt. Das dunkle Grün steht dabei jeweils für ideales Nutzerverhalten, das hellere Aquamarin steht für realistisches Nutzerverhalten. Der jährliche Kollektorsertrag (links) sinkt leicht im Vergleich zur Referenz bei den Zukunftsszenarien für das realistische Nutzerverhalten. Beim idealen Nutzerverhalten bleibt er in etwa gleich. Hier sind zwei gegensätzliche Effekte zu beobachten. Einerseits sinkt der Heizungsbedarf wegen dem wärmeren Klima (Mitte links), andererseits steigt die solare Einstrahlung, wodurch auch der Kollektorsertrag steigt. Trotz gleichbleibendem oder sinkendem Kollektorsertrag, steigt der solare Deckungsgrad (Mitte rechts), da durch das wärmere Klima weniger Gasunterstützung benötigt wird. Mit sinkendem Kollektorsertrag sinken auch die Kosteneinsparungen. Obwohl beim realistischen Nutzerverhalten die Kollektorserträge höher sind, ist der solare Deckungsgrad kleiner. Sehr deutlich ist der Unterschied zwischen idealem und realistischem Nutzerverhalten bei den Kosteneinsparungen. Das realistische Nutzerverhalten führt zu Kosteneinsparungen, welche über 1 Rp/kWh höher sind als mit dem idealen Nutzerverhalten. Der Grund dafür ist der höhere Heizwärmebedarf in der Übergangszeit, beziehungsweise die

daraus folgenden höheren Kollektorerträge bei gleicher Dimensionierung (gleiche Investitionskosten).

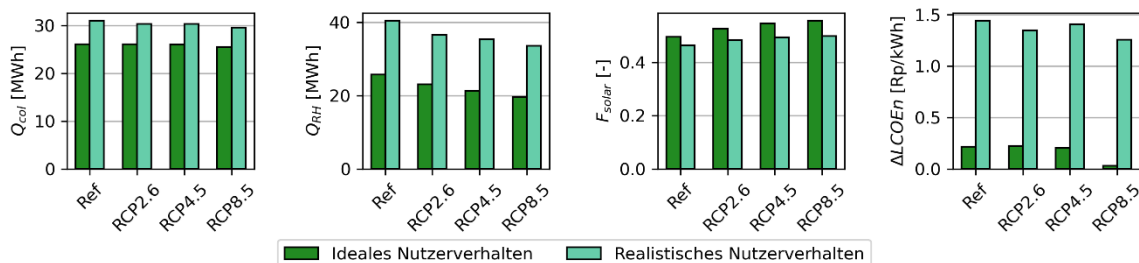


Abbildung 11: Resultate des ST-GB-WW-RH-Systems für ideales und realistisches Nutzerverhalten. Links: Jährlicher Kollektorertrag (Q_{col}); Mitte Links: Jährlicher Raumheizungsbedarf; Mitte Rechts: Jährlicher solarer Deckungsgrad (F_{solar}); Rechts: Unterschied der Energiegestehungskosten (LCOEn) im Vergleich mit System ohne Solaranlage

Der entsprechende monatliche Kollektorertrag sowie der Heizwärmebedarf sind exemplarisch für das Szenario RCP8.5 in Abbildung 12 dargestellt. Gut zu sehen ist, dass der Heizwärmebedarf beim realistischen Nutzerverhalten insbesondere im Frühling und im Herbst deutlich grösser ist. Dies kann mit den erhöhten Fensteröffnungen beim realistischen Nutzerverhalten erklärt werden. In den Monaten mit grossem Unterschied zwischen realistischen und idealen Heizwärmebedarf ist entsprechend auch der Unterschied beim Kollektorertrag höher. Allgemein ergibt sich für das Jahr 2050 eine Reduktion des Heizwärmebedarfs zwischen 10% und 24% beim idealen Nutzerverhalten, beziehungsweise 10% und 17% beim realistischen Nutzerverhalten.

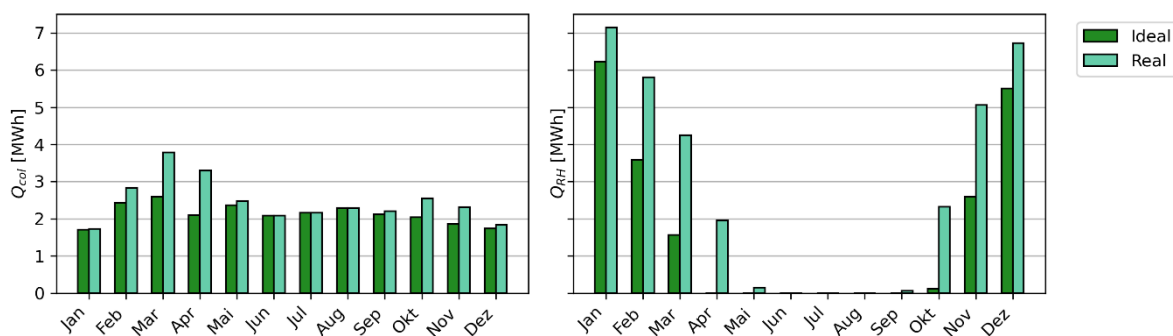


Abbildung 12: Monatlicher Kollektorertrag (links) und Raumheizungsbedarf (rechts) für das RCP8.5 Szenario für das ST-WW-RH-System

3.1.3 System 3 - Photovoltaik in Kombination mit Luftwärmepumpe für Raumheizung und Warmwasser

Ein Überblick über die Resultate des PV-WP-Systems wird in Abbildung 13 gegeben. Links können die PV-Erträge gesehen werden (Da die PV-Anlage gleich gross ist und überschüssige Energie ins Netz eingespeist wird, gibt es hier keinen Unterschied beim Nutzerverhalten). Aufgrund der höheren Einstrahlung ist der Ertrag leicht höher bei den Zukunftsszenarien. Der Einfluss des Klimawandels auf die Netzaufwandszahl ist jedoch gering (Mitte). Die Kostenersparnisse steigen mit der Durchschnittstemperatur. Der Grund dafür ist der kleinere Heizbedarf bei leicht höherem PV-Ertrag. Für das realistische Nutzerverhalten sind die relativen Kosteneinsparungen tiefer als für das ideale Nutzerverhalten, da der Wärmebedarf bei gleichem PV-Ertrag höher ist. Dabei steigt für das realistische Nutzerverhalten der Wärmebedarf in der Nacht stärker als der Wärmebedarf am Tag.

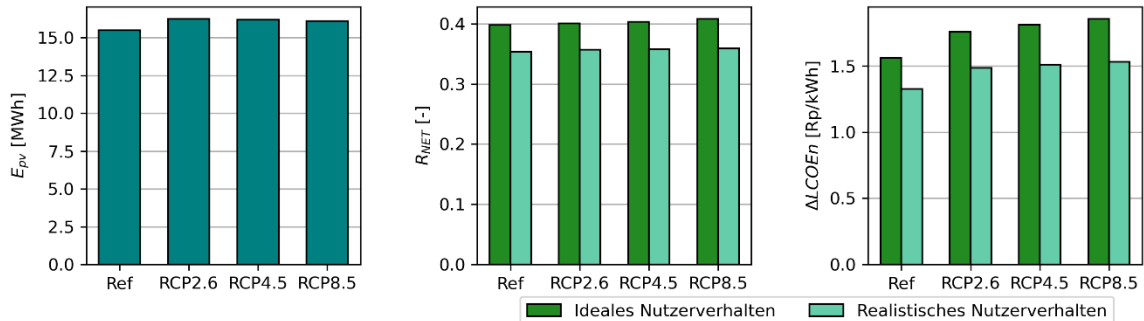


Abbildung 13: Resultate des PV-WP-WW-RH-Systems für ideales und realistisches Nutzerverhalten. Links: Jährlicher PV-Ertrag (E_{PV}); Mitte: Jährliche Netzaufwandszahl (R_{NET}); Rechts: Unterschied der Energiegestehungskosten ($LCOEn$) im Vergleich mit System ohne PV-Anlage

3.1.4 System 4 - Photovoltaik in Kombination mit Luftwärmepumpe für Raumheizung, Warmwasser und Raumkühlung

Die Resultate des PV-WP Systems, bei welchem neben Warmwasser und Raumheizung auch Raumkühlung integriert wurde sind in Abbildung 14 dargestellt. Links ist der elektrische Energiebedarf der Raumkühlung für die verschiedenen Szenarien dargestellt. Es ist gut ersichtlich, dass der Raumkühlungsbedarf mit steigenden Temperaturen stark steigt. Der Strombedarf für die Kühlung steigt im Jahr 2050 durchschnittlich um 45% bis 81% bei idealem Nutzerverhalten, beziehungsweise um 41% bis 75% bei realistischem Nutzerverhalten. Da das PV-Feld gleich dimensioniert wurde wie bei System 3 ist der PV-Ertrag gleich wie im vorherigen Kapitel 3.1.3 und wurde deswegen nicht erneut abgebildet. Das System hat bei gleichbleibendem PV-Ertrag aufgrund des Kühlens einen höheren Strombedarf. Deshalb sind die Netzaufwandszahlen höher (Abbildung 14, Mitte) und die relativen Kostenersparnisse tiefer (Abbildung 14, rechts) als beim System ohne RK. Dass die Unterschiede in den Gestehungskosten kleiner sind beim System mit RK gegenüber dem System ohne RK kommt daher, dass sowohl die absoluten Kosteneinsparungen, als auch der Nutzenergiebedarf steigt. Dabei steigt der Nutzenergiebedarf stärker, was die tieferen relativen Kosteneinsparungen zur Folge hat.

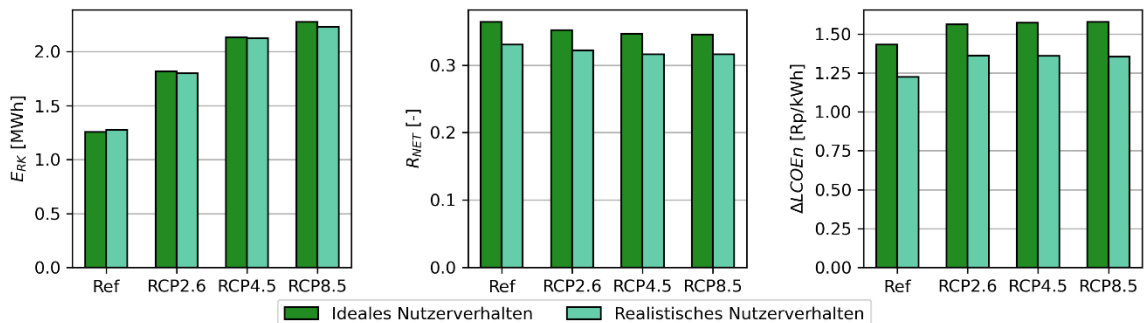


Abbildung 14: Resultate des PV-WP-WW-RH-RK-Systems für ideales und realistisches Nutzerverhalten. Links: Elektrische Energie, welche für die Raumkühlung benötigt wird; Mitte: Jährliche Netzaufwandszahl (R_{NET}); Rechts: Unterschied der Energiegestehungskosten ($LCOEn$) im Vergleich mit System ohne PV-Anlage

Exemplarisch werden in Abbildung 15 die monatlichen PV Erträge (links) und die monatliche für Raumkühlung benötigte elektrische Energie (rechts) für das RCP8.5 Szenario dargestellt.

Die PV-Erträge folgen der Einstrahlung (Abbildung 7) und liegen deutlich über dem Strombedarf, den die Wärmepumpe zum Kühlen braucht.

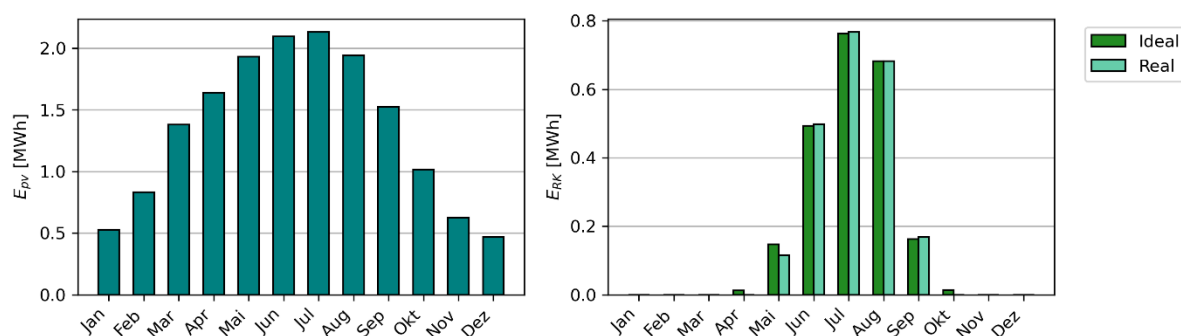


Abbildung 15: Monatsliche Resultate des PV-WW-RH-RK-Systems für ideales und realistisches Nutzerverhalten mit dem Szenario RCP8.5. Links: PV-Ertrag; Rechts: Elektrische Energie, welche von der Wärmepumpe für Raumkühlung benötigt wird.

3.1.5 Kostenvergleich

Um die Abhängigkeit der Kostenersparnisse von der Preisentwicklung darzustellen, wurde untersucht wie sich der Gas- und Strompreis beziehungsweise der Netzeinspeisungstarif auf die Energiegestehungskosten der vier Systeme auswirken. Die Abhängigkeit der Gestehungskosten vom Gaspreis für die beiden Solarthermie-Systeme ist für das Szenario RCP4.5 mit realistischem Nutzerverhalten in Abbildung 16 dargestellt. Eine Solarthermie-Anlage lohnt sich finanziell ab dem Gaspreis, für welchen $\Delta LCOEn$ positiv ist. Beim kleineren WW-System ist dies ab 8 Rp/kWh der Fall, beim grösseren WW-SH System ab 10 Rp/kWh.

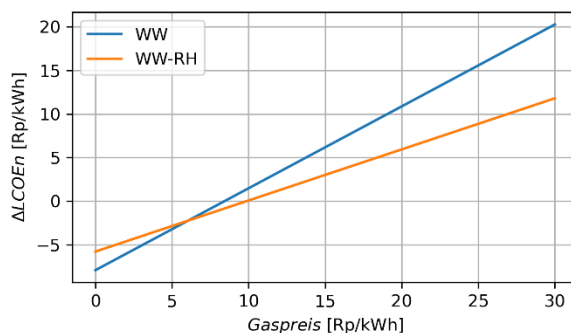


Abbildung 16: Einfluss des Gaspreises auf den Unterschied der Energiegestehungskosten für die beiden untersuchten Solarthermie-Systeme mit dem Szenario RCP4.5 und realistischem Nutzerverhalten.

Die Abhängigkeit der Energiegestehungskosten vom Strompreis und vom PV-Einspeisetarif sind in Abbildung 17 für das Szenario RCP4.5 mit realistischem Nutzerverhalten dargestellt. Für die Strompreisvariation wurde dabei der Einspeisetarif konstant gehalten und umgekehrt. Beim WW-RH-System lohnt sich die PV Anlage ab einem Strombezugspreis von 6.6 Rp/kWh, beim WW-RH-RK-System ab 6.8 Rp/kWh. Je höher der Einspeisetarif, desto mehr lohnt sich die PV Anlage, wobei sich die PV-Anlage für den gewählten Strompreis von 19.3 Rp/kWh auch lohnen würde, wenn der Einspeisetarif bei 0 Rp/kWh wäre.

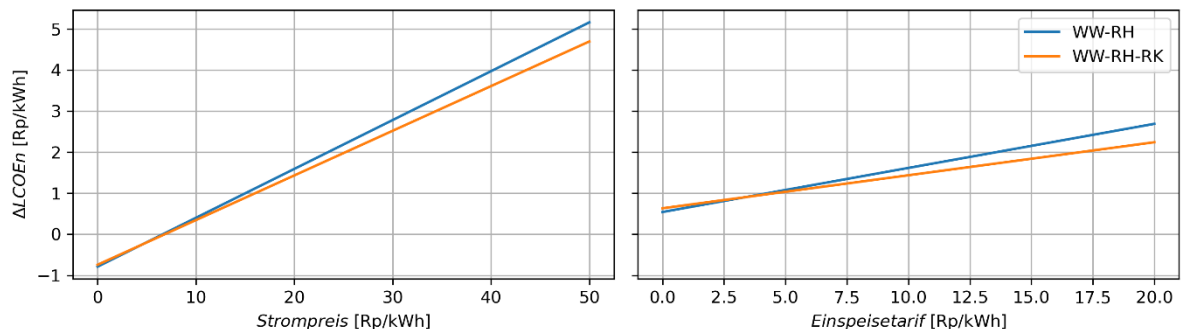


Abbildung 17: Einfluss des Strompreises und des PV-Einspeisetarifs auf den Unterschied der Energiegestehungskosten für die beiden untersuchten PV-Systeme mit dem Szenario RCP4.5 und realistischem Nutzerverhalten.

3.2 Konferenzen, Synergien und Networking

Erste Ergebnisse aus diesem Projekt wurden am 16. September an der Klimakonferenz 2020 in Rapperswil im Rahmen eines Vortrages von Igor Bosshard präsentiert.

Ein reger Austausch besteht zwischen verschiedenen Projekten:

Beim Projekt **BigIce** (*Bewertung von Solar-Eis-Systemen für Mehrfamilienhäuser*) werden Solar-Eis Systeme mit unterschiedlichen Wetterdaten von SIA untersucht. Die Methodik der Untersuchung hat viele Parallelen zum vorliegenden Projekt SolSimCC.

Bei **SolTherm2050** (*Chancen durch Solarwärme und thermische Energiespeicher für das Energiesystem Schweiz 2050*) werden verschiedene Systeme simuliert. Gewisse dieser Systeme konnten für die SolSimCC Simulationen übernommen werden. Bei SolTherm2050 gibt es eine Zusammenarbeit mit der HSLU, der ETH, und anderen.

Schliesslich werden beim Projekt **SolResHC** (*Solare Ressourcen für Heizen und Kühlen – Ein Beitrag zum PVPS Task 16*) unter anderem verschiedene Wetterdatensätze und deren Einfluss auf Systemsimulationen untersucht. Bei der Verlängerung des Projektes (**SolResHC2**) sollen dann auch verschiedene Klimaszenarien in die Untersuchungen miteinbezogen werden.

Im BFE Projekt **VentSol** setzt sich das SPF in Zusammenarbeit mit econcept AG genauer mit dem Nutzerverhalten in Wohngebäuden auseinander. Dabei werden fünf Mehrfamilienhäuser bezüglich Fensterlüftung und Fensterverschattung genauer untersucht. Die Ergebnisse werden im Schlussbericht Ende 2021 publiziert. Die vorläufigen Erkenntnisse wurde für die Abbildung des realistischen Nutzerverhaltens in diesem Projekt verwendet.

Per Email besteht ein Austausch zu Jan Remund von Meteotest.

4 Fazit und Ausblick

Aus der Literaturrecherche kann festgehalten werden, dass schon 2005 mit der ersten Schweizer Studie erkannt wurde, dass der Klimawandel einen wesentlichen Einfluss auf den Gebäudepark der Schweiz haben wird. Der Auslöser für diese Studie war der Rekordsommer 2003. Inzwischen sind bereits fünf Studien zu diesem Thema für die Schweiz veröffentlicht

worden. Es konnte keine Studie gefunden werden, welche die solare Energieproduktion und den sich verändernden Energiebedarf miteinander Verknüpft. Ein starker Anstieg an Kühlenergie in den Sommermonaten führt wahrscheinlich auch zu hohen Eigenverbrauchs-werten der PV-Produktion. Ob die solare Energiegewinnung jedoch ausreicht um den zusätzlichen Kühlbedarf zu decken ist nicht klar. Wärmere Winter reduzieren den Bedarf und das Volumen für saisonale Wärmespeicher, was vorteilhaft für das Konzept der 100% Solarhäuser ist, da sich dadurch das Kosten/Nutzen-Verhältnis verbessert.

Ein grosser Konsens aus den Studien besteht darin, dass Gebäude heute schon so gebaut werden müssen, dass diese auch in 2060 mit Einfluss des Klimawandels die Komfortbedürfnisse der Bewohner decken können. Deshalb wurde in der Studie von Frank [7] schon 2005 darauf hingewiesen, dass die Normwetterdaten der SIA überarbeitet werden sollten, da diese heute schon zu kühle Sommer aufweisen. Diese Wetterdaten sind wichtig für die Planung und die zukünftige Resilienz der Gebäude gegenüber dem Klimawandel, da die Auslegung der Gebäude wesentlich davon beeinflusst wird. Nach nun knapp 15 Jahren, werden zu den Normwetterdaten (SIA 2028) auch alternative Klimadaten erarbeitet welche den Klimawandel mitberücksichtigen⁷.

Die untersuchten Studien kamen zum Schluss, dass der Wärmebedarf von Gebäuden um etwa 30 – 45 % sinken wird. Der Kältebedarf andererseits um ca. 2.6 – 3.0 kWh/m² bei Wohngebäuden und um ca. 14 kWh/m² bei Bürogebäuden ansteigen wird. In beiden Fällen mit der Annahme, dass die CO₂-Emissionen nicht drastisch gesenkt werden (RCP8.5). Nicht nur Bürogebäude, sondern auch Wohngebäude werden in Zukunft mit grosser Wahrscheinlichkeit gekühlt werden müssen, was für die Schweiz heute noch nicht üblich ist. Bei Wohngebäuden wird jedoch der Heizwärmebedarf auch beim extremsten Szenario (RCP8.5) weiterhin der dominierende thermische Energiebedarf bleiben.

Bei gut gedämmten Gebäuden ($Q_h < 50 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) kann laut Literatur das Nutzerverhalten in Bezug auf Fensteröffnung und Sonnenschutz den Heizwärmebedarf zwischen 30% und 70% erhöhen.

Um den Einfluss des Klimawandels und des Nutzerverhaltens auf die Rentabilität von Solarenergie zu untersuchen, wurden für die vorliegende Studie Simulationen mit verschiedenen Systemen durchgeführt. Untersucht wurden dabei für den Standort Bern ein Referenzdatensatz, welcher ein jetziges durchschnittliches Klima repräsentiert, sowie die drei IPCC Zukunftsszenarien RCP2.6 (schwache Erwärmung), RCP4.5 (mittlere Erwärmung) und RCP8.5 (starke Erwärmung) für das Jahr 2050. Bezüglich Nutzerverhalten wurde zwischen idealem und realistischen Nutzerverhalten unterschieden. Für die Kostenabschätzungen wurde der Unterschied der Gestehungskosten aufgrund von Simulationen ohne Solarenergie berechnet.

Solarthermie wurde einerseits für ein reines Warmwasser-System und andererseits für ein System mit Warmwasser und Heizungsunterstützung simuliert. Als Backup System wurde dabei ein Gasbrenner verwendet. Für die getroffenen Annahmen ergeben sich Kosteneinsparungen von über 3 Rp/kWh für das Warmwasser-System, wobei die Kosteneinsparungen für die Zukunftsszenarien leicht höher sind als beim Referenzszenario. Bei zusätzlicher Heizungsunterstützung gibt es einen deutlichen Unterschied zwischen

⁷ Projekt im Rahmen des Pilotprogramms "Anpassung an den Klimawandel" des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

idealem und realistischem Nutzerverhalten. Aufgrund des signifikant höheren Raumheizungsbedarf beim realistischen Nutzerverhalten sind die Kosteneinsparungen mit gleicher Kollektorfläche deutlich höher. Für das realistische Nutzerverhalten beträgt der Unterschied in den Gestehungskosten zwischen 1.3 und 1.5 Rp/kWh, während er beim idealen Nutzerverhalten nur zwischen 0 und 0.3 Rp/kWh beträgt. Im Vergleich zum Referenzszenario sind die Kosteneinsparungen bei den Zukunftsszenarien für raumwärmeunterstützende Systeme leicht kleiner.

Photovoltaik wurde in Kombination mit einer Luftwärmepumpe für ein System mit Warmwasser, Raumheizungsbedarf und Haushaltsstrom, sowie für ein System mit zusätzlicher Raumkühlung simuliert. Die Kühlung wurde dabei über die Fussbodenheizung mit der Wärmepumpe implementiert. Für die gewählten Parameter resultierte beim System ohne Raumkühlung eine tiefere Netzaufwandszahl sowie kleinere Kosteneinsparungen bei realistischem Nutzerverhalten gegenüber dem idealen Nutzerverhalten. Für die Zukunftsszenarien steigen die Kosteneinsparungen. Der Unterschied in den Gestehungskosten bezüglich der Nutzenergie liegt bei 1.3 – 1.5 Rp/kWh für das realistische Nutzerverhalten beziehungsweise bei 1.5 – 1.9 Rp/kWh beim idealen Nutzerverhalten. Wenn zusätzlich noch Raumkühlung integriert wurde, ist ein deutlicher Anstieg des Kühlbedarfs mit Anstieg der Temperatur zu beobachten. Die relativen Kosteneinsparungen sind jedoch tiefer und betragen zwischen 1.2 und 1.4 Rp/kWh für das realistische Nutzerverhalten, beziehungsweise 1.4 – 1.6 Rp/kWh beim idealen Nutzerverhalten. Für die Zukunftsszenarien sind die Kosteneinsparungen höher im Vergleich zum Referenzszenario.

Allgemein ergibt sich für das Jahr 2050 eine Reduktion des Heizwärmebedarfs zwischen 10% und 24% beim idealen Nutzerverhalten, beziehungsweise 10% und 17% beim realistischen Nutzerverhalten. Der Strombedarf für die Kühlung steigt um 45% bis 81% (ideales Nutzerverhalten) beziehungsweise 41% bis 75% (realistisches Nutzerverhalten). Des Weiteren führt das realistische Nutzerverhalten im Vergleich zum idealen Nutzerverhalten zu höheren relativen Kosteneinsparungen beim Solarthermie-System – bei den PV-Systemen führt es jedoch zu kleineren relativen Kosteneinsparungen. Dies, weil bei der Solarthermie-Anlage – im Gegensatz zur PV-Anlage – beim realistischen Nutzerverhalten der Ertrag steigt. Mit einer Batterie und Eigenverbrauchsregelung könnte das PV-System jedoch weiter optimiert werden.

Eine Parameterstudie bezüglich des Einflusses des Gaspreises auf den Unterschied der Gestehungskosten bei den beiden Solarthermie-Systemen ergab, dass sich das Warmwassersystem beim RCP4.5 Szenario ab einem Gaspreis von 8 Rp/kWh lohnt, das grössere System mit zusätzlicher Heizungsunterstützung lohnt sich ab einem Gaspreis von 10 Rp/kWh. Bei den beiden PV-Systemen gibt es für das RCP4.5 Szenario Kosteneinsparungen gegenüber einem System ohne PV ab einem Strombezugspreis von 6.6 Rp/kWh im Fall von Warmwasser und Raumheizung, beziehungsweise 6.8 Rp/kWh bei zusätzlicher Raumkühlung.

5 Referenzen

- [1] MeteoSchweiz, Beobachtete Trends bei Temperatur, Niederschlag und Sonnenschein, Klimawandel Schweiz. (2020). <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klimawandel-schweiz.html> (accessed November 17, 2020).
- [2] IPCC (2013), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge and New York, 2013.
- [3] CAN (2018), Ziel Verfehlt - Ranking der Ambitionen und Fortschritte der EU-Mitgliedsstaaten bei der Bekämpfung des Klimawandels, Climate Action Network (CAN) Europe, Brüssel, 2018.
- [4] D. Guan, J. Meng, D.M. Reiner, N. Zhang, Y. Shan, Z. Mi, S. Shao, Z. Liu, Q. Zhang, S.J. Davis, Structural decline in China's CO₂ emissions through transitions in industry and energy systems, *Nature Geoscience*. 11 (2018) 551–555. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0161-1>.
- [5] CH2018 - Climate Scenarios for Switzerland, National Centre for Climate Services, Zürich, 2018.
- [6] D.P. van Vuuren, J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G.C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J.-F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S.J. Smith, S.K. Rose, The representative concentration pathways: an overview, *Climatic Change*. 109 (2011) 5. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.
- [7] T. Frank, Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland, *Energy and Buildings*. 37 (2005) 1175–1185. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.019>.
- [8] G. Settembrini, S. Domingo-Irigoyen, T. Heim, D. Jurt, A. Zakovorotnyi, G. Zweifel, U.-P. Menti, *ClimaBau - Planen angesichts des Klimawandels - Energiebedarf und Behaglichkeit heutiger Wohnbauten bis ins Jahr 2100*, HSLU, Luzern, 2017.
- [9] C.U. Brunner, U. Steinemann, J. Nipkow, *Bauen, wenn das Klima wärmer wird*, Bundesamt für Energie (BFE), Zürich, 2007.
- [10] M. Berger, J. Worlitschek, The link between climate and thermal energy demand on national level: A case study on Switzerland, *Energy and Buildings*. 202 (2019) 109372. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109372>.
- [11] M. Christenson, H. Manz, D. Gyalistras, Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland, *Energy Conversion and Management*. 47 (2006) 671–686. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.06.009>.
- [12] I. Mojic, M. Haller, *KlimaGapLite – Literaturrecherche zu den bestehenden Methoden zur Witterungsbereinigung im Gebäudebereich*, SPF Institut für Solartechnik, Rapperswil, 2019.

- [13] A. Walch, R. Castello, N. Mohajeri, J.-L. Scartezzini, Big data mining for the estimation of hourly rooftop photovoltaic potential and its uncertainty, *Applied Energy*. 262 (2020) 114404. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114404>.
- [14] I. Mojic, M. Luzzatto, M. Haller, M. Lehmann, M. Benz, S. Van Velsen, ImmoGap - Einfluss der Kombination aus Nutzerverhalten und Gebäudetechnik auf den Performance Gap bei Mehrfamilienhäuser, SPF Institut für Solartechnik, HSR Hochschule für Technik Rapperswil, 2018.
- [15] C. Gmür, Interne Analyse des Heizwärmebedarfs und unterschiedlicher Witterungsbereinigungsverfahren, AWEL, Zürich, 2019.
- [16] Meteotest, METEONORM 7.3.1: Global meteorological database for solar energy and applied climatology, (2019). <https://meteonorm.com/> (accessed April 9, 2019).
- [17] S.A. Klein et al, TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA, (2010). <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>.
- [18] F. Schröder, B. Gill, M. Güth, T. Teich, A. Wolff, Entwicklung saisonaler Raumtemperaturverteilungen von klassischen zu modernen Gebäudestandards - Sind Rebound-Effekte unvermeidbar?, *Bauphysik*. 40 (2018) 151–160.
- [19] I. Bosshard, C. Moser, M. Haller, VentSol - Erfassung des Nutzerverhaltens bezüglich Lüftung, Verschattung und Raumtemperatur in Abhängigkeit des Aussenklimas, Bundesamt für Energie BFE, Rapperswil, 2021.
- [20] BFE (2019), Förderung der Photovoltaik - Faktenblatt - Version 1.2, (2019). <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/foerderung/erneuerbare-energien/einmalverguetung.html>.
- [21] D. Zenhäusern, S. Brunold, HiPer-PVT - Abgedeckter PVT-Kollektor mit Überhitzungsschutz, Bundesamt für Energie BFE, Rapperswil, 2021.
- [22] D. Zenhäusern, Key Performance Indicators for PVT Systems, SHC IEA Task 60, Report D1, 2020.
- [23] D. Philippen, M. Caflisch, S. Brunold, M. Haller, ReSoTech – Reduktion der Marktpreise solarthermischer Anlagen durch neue technologische Ansätze – Teil 1: Potenzialanalyse und Lösungsansätze, SPF Institut für Solartechnik, Bern, 2016. <https://www.aramis.admin.ch/Dokument.aspx?DocumentID=35218>.
- [24] D. Fischer, M. Toneatti, S. Eberhart, S. Pannatier, Handbuch PV Selbstbau - Unterlagen zum organisierten Selbstbau von Photovoltaikanlagen, VESE, Bern, 2018.
- [25] Simulation von Energiesystemen - mit dem Tachion-Simulation-Framework, (2020). https://tachionframework.com/603/client/res/603/docs/Usermanual_de.pdf.