

Institut für Solartechnik SPF
OST Ostschweizer Fachhochschule
Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil
Tel. +41 58 257 48 36,
www.spf.ch

Grundlagen für direkt-elektrische Erwärmung des Warmwassers

Autoren:

Robert Haberl
Michel Haller
Reto von Euw

Projektbegleitung:

Christoph Gmür, Leiter Arbeitsgruppe MuKE
Adrian Tschui, Sekretär Arbeitsgruppe MuKE

Datum: 26. April 2024

Abkürzungsverzeichnis

16A	Leistungsbegrenzung der elektrischen Aufnahme auf 16 Ampère
Boost	Verwendet in FWM-Boost: dezentrale Frischwassermodule welche das Warmwasser über die Raumheizverteilung (vor)-erwärmen, mit nachgeschalteter elektrischer Nachheizung zur Erreichung der Warmwasser-Solltemperatur
COP	Coefficient of Performance (Wärmelieferung geteilt durch elektrischer Aufwand)
Dez	Dezentrale Wassererwärmung
EBF	Energiebezugsfläche
EI	Elektrische Energie
E-Mob	Elektromobilität
EnDK	Konferenz kantonaler Energiedirektoren
EnG	Energiegesetz SR 730.0 vom 30. Sep. 2016, Stand 1. Sep. 2023
FWM	Frischwassermodul
Heizb	Warmhalteband (Heizband) zur Warmhaltung der Warmwasserverteilung
HH	Haushaltsstrom
HTWP	Hochtemperatur-WP, welche 60 °C im Warmwasserspeicher auch ohne Elektroheizeinsatz erreicht
ID	Innerer Durchmesser
KW	Kaltwasser
MFH	Mehrfamilienhaus
MuKE	Mustervorschrift der Kantone im Energiebereich
NTWP	gewöhnliche «Niedertemperatur»-Wärmepumpe, welche 60 °C im Warmwasserspeicher nicht erreicht ohne zusätzlichen Elektroheizeinsatz
prSIA	SIA Vornorm / Normentwurf
PV	Photovoltaik
Ref	Referenzsystem mit Wärmepumpe
RL	Rücklauf
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverband
SIE	Spültisch-Instantan-Elektroerwärmer
ST	Solarthermie
VL	Vorlauf
WP	Wärmepumpe
WW	Warmwasser
Z	Zentrale Wassererwärmung
Zirk	Warmwasser-Zirkulation zur Warmhaltung der Warmwasserverteilung

Inhalt

1	Ausgangslage	1
2	Übersicht Systeme	2
2.1	Referenz-Gebäude	2
2.2	Referenz-Warmwassersysteme	3
2.2.1	Referenz für zentrale Warmwassererzeugung (Ref-Z).....	3
2.2.2	Referenz für dezentrale Warmwassererzeugung (Ref-Dez).....	4
2.3	Erzeugungsarten mit direkt-elektrischer Erwärmung des Warmwassers.....	4
2.3.1	Variante A: Solarwärme mit Elektroheizeinsatz (ST+EI).....	4
2.3.2	Variante B: Photovoltaik mit Elektroheizeinsatz (PV+EI).....	5
2.3.3	Variante C: Dezentrale FWM-Booster an Raumheizverteilung (FWM-Boost).....	5
2.3.4	Variante D: Spültisch-Instantan-Elektrowärmer (SIE)	6
3	Methodik und Berechnungen	7
3.1	Wärmebilanz.....	7
3.1.1	Speicherwärmeverluste	7
3.1.2	Wärmeverluste der warmgehaltenen Leitungen.....	8
3.1.3	Ausstosswärmeverluste.....	9
3.1.4	Wärmeverluste von Heizungsleitungen.....	9
3.1.5	Zusammenfassung Wärmebilanz.....	10
3.2	Berechnung des elektrischen Aufwandes der Wärmepumpen	11
3.3	Solarthermische Wassererwärmung (A: ST+EI).....	12
3.4	PV-Strom Beiträge an Elektro-Warmwasser (B: PV+EI).....	12
3.5	Berechnung der dezentralen FWM-Booster (C: FWM-Boost)	13
3.5.1	Begrenzung der elektrischen Leistung	13
3.5.2	Vorwärmung des Kaltwassers	13
3.5.3	Nutzwarmwasserbedarf und Wärmeverluste.....	14
3.6	Spültisch-Instantan-Elektrowassererwärmer (D: SIE)	15
4	Resultate	16
4.1	Referenzsystem und Wärmebedarf (Ref).....	16
4.2	Solarthermie mit Elektroheizeinsatz (A: ST+EI).....	18
4.3	Photovoltaik mit Elektroheizeinsatz (B: PV+EI)	19
4.4	FWM-Booster ab Raumheizverteilung (C: FWM-Boost).....	20
4.5	Vergleich der Varianten mit jahreszeitlicher Abhängigkeit.....	22
4.6	Spültisch-Instantan-Elektrowassererwärmer (D: SIE)	23
5	Diskussion	25
5.1	Referenz-Gebäude mit zentraler Warmwassererzeugung (Ref-Z)	25
5.2	Solarthermie mit Elektroheizeinsatz (A: ST+EI).....	25
5.3	Photovoltaik und Elektroheizeinsatz (B: PV+EI).....	26
5.4	Dezentrale FWM-Booster (C: FWM-Boost).....	26
5.5	Spültisch-Instantan-Elektrowassererwärmer (D: SIE)	27
6	Schlussfolgerungen	28
6.1	Generelle Effizienz-Aspekte.....	28
6.2	Unterscheidung zwischen Januar (Winter) und Juli (Sommer).....	28
6.3	Kritische Betrachtung der MuKE n 2014	28
7	Bibliographie	31
Annex A	Haushalts-Belegungen und Stromprofile	32
Annex B	Carnot Wirkungsgrad der WP	33
Annex C	Effizienz solarthermischer Kollektoren	34

1 Ausgangslage

Gemäss den Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE; Stand 2018) darf bei neu gebauten Wohnbauten das Warmwasser nicht mehr zu 100 % direkt elektrisch erwärmt werden. Gemäss Artikel 1.16 der MuKE muss das Trinkwasser während der Heizperiode mit dem Wärmeerzeuger für die Raumheizung erwärmt oder vorgewärmt, andernfalls zu mindestens 50 % mittels erneuerbarer Energie oder Abwärme erwärmt werden. Das heisst, die Restwärmedeckung des Trinkwassers auf die gewünschte Warmwassertemperatur kann direkt elektrisch erfolgen. Bei dem Generalsekretariat der Konferenz Kantonalen Energiedirektoren (EnDK) häufen sich die Anfragen, welche auf unterschiedliche Weise die Wassererwärmung mit elektrischer Energie ausführen möchten. Deshalb soll eine Auslegeordnung zusammengetragen werden, wie in Wohnbauten (Fokus liegt bei einem MFH) eine direkt elektrische Erwärmung des Trinkwassers erfolgen kann. Die ausgearbeiteten Lösungen sind mit statischen Berechnungen zu beurteilen und einander gegenüberzustellen. Im Hinblick auf die MuKE 2025 sind die Anforderungen zu hinterfragen.

Auszug aus der MuKE, Stand 2018, bezüglich Zulassung Elektro-WW

Art. 1.16 Wassererwärmer (V)

¹ Wassererwärmer sind für eine Betriebstemperatur von max. 60 °C auszulegen. Ausgenommen sind Wassererwärmer, deren Temperatur aus betrieblichen oder aus hygienischen Gründen höher sein muss.

² Der Neueinbau oder Ersatz einer direkt-elektrischen Erwärmung des Warmwassers ist in Wohnbauten nur erlaubt, wenn das Warmwasser

- a. während der Heizperiode mit dem Wärmeerzeuger für die Raumheizung erwärmt oder vorgewärmt wird; oder
- b. zu mindestens 50 % mittels erneuerbarer Energie oder Abwärme erwärmt wird.

Teilmodul I

Art. 1.37 Sanierungspflicht zentraler Elektro-Wassererwärmer (G)

¹ Der Ersatz eines zentralen Elektro-Wassererwärmers ist [bewilligungs- / meldepflichtig].

² Bestehende zentrale Wassererwärmer, die ausschliesslich direkt elektrisch beheizt werden, sind bei Wohnnutzungen innerhalb von 15 Jahren nach Inkraftsetzung dieses Gesetzes durch Anlagen zu ersetzen oder durch andere Einrichtungen zu ergänzen, so dass sie den Anforderungen dieses Gesetzes entsprechen.

³ Die Verordnung kann Befreiungen vorsehen.

2 Übersicht Systeme

Generell wird von einem Mehrfamilienhaus ausgegangen, welches in 2.1 beschrieben wird. Auf die zusätzliche Berechnung eines Einfamilienhauses wird verzichtet.

Für die statische Berechnung wird unterschieden zwischen einem Sommermonat (Juli) und einem Wintermonat (Januar).

2.1 Referenz-Gebäude

Als Referenz-Mehrfamilienhaus wird abgestützt auf ein gut dokumentiertes fiktives Objekt, welches in Mojic et al. detailliert beschrieben wird [1]. Die Variante entspricht dem Gebäude mit der Bezeichnung "Sanierung MuKE". Es handelt sich um ein dreistöckiges, renoviertes Gebäude, das aus sechs Wohnungen besteht: drei auf der Ostseite und weitere drei auf der Westseite, wie in Abbildung 1 dargestellt. Andere Gebäude oder Objekte wie Bäume beschatten das Gebäude nicht, was für die Photovoltaik-Stromerzeugung relevant sein kann. Ausserdem gibt es im Gebäude keine mechanische Lüftung.

Das Gebäude wurde ursprünglich als Mehrfamilienhaus (MFH) mit einem idealen Heizsystem simuliert mit dem als "Type 56" bezeichneten Gebäudemodell in der Software TRNSYS. Somit liegen neben dem weiter unten beschriebenen Warmwasserprofil auch die Wärmelastprofile vor. Tabelle 1 zeigt die allgemeinen Spezifikationen des für die Simulation verwendeten Gebäudes.

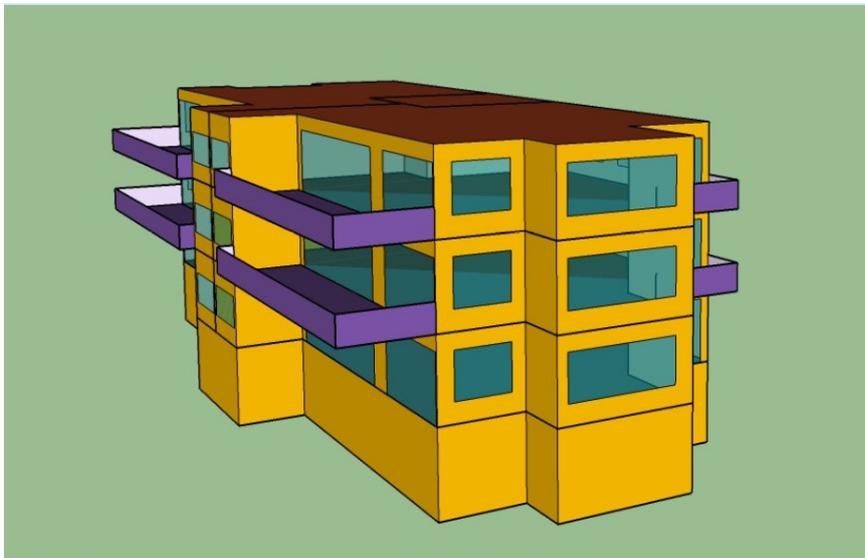


Abbildung 1: Simuliertes Mehrfamilienhaus "Sanierung MuKE"[1].

Tabelle 1: Allgemeine Merkmale des Gebäudes.

Energiebezugsfläche (EBF)	1'302 m ²
Nettogeschossfläche	1'103 m ²
Spezifischer Heizwärmebedarf (Raumheizung)	45 kWh/(m ² •a)
Gebäudehüllzahl	1.3

Die Belegung der sechs Wohneinheiten sowie der Bedarf an Haushaltsstrom und Warmwasser ist in Annex A beschrieben. Die Kennzahlen des Warmwasserbedarfs sind in Tabelle 2 gelistet.

Tabelle 2: Kennzahlen des Warmwasserbedarfs (Nutzwarmwasserbedarf an Entnahmestellen).

	[kWh/a]	[L/d] (10 -> 60 °C)
Total (6 Wohneinheiten)	17'263	815
pro Wohneinheit	2'877	136
pro Person (18 Personen)	959	45

2.2 Referenz-Warmwassersysteme

Als Referenz wird eine Warmwassererzeugung über Wärmepumpe angenommen. Diese kann a) zentral oder b) dezentral in den Wohnungen installiert sein. Der Wärmebedarf für die Raumheizung wird in den Berechnungen nicht betrachtet.

2.2.1 Referenz für zentrale Warmwassererzeugung (Ref-Z)

Als Referenz für die zentrale Wassererwärmung wird ein Wärmepumpensystem mit zwei Trinkwarmwasser-Speicher gewählt, welche mit einer Warmwasserladung über einen Plattenwärmeübertrager durch eine Wärmepumpe beladen werden (Abbildung 2). Dieses Konzept wurde bereits im Projekt HpCosy [2] eingehend untersucht und beschrieben. Die Speicher wurden dimensioniert für einen WW-Bedarf pro Person von 60 Normlitern (Spitzenbedarf für gehobenen Wohnungsbau gemäss der Norm SIA 385/2:2015). Die resultierende Speichergrosse 1'080 Liter wurde auf zwei Speicher verteilt auf Grund der einfacheren Einbringung bei Sanierung, und auf die nächstgrössere verfügbare Einheit von 600 Liter Volumen aufgerundet. Das zentrale Referenzsystem beinhaltet auch eine WW-Zirkulation.

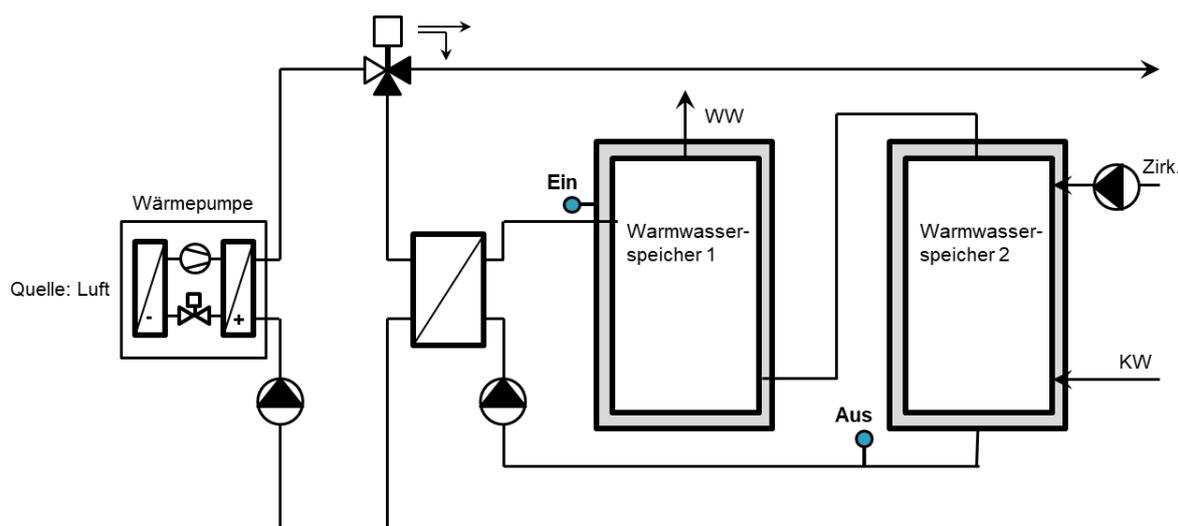


Abbildung 2: Vereinfachte Darstellung der Referenzvariante «zentrale Warmwassererzeugung mit Wärmepumpe»

2.2.2 Referenz für dezentrale Warmwassererzeugung (Ref-Dez)

Als Referenz für die dezentrale Wassererwärmung wird auf ein Konzept abgestützt, welches in Teilen ebenfalls in HpCosy simuliert wurde. Abbildung 3 zeigt dieses Konzept schematisch. Die dezentralen Wärmepumpeneinheiten nutzen, genau wie das zentrale Referenzsystem, Luft als Quelle. Die dezentralen Wärmepumpen-Speichereinheiten verfügen jeweils über 220 Liter Volumen. Die Speicher-Wärmeverluste sind gesamthaft höher als im zentralen System, da die einzelnen Speicher bei vergleichbarem Volumen eine grössere Oberfläche und eine höhere Anzahl von Anschlüssen haben. Es gibt keine Verteilverluste, da die Zirkulation in den dezentralen Systemen entfällt.

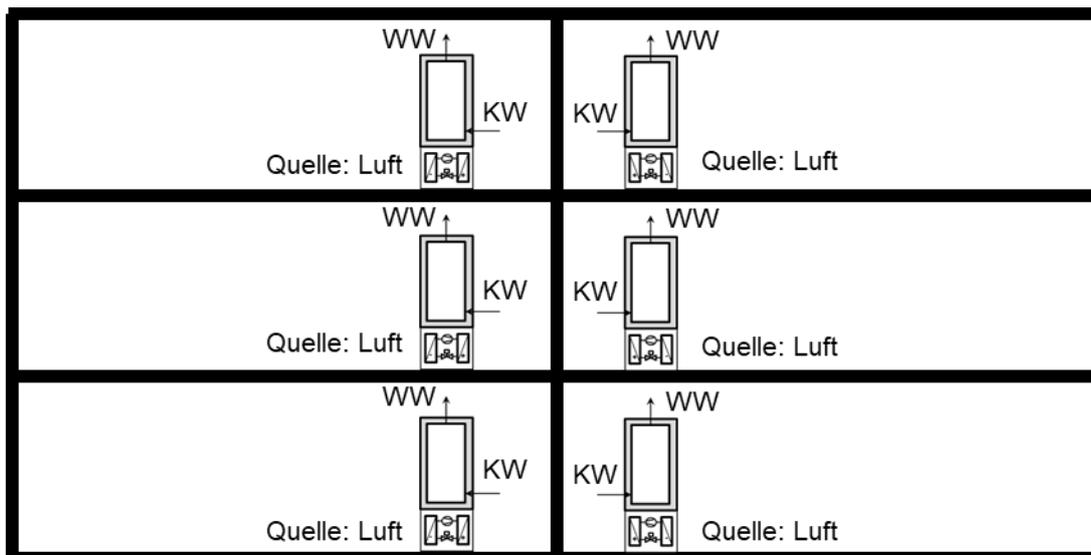


Abbildung 3: Vereinfachte Darstellung der Referenzvariante «dezentrale Warmwassererzeugung»

2.3 Erzeugungsarten mit direkt-elektrischer Erwärmung des Warmwassers

2.3.1 Variante A: Solarwärme mit Elektroheizeinsatz (ST+EI)

Wassererwärmung über Solarthermie kann im Sommer den Bedarf an Warmwasser zu 100 % decken. In den Übergangszeiten, im Winter und bei längeren Schlechtwetterperioden kommt jedoch eine Zusatzheizung zum Einsatz. Eine bisher zugelassene Variante der Zusatzheizung ist die direkt-elektrische Erwärmung des Warmwassers mittels eines Elektroheizeinsatzes, unter der Voraussetzung, dass dieser weniger als 50 % des Wärmebedarfs der Warmwasserversorgung bereitstellt. Aus diesem Grund soll diese Variante hier ebenfalls betrachtet werden:

ST+EI: Zentrales System mit solarer Warmwassererwärmung welche mindestens 50 % des Wärmebedarfs der Warmwasserversorgung deckt

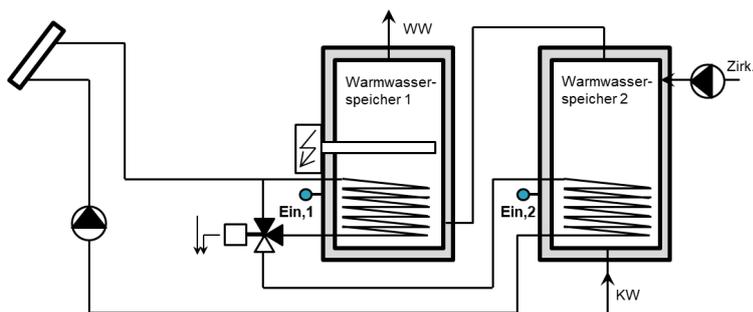


Abbildung 4: Vereinfachte Darstellung der Variante A «direkt-elektrische Erwärmung des Warmwassers mit mind. 50 % Solarthermie»

2.3.2 Variante B: Photovoltaik mit Elektroheizeinsatz (PV+EI)

Bei dieser Variante wird davon ausgegangen, dass das Mehrfamilienhaus über eine Photovoltaikanlage verfügt (Annahme: 28 kWp), und der PV-Strom über einen Elektroheizeinsatz zur Erwärmung des Warmwassers verwendet wird. Sollte nicht genügend PV-Strom zur Verfügung stehen, so wird ebenfalls über den Elektroheizeinsatz mit Netzstrom Warmwasser erzeugt. Es findet entsprechend keine zusätzliche Wassererwärmung über eine Wärmepumpe (WP) oder eine andere Wärmezeugung statt.

Es werden folgende Untervarianten unterschieden:

- Dez** Der Warmwasserspeicher ist zentral im Gebäude positioniert. Mit einer Zirkulation wird die Warmwasserverteilung warmgehalten.
- Z** Die Warmwasserspeicher sind dezentral pro Wohneinheit positioniert, so dass die Warmwasserverteilungen nicht warmgehalten werden müssen. Die Speicheraustrittstemperaturen sind daher niedriger als bei zentraler Wassererwärmung.

Für die Feststellung, welcher Anteil des elektrischen Aufwandes der Wassererwärmung über PV gedeckt werden kann, wird die Verwendung des PV-Stroms nach folgender Reihenfolge priorisiert:

1. Deckung des Haushaltsstrombedarfs
2. Deckung Elektromobilität
3. Deckung des Warmwasserbedarfs mittels PV-Elektroheizeinsatz

2.3.3 Variante C: Dezentrale FWM-Booster an Raumheizverteilung (FWM-Boost)

Die Wassererwärmung erfolgt dezentral in Frischwassermodulen (FWM) mit jeweils einem nachgeschalteten Elektroheizeinsatz. Die FWM zur Vorwärmung werden durch ein Zweileitersystem via Heizung versorgt. Es werden zwei Varianten berücksichtigt:

FWM-Boost-35/30: Das Zweileitersystem fährt auf einer VL- und RL-Temperatur, welche der Versorgung der Fussbodenheizung mit Auslegung 35/30 °C entspricht. Die Vorlauftemperatur wird in Abhängigkeit der Aussentemperatur ermittelt. Damit wird bei Warmwasserbedarf das Kaltwasser vorgewärmt, und mit Elektroheizeinsatz nachwärmt, bis auf die Soll-Warmwassertemperatur am Ausgang des FWM-Booster nach Norm SIA 385/1:2020 (52 °C). Die elektrische Leistung des Elektroheizeinsatzes im FWM-Booster ist ausreichend hoch, um auch ohne Vorerwärmung (ausserhalb der Heizperiode) die Soll-Warmwassertemperatur zu erreichen.

FWM-Boost-35/30 16A: Die elektrische Leistung des Elektroheizeinsatzes in den FWM-Boostern ist auf 16 A pro Phase limitiert. Das Erreichen der Soll-Warmwassertemperatur ist ohne eine Vorerwärmung des Kaltwassers nicht möglich.

FWM-Boost-50/40: Das Zweileitersystem fährt auf einer VL- und RL-Temperatur, welche der Versorgung von Radiatoren mit Auslegung auf 50/40 °C entspricht. Das Kaltwasser wird vorgewärmt und mit dem Elektroheizeinsatz des FWM-Boosters auf 52 °C nacherwärmt. Die elektrische Leistung des Elektroheizeinsatzes im FWM-Booster ist ausreichend hoch, um auch ohne Vorerwärmung (ausserhalb der Heizperiode) die Soll-Warmwassertemperatur zu erreichen.

FWM-Booster 50/40 16A: Die elektrische Leistung des Elektroheizeinsatzes in den FWM-Boostern ist auf 16 A pro Phase limitiert. Das Erreichen der Soll-Warmwassertemperatur ist ohne eine Vorerwärmung des Kaltwassers nicht möglich.

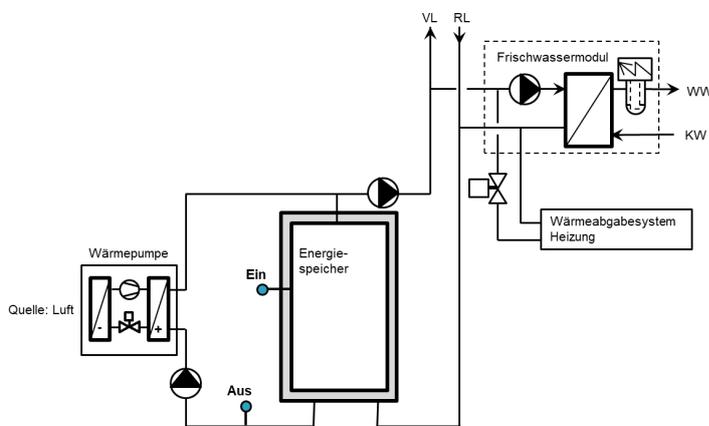


Abbildung 5: Vereinfachte Darstellung der Varianten C «dezentrale FWM-Booster ausgehend von Heizwärmeverteilung»

2.3.4 Variante D: Spültisch-Instantan-Elektroerwärmer (SIE)

Vor allem für die Küche gibt es Instantan-Elektropatronen (z. Bsp. «Quooker») welche Heisswasser auch bis 90 °C zur Verfügung stellen können. Dieses kann ab Warmwasser zentral (> 50 °C) oder auch ausgehend von der Kaltwasserverteilung erwärmt werden. Für diese Spültisch-Instantan-Elektrowärmer (SIE) wird ein typischer Bedarf für Warmwasser in der Küche (Kochen, Spülen, Händewaschen) angenommen. Es wird berechnet, wie gross die Differenz elektrischer Energie sein kann gegenüber den Referenz-Warmwassererwärmungen in Kombination mit Glaskeramik oder Induktionsherd zum Erhitzen von Wasser zum Kochen. Dies für zwei Varianten:

Kalt: Instantan-Erwärmung ab Kaltwasser (10 °C)

Warm: Instantan-Erwärmung ab Warmwasser (50 °C)

3 Methodik und Berechnungen

Für jede untersuchte Variante wird die Auswirkung auf den Bedarf an elektrischer Energie ermittelt, und dem Bedarf der Referenzsysteme gegenübergestellt. Da die meisten Systeme eine jahreszeitliche Abhängigkeit zeigen, wird ein Wintermonat (Januar) sowie ein Sommermonat (Juli) berechnet. Auf die Ausweisung eines Jahrestotals wird verzichtet, da die Herausforderung der Energiewende hauptsächlich in der Deckung der Winterlücke von Januar bis März liegen. Weiter wird der Monat Juli als Vergleich zum Monat Januar berücksichtigt und sich als Monat mit zukünftig erhöhtem Kühlbedarf aufgrund des Klimawandels anbietet.

3.1 Wärmebilanz

Ausgehend von dem in Abschnitt 2.1 beschriebenen Referenzgebäude werden die jeweiligen Wärmeverluste (Speicher- sowie Verteil- und Ausstosswärmeverluste) berechnet. Für die Berechnungen der verschiedenen Systeme, inklusive der Referenzsysteme, werden dann die jeweils anfallenden Teilergebnisse verwendet.

3.1.1 Speicherwärmeverluste

Die Speicherwärmeverluste werden gemäss Norm prSIA 385/2:2023 berechnet:

$$Q = 0.11 \cdot \sqrt{V} + 0.1 \cdot (x - 2)$$

Wobei Q die Wärmeverluste in kWh pro Tag, V das Speichervolumen in Liter und x die Anzahl Wasser führender Stutzen sind.

Für die Berechnung der Speicherwärmeverluste des zentralen Systems werden je drei Anschlüsse pro Speicher (x = 3) eingerechnet (die beiden Kaltwasser-Anschlüsse von Speicher TWW2 werden nur halb gezählt). Damit resultieren 2.79 kWh Wärmeverluste pro Speicher und Tag, respektive 5.58 kWh/d insgesamt 2'040 kWh pro Jahr oder **12 % des Nutzwarmwasserbedarfs** entspricht.

Die Speicherwärmeverluste für sechs dezentrale Speichereinheiten von 220 Liter Volumen mit je vier Anschlüssen (davon zwei im warmgehaltenen Teil) belaufen sich auf Total 3'573 kWh pro Jahr, was **21 % des Nutzwarmwasserbedarfs** entspricht.

3.1.2 Wärmeverluste der warmgehaltenen Leitungen

Die Leitungslängen für die zentralen Warmwassersysteme wurden aus den Gebäude-dimensionen abgeleitet. Daraus resultieren die in Tabelle 3 dargestellten Ergebnisse. Die damit einhergehenden Wärmeverluste wurden auf Grund der Norm prSIA385/2:2023 berechnet.

Die Wärmeverluste der warmgehaltenen Leitungen belaufen sich somit auf **17 % des Nutzwarmwasserbedarfs bei Zirkulation** und auf **13 % bei Anwendung eines Warmhaltebandes**.

Tabelle 3: Wärmeverluste der warmgehaltenen Leitungen gemäss Norm prSIA 385/2:2023.

		Vorlauf	Rücklauf	Total
Warmhaltung über Zirkulation				
Länge	[m]	32	32	64
Verlustkoeffizient gem. SIA ^{a)}	[kWh/(m•d)]	0.12	0.12	
Temperatur Medium	[°C]	60	55	
Temperatur Umgebung	[°C]	15	15	
Wärmeverlust pro Tag	[kWh]	4.32	3.84	8.16
Wärmeverluste pro Jahr	[kWh]			2978
In % des Nutzwarmwasserbedarfs				17 %
Warmhaltung über Warmhalteband				
Länge	[m]	32		32
ID	[m]	0.044		
Verlustkoeffizient gem. SIA ^{a)}	[kWh/(m•d)]	0.17		
Temperatur Medium	[°C]	60		
Temperatur Umgebung	[°C]	15		
Wärmeverlust pro Tag	[kWh]	6.12		6.12
Wärmeverluste pro Jahr	[kWh]			2'234
In % des Nutzwarmwasserbedarfs				13 %

a) gemäss Norm prSIA 385/2:2023, für delta-T 40 K.

3.1.3 Ausstosswärmeverluste

Die Ausstosswärmeverluste werden gemäss Norm prSIA 385/2:2023 berechnet:

$$n_{em,i} = 2 + 5 \times n_{p,i}$$
$$Q_{W,em,ls} = n_{em,i} \times Q_{W,em,ls,ind,i}$$

Die Wärmeverluste der Ausstossleitungen einer Warmwasserversorgung ergeben sich aus der Anzahl Warmwasserentnahmen und den Ausstosswärmeverlusten pro Warmwasserentnahme.

Damit resultieren 10.3 kWh Ausstosswärmeverluste pro Tag insgesamt 3'749 kWh pro Jahr oder **22 % des Nutzwarmwasserbedarfs**.

Tabelle 4: Wärmeverluste der Ausstossleitungen gemäss Norm prSIA 385/2:2023.

		Pro Wohneinheit	Total
Anzahl Warmwasserentnahmen	[d ⁻¹]	17	102
Ausstosswärmeverluste pro Tag	[kWh]	1.7	10.3
Ausstosswärmeverluste pro Jahr	[kWh]		3'749
In % des Nutzwarmwasserbedarfs			22 %

3.1.4 Wärmeverluste von Heizungsleitungen

Die Wärmeverluste der Heizungsleitungen sind relevant für Variante C «FWM-Booster», welche, bedingt durch eine limitierte elektrische Leistung des Elektroheizeinsatzes, auch im Sommer eine Vorwärmung des Kaltwassers benötigen. Die Wärmeabgabe der Rohre wird berechnet nach:

$$Q = \frac{2\pi L(t_i - t_o)}{\left[\frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{k} + \frac{\ln\left(\frac{r_s}{r_o}\right)}{k_s} \right]}$$

Q = Wärmeabgabe der Heizungsleitungen [W]

k = Wärmeleitfähigkeit des Leitungsmaterials [W/(m•K)]

k_s = Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes [W/(m•K)]

L = Länge des Zylinders oder Leitung [m]

r_o = Aussenradius der Leitung [m]

r_i = Innenradius der Leitung [m]

r_s = Aussenradius der Dämmung [m]

t_o = Temperatur ausserhalb der Leitung [K]

t_i = Temperatur innerhalb der Leitung [K]

3.1.5 Zusammenfassung Wärmebilanz

Zusammengefasst ist der Wärmebedarf der Referenz-Systeme in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Wärmebilanz der verschiedenen Referenz-Warmwassersysteme.

	Einheit	Ref-Z-Zirk	Ref-Z-Heizb	Ref-Dez
Wärmebilanz				
Nutzwarmwasserbedarf	[kWh/a]	17'263	17'263	17'263
Speicherwärmeverluste	[kWh/a]	2'040	2'040	3'573
Wärmeverluste von warmgehaltenen Leitungen	[kWh/a]	2'978	2'234	0
Ausstosswärmeverluste	[kWh/a]	3'749	3'749	3'749
Total Wärmebedarf der Warmwasserversorgung	[kWh/a]	26'030	25'286	24'585

Z = zentrale Warmwasseraufbereitung, Dez = dezentrale Warmwasseraufbereitung, Zirk = Zirkulation zur Warmhaltung, Heizb = Heizband (Warmhalteband) zur Warmhaltung.

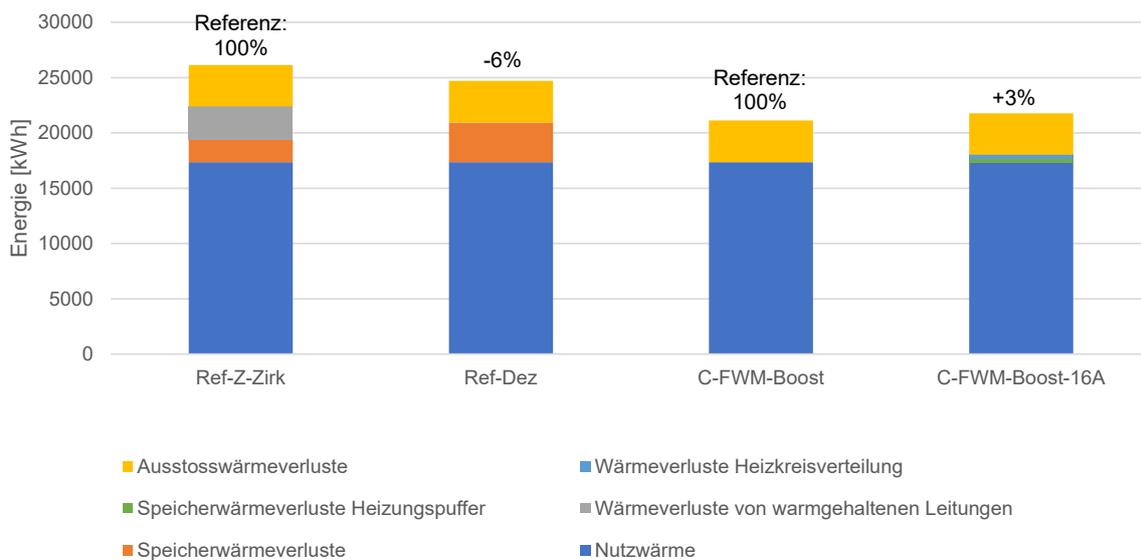


Abbildung 6: Wärmebilanz mit Nutzwarmwasserbedarf und Wärmeverlusten für die verschiedenen Varianten.¹

¹ Bemerkung zur Variante FWM-Boost: Die Wärmeverluste Heizkreisverteilung und Heizungspuffer werden nur dann der Warmwasserversorgung zugeschlagen, wenn kein Heizwärmebedarf besteht und gleichzeitig eine Vorwärmung des Frischwassers für FWM-Booster nötig ist.

3.2 Berechnung des elektrischen Aufwandes der Wärmepumpen

Für die Berechnung des elektrischen Aufwandes der Luft/Wasser Wärmepumpen wird ein Carnot-Modell verwendet, das auch die verwendeten Wärmeübertrager berücksichtigt (Annex B). Der Gütegrad der WP (η_{HP}) wird mit 0.45 angenommen, die Temperaturdifferenz der Wärmeübertrager (Kältemittelkreis zu Wärmeträgerkreis und Wärmeträgerkreis zu Trinkwarmwasserkreis, $\Delta T_{HP,HX}$) mit 5 K. Zur Bestimmung der Quelltemperatur wird auf Tagesbasis jeweils die mittlere Aussentemperatur verwendet.

$$COP = \eta_{HP} \cdot \eta_{Carnot,HP}$$

Die Arbeitszahl der Wärmepumpe wird für zwei Bilanzierungsgrenzen bestimmt: Für die Wärmepumpe alleine (abgegebene Wärme an Warmwasserversorgung / zugeführte elektrische Energie) und für das System (Nutzwarmwasserbedarf / zugeführte elektrische Energie). Dabei wird auch die Temperaturdifferenz zwischen dem Heizkreis und dem Trinkwasser berücksichtigt wird.

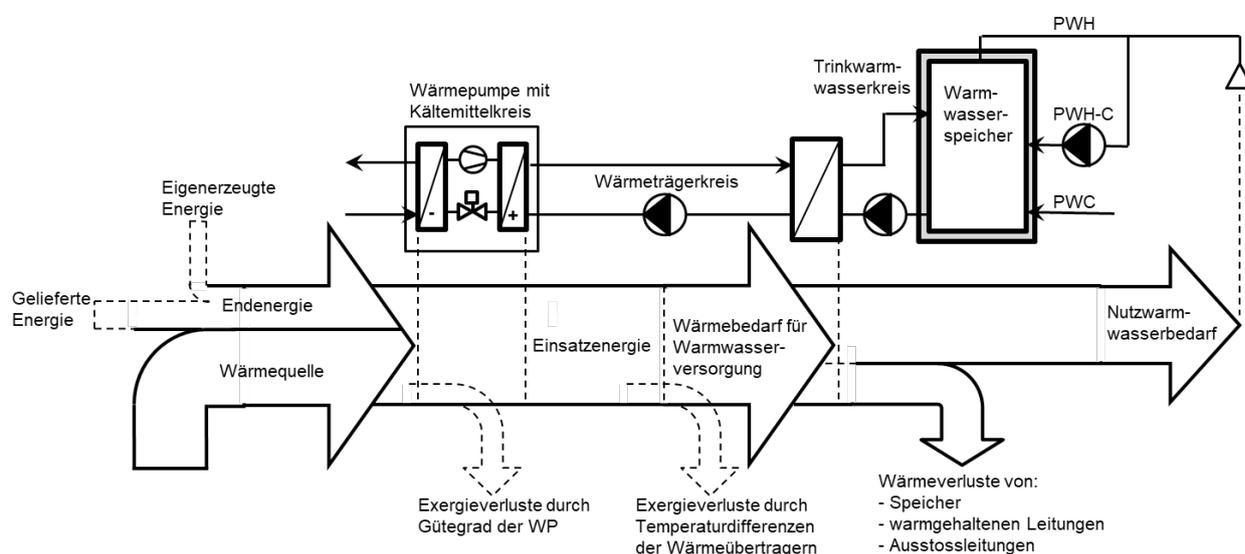


Abbildung 7: Energieflussdiagramm, PWH = Potable Water Hot, PWH-C = Potable Water Hot Circulation, PWC = Potable Water Cold.

Für die zu liefernde Temperatur der Wärmepumpe werden verschiedene Annahmen und Berechnungen verwendet.

Für die Warmwassersysteme wird mit folgenden Annahmen gearbeitet:

- **Ref-Z-Zirk-HTWP:** Die Zirkulationswärmeverluste fallen ausschliesslich in einem Temperaturbereich von 55 bis 60 °C an und werden durch die Wärmepumpe mit entsprechendem COP gedeckt.
- **Ref-Z-Zirk-NTWP:** In einer zusätzlichen Variante wird mit einer WP gerechnet, die keine genügend hohe Vorlauftemperatur liefert, um die Solltemperatur von 60 °C im Speicher zu erreichen. In diesem Fall wird ein Elektroheizeinsatz verwendet, um die fehlende Temperaturdifferenz zu decken.
- **Ref-Z-Heizb:** Die Wärmeverluste einer mit Warmhalteband warm gehaltenen Leitung werden (nach Norm prSIA 385/2:2023) zu 1/3 gedeckt durch Wärme aus dem Speicher, und zu 2/3 direkt durch das Warmhalteband, also direkt-elektrisch.

- **Ref-Dez:** Die dezentralen Systeme verfügen über keine Warmhaltung der Warmwasserverteilung, und die Solltemperatur im WW-Speicher beträgt 55 °C, also 5 K weniger als bei den zentralen Systemen, wo mit 60 °C gerechnet wird.

Die Speicherwärmeverluste und die Ausstosswärmeverluste erhöhen die Menge Warmwasser die zur Verfügung gestellt werden muss. Auch die 1/3 thermisch gedeckten Wärmeverluste bei Warmhalteband führen zu einer Erhöhung der Wärmemenge, die ab Speicher zur Verfügung gestellt wird. Diese gesamte Wärmemenge wird mit einer Luft/Wasser-WP gedeckt.

Die mittlere Ladetemperatur der WP zum Erreichen der entsprechenden Speichertemperaturen (Tabelle 6) wurde aus Messdaten des Projektes DHWstrat abgeleitet [3].

Tabelle 6: Mittlere Vorlauftemperatur der Niedertemperatur-Wärmepumpe (NTWP) zum Erreichen der Solltemperatur in den dezentralen Systemen und im zentralen Referenzsystem.

$T_{\text{Speicher,Soll}}$ [°C]	$\overline{T}_{\text{VL,WP}}$ [°C]
55	47
60	52

3.3 Solartermische Wassererwärmung (A: ST+EI)

Thermische Solarkollektoren liefern immer dann Wärme, wenn Solarstrahlung zur Verfügung steht. Limitiert ist die Wärmelieferung durch die Intensität der Solarstrahlung sowie die Speicherkapazität der thermischen Speicher. Eine Überdimensionierung der Anlage führt zu häufiger Stagnation im Sommer und damit zu einem tieferen Wirkungsgrad der Umwandlung von Solarstrahlung in Wärme. Es muss also ein ausgewogener Kompromiss zwischen solar bereitgestellter Wärme und solarem Deckungsgrad gefunden werden. Für die in diesem Bericht berechnete Anlage wurde ein Kollektorfeld von 34 m² angenommen, was zu einem Warmwasser-Deckungsgrad von etwa 65 % führt. Bei einer so dimensionierten Anlage kann mit Standardkollektoren von einem mittleren Wirkungsgrad von 45 % ausgegangen werden.

3.4 PV-Strom Beiträge an Elektro-Warmwasser (B: PV+EI)

Die Berechnung des PV-Ertrages erfolgt in vereinfachter Form über die Strahlungssumme pro Monat und einer vereinfacht konstanten Effizienz. Es werden zwei Ausrichtungen der PV-Anlage gerechnet: eine 45° Südausrichtung sowie eine 15° Ost/West-Ausrichtung. Die weiteren Kennwerte sind in Tabelle 7 aufgelistet:

Tabelle 7: Kennwerte der berechneten PV-Anlage.

Dachfläche	[m ²]	360
Effizienz der PV-Module	[%]	20
Effizienz des Wechselrichters	[%]	94
Fläche (PV-Module)	[m ²]	140
Leistung der PV-Anlage	[kWp]	28

Zur Berechnung allfälliger Beiträge zur Wassererwärmung durch Photovoltaik wird der Bedarf an elektrischer Energie vor Ort in Abzug zum PV-Ertrag gebracht. Für den Bedarf an elektrischer Energie vor Ort werden folgende Varianten berechnet:

- A) Es wird nur der Haushaltsstrom abgezogen, ohne Betrieb allfälliger Wärmepumpen oder Elektrofahrzeuge
- B) Zusätzlich zu den Abzügen von A wird davon ausgegangen, dass pro Wohneinheit ein Elektromobil mit 12'000 km Fahrleistung pro Jahr in Abzug gebracht werden muss (15 kWh pro 100 km).

Der jeweils nach Abzug von A und B verbleibende PV-Ertrag steht für die Wassererwärmung zur Verfügung. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich die Erträge entweder direkt verwenden oder kurzfristig in Batterien speichern lassen innerhalb von Monatsfrist, was eine relativ optimistische Annahme ist.

3.5 Berechnung der dezentralen FWM-Booster (C: FWM-Boost)

3.5.1 Begrenzung der elektrischen Leistung

Die dezentralen FWM-Booster werden jeweils in zwei Varianten gerechnet. Die Basisvariante "FWM-Boost" liefert eine Vorwärmung über die Heizungswärmeverteilung nur zu Zeiten mit aktiver Raumheizung, also während der Heizperiode. Ausserhalb der Heizperiode muss eine genügend hohe elektrische Leistung für den Elektroheizeinsatz installiert sein, um die geforderte Austrittstemperatur von 52 °C zu erreichen. Die Subvariante «FWM-Boost 16A» wird jeweils mit einer Begrenzung von 16 A pro Phase gerechnet. Damit stehen insgesamt 11 kW für den Booster zur Verfügung, was nicht ausreicht um ausgehend von der Kaltwassertemperatur die Solltemperatur zu erreichen. Deshalb muss die Heizwärmeverteilung auch ausserhalb der Heizperiode die geforderten Temperaturen liefern.

3.5.2 Vorwärmung des Kaltwassers

Zur Vorwärmung bei dezentralen FWM-Boostern wird die Wärmeverteilung für die Raumheizung auf Tagesbasis berechnet. Die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe wird aufgrund der Heizkurve für den Fall Fussbodenheizung und Radiatoren mit einer Raumsolltemperatur von 24 °C bestimmt. Die Heizgrenze liegt bei 16 °C. Der Heizkörperexponent für die Fussbodenheizung mit 35/30 °C Auslegetemperatur bei 1.1, für Radiatoren mit 50/40 °C bei 1.4.

Die Vorwärmung des Kaltwassers mittels Wärmeübertrager wird vereinfacht mit 85 % der Temperaturdifferenz zwischen dem Vorlauf der Heizwärmeverteilung und dem Kaltwasser bestimmt (Effektivität der Wärmeübertragung). Dies entspricht einer Temperaturdifferenz von ca. 3 K.

Mit einer Kaltwasser-Vorwärmung auf 28 °C genügt die elektrische Leistung von 11 kW (3 x 16 A), um einen Volumenstrom von 390 L/h auf 52 °C zu erwärmen. Damit wird unter Beimischung von 210 L/h Kaltwasser (10 °C) ein Volumenstrom von 600 L/h und eine Mischtemperatur von 38 °C erreicht. Um die 28 °C Vorwärmung zu erreichen, ist eine Vorlauftemperatur der Heizwärmeverteilung von mindestens 31 °C nötig.

Zum Erreichen eines Volumenstroms von 600 L/h mit einer Temperatur von 52 °C ist eine Kaltwasser-Vorwärmung auf mindestens 36 °C notwendig, wozu die Vorlauftemperatur der Heizwärmeverteilung mindestens 39 °C betragen muss.

In Abbildung 8 ist die Vorlauftemperatur der Heizwärmeverteilung bei Auslegung auf 35/30 °C (Fussbodenheizung) und 50/40 °C (Radiatoren) gezeigt. Blau und Orange sind die Temperaturen dargestellt, die nötig sind um mit einer auf 11 kW begrenzten elektrischer Leistung des Elektroheizeinsatzes die notwendige Vorwärmung des Kaltwassers zu erreichen für die beschriebenen Annahmen.

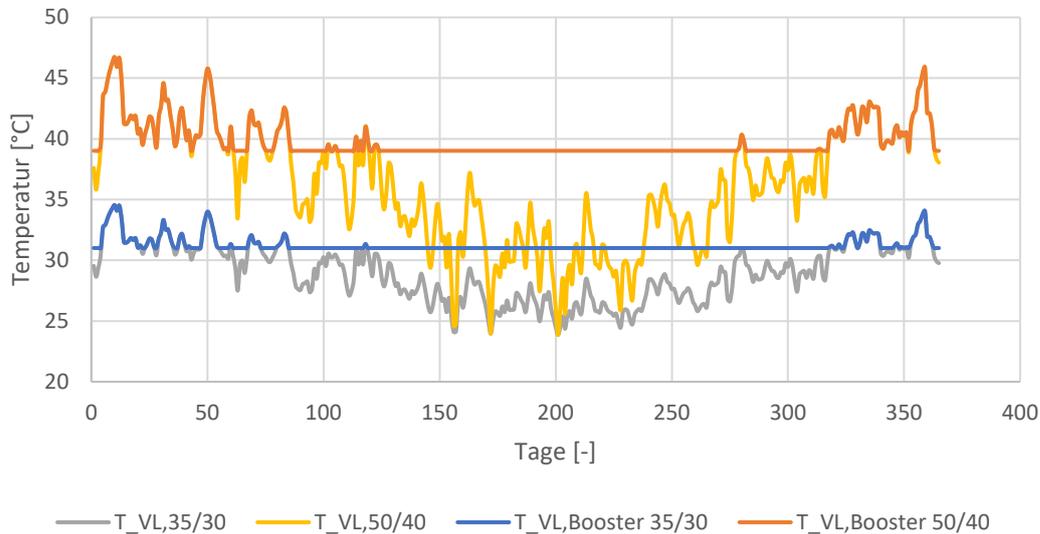


Abbildung 8: Variante C FWM-Boost mit Begrenzung auf 16A: Vorlauftemperatur der Raumheizung bei Auslegung auf 35/30 °C (Fussbodenheizung) und 50/40 °C (Radiatoren). Blau und Orange sind die Temperaturen dargestellt, die nötig sind um mit einer auf 11 kW begrenzten elektrischer Leistung des Elektroheizeinsatzes im Booster die notwendige Vorwärmung des Kaltwassers zu erreichen.

3.5.3 Nutzwarmwasserbedarf und Wärmeverluste

Im Fall des FWM-Boosters entfallen die Speicher- sowie die Zirkulationswärmeverluste. Die Ausstosswärmeverluste bleiben unverändert. Für die Berechnung der FWM-Booster mit begrenzter elektrischer Leistung (Variante C mit Begrenzung auf 16 A) muss die Heizwärmeverteilung auch ausserhalb der Heizperiode aktiviert sein. Die dann anfallenden Wärmeverluste der Heizwärmeverteilung und des Pufferspeichers, bzw. die nötige elektrische Energie zur Deckung dieser Wärmeverluste, wird der Warmwasserbereitung zugeschlagen.

Zusätzliche Verluste entstehen in der Übergangszeit bedingt durch die notwendige Anhebung der Solltemperatur für die Raumheizung mit entsprechender Verschlechterung der Arbeitszahl der Wärmepumpe. Diese Differenz ist im vorliegenden Bericht nicht näher beziffert.

3.6 Spültisch-Instantan-Elektrowassererwärmer (D: SIE)

Für eine Abschätzung des Einflusses von Instantan-Elektrowassererwärmern auf den gesamten elektrischen Energiebedarf für die Wassererwärmung sind zusätzliche Annahmen zu den gängigen Warmwasser-Bezugsprofilen nötig, da diese die Warmwasser-Entnahmen nicht auf den jeweiligen Einsatzort (Küche, Bad, etc.) aufschlüsseln. Für diese Annahmen wurden verschiedene Quellen verwendet, um den Warmwasser-Verbrauch in der Küche sowie den Wasserverbrauch zum Kochen zu ermitteln.

Laut Sicre et. al. [4] beträgt der Wasserverbrauch in der Küche (kalt und warm) im Median 22 L pro Person und Tag. In einem Artikel von Freiburghaus [5] wird der Wasserverbrauch mit 21 L/E*d angegeben. Laut persönlicher Kommunikation [6] sind davon 13.3 L/E*d Warmwasser. Die Trinkwasserverwendung zum Kochen wird durch die Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach [7] mit 2 l/Tag angegeben.

Bei einem Anschluss des Instantan-Elektrowassererwärmers an das Kaltwasser werden die Ausstosswärmeverluste in der Küche vermieden. Diese betragen 1.11 kWh pro Tag und Wohnung, und somit im untersuchten Gebäude 6.64 kWh/d. Als Berechnungsgrundlage für die Ausstosswärmeverluste wurde auf die SIA 385/2:2015 abgestützt mit einer Leitungslänge von 9 m und einem Durchmesser von 16 mm, bei einer Belegungsdichte von 3.02 Personen pro Wohnung.

Bei einem Anschluss an Kalt- und Warmwasser entfällt der Vorteil der Vermeidung von Ausstosswärmeverlusten. Während eines Bezugs von Warmwasser wird zunächst kaltes Wasser ab Leitung in den Instantan-Elektrowassererwärmers geführt.

Der Stand-by-Verbrauch eines Gerätes mit 7 l warmgehaltenem Volumen wird mit 10 W angegeben, entsprechend resultieren 0.24 kWh Wärmeverluste pro Tag. Die Berechnung der Wärmeverluste eines gleichgrossen Behälters nach prSIA 385/2:2023 würde einen Verlust von 0.19 kWh/d ergeben. Unter Berücksichtigung der höheren Vorhaltetemperatur der Geräte erscheint die Herstellerangabe plausibel und wird so in den Berechnungen übernommen.

Bei der Substitution des Stromverbrauches zum Erhitzen von Wasser bis zum Siedepunkt beim Kochen wird ein Effizienzvorteil der Instantan-Elektrowassererwärmung von 25 % gegenüber dem Erwärmen im Kochtopf angenommen [8].

Tabelle 8: Jährlicher Wärmebedarf für Warmwasser in der Küche und Wassererwärmung beim Kochen.

Nutzwarmwasserbedarf am Spültisch	[kWh/a]	5'073
Ausstosswärmeverluste am Spültisch	[kWh/a]	2'424
Elektrische Energie für Wassererwärmung zum Kochen	[kWh _{el} /a]	1'373

4 Resultate

Im Folgenden werden die Ergebnisse für das Referenzsystem sowie für die Varianten Solarthermie, PV-Elektroheizeinsatz und FWM-Booster exemplarisch für die Monate Januar (Winter) und Juli (Sommer) dargestellt. Da sich die Instantan-Wassererwärmung (SIE) nur auf die Küche beschränkt, diese kaum eine saisonale Abhängigkeit aufweist und keine solarthermische oder photovoltaische Deckung ausgewiesen wird, wird für diese Variante der Jahresbedarf dargestellt.

4.1 Referenzsystem und Wärmebedarf (Ref)

Tabelle 9 zeigt den Nutzwarmwasserbedarf und den Wärmebedarf der Warmwasserversorgung der Referenzsysteme im gewählten MFH.

Tabelle 9: Nutzwarmwasserbedarf und Wärmebedarf der Warmwasserversorgung (inkl. Wärmeverluste) im Januar und Juli.

		Januar	Juli
Nutzwarmwasserbedarf (ohne Wärmeverluste)	[kWh]	1'564	1'334
Wärmebedarf der Warmwasserversorgung im System Ref-Z-Zirk (inkl. Verluste)	[kWh]	2'310	2'080
Wärmebedarf der Warmwasserversorgung im System Ref-Z-Heizb (inkl. Verluste)	[kWh]	2'246	2'016
Wärmebedarf der Warmwasserversorgung im System Ref-Dez (inkl. Verluste)	[kWh]	2'186	1'957

Tabelle 10 und Abbildung 9 zeigen den elektrischen Energiebedarf für die Wassererwärmung des Referenzsystems im Januar und Juli. Zusätzlich ist der Bedarf an elektrischer Energie für Haushaltsstrom und E-Mobilität des Gebäudes, bzw. der Personen im Gebäude zu sehen.

Tabelle 10: Elektrischer Energiebedarf für die Wassererwärmung der Referenzsysteme im Januar und Juli.

Referenzsystem		Januar	Juli
Ref-Z-Zirk HTWP (für WP und Umwälzpumpe)	[kWh _{el}]	910	567
Ref-Z-Zirk NTWP (für WP, Elektro-Nacherwärmung und Umwälzpumpe)	[kWh _{el}]	1'050	737
Ref-Z-Heib (für WP + Warmhalteband)	[kWh _{el}]	948	627
Ref-Dez (für WP)	[kWh _{el}]	785	458
Haushaltsstrom	[kWh _{el}]	1'350	1'262
Elektrische Energie E-Mobilität	[kWh _{el}]	917	917

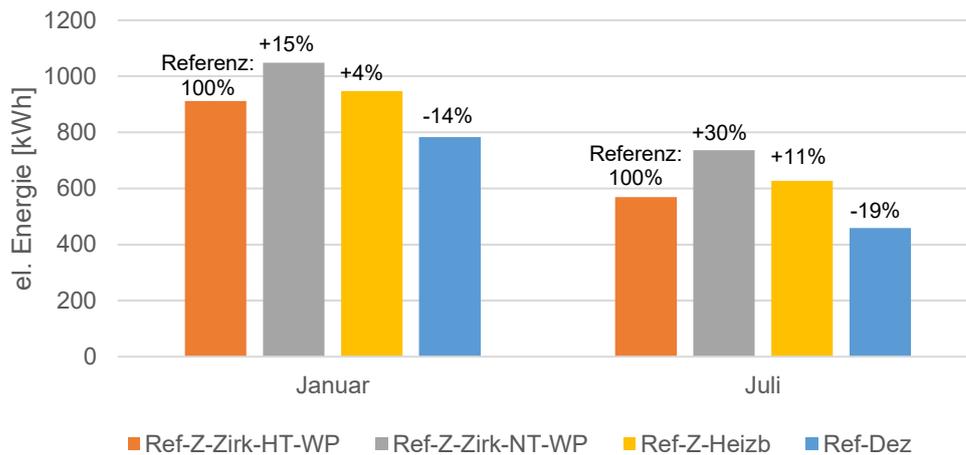


Abbildung 9: Elektrischer Energiebedarf für die Wassererwärmung der Referenzsysteme im Januar und Juli.

Tabelle 11 zeigt die Arbeitszahl zur Warmwasserbereitung der Referenzsysteme im Januar und Juli.

Tabelle 11: Arbeitszahl zur Warmwasserbereitung der Referenzsysteme im Januar und Juli.

Arbeitszahl System		Januar	Juli
Ref-Z-Zirk-HTWP (zentral mit Zirkulation)	-	1.7	2.4
Ref-Z-Zirk-NTWP (Elektro-Nacherwärmung)	-	1.5	1.8
Ref-Z-Heizb (zentral mit Warmhalteband)	-	1.6	2.1
Ref-Dez	-	2.0	2.9
Arbeitszahl Wärmepumpe			
Ref-Z-Zirk-HTWP (zentral mit Zirkulation)	-	2.5	3.7
Ref-Z-Zirk-NTWP (Elektro-Nacherwärmung)	-	2.6	3.8
Ref-Z-Heizb (zentral mit Warmhalteband)	-	2.6	3.8
Ref-Dez	-	2.8	4.3

4.2 Solarthermie mit Elektroheizeinsatz (A: ST+EI)

Der elektrische Energiebedarf für die Wassererwärmung eines zentralen Systems mit Solaranlage und Elektroheizeinsatz zur Deckung des Wärmebedarfes (ohne zusätzlichen Wärmeerzeuger) entsprechend dem Referenz-Gebäude "Zentral" mit Zirkulation ist in Tabelle 12 und Abbildung 10 zu sehen.

Tabelle 12: Variante A: Elektrischer Energiebedarf für die Wassererwärmung eines zentralen Systems mit thermischer Solaranlage und Elektroheizeinsatz.

Thermische Solaranlage		Januar	Juli
Kollektorertrag (= thermische Energie)	[kWh]	653	2'352
Elektroheizeinsatz (= elektrische Energie)	[kWh _{el}]	1'657	0
Wärmebedarf für Warmwasserversorgung (Z-Zirk-HTWP)	[kWh]	2'310	2'080
Elektrischer Energiebedarf Referenz (Ref-Z-Zirk-HTWP)	[kWh _{el}]	910	567

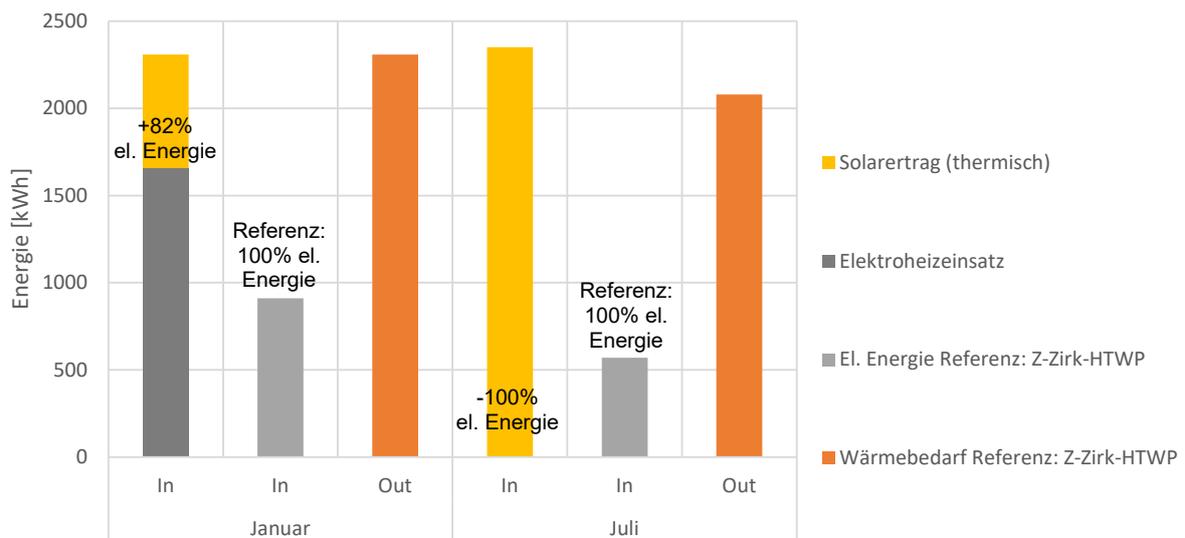


Abbildung 10: Elektrischer Energiebedarf für die Warmwasserversorgung inklusive Wärmeverluste eines zentralen Systems mit thermischer Solaranlage und Elektroheizeinsatz.

4.3 Photovoltaik mit Elektroheizeinsatz (B: PV+EI)

Tabelle 13 zeigt den PV-Ertrag der verschiedenen Systeme mit Ost-West Ausrichtung sowie mit 45° Süd Ausrichtung, sowie den verbleibenden PV-Beitrag nach der Deckung von Haushaltsstrom sowie nach Deckung von Haushaltsstrom und Elektromobilität (vgl. 2.3.2 und 3.4).

Der elektrische Energiebedarf für die direkt elektrische Wassererwärmung eines zentralen Systems mit Warmhalteband sowie dezentraler Systeme sind in Tabelle 14 und Abbildung 11 zu sehen. Im Januar ist der PV-Beitrag an die Wassererwärmung auf Grund der Priorisierung von Haushaltsstrom (vgl. Kapitel 2.3.2) jeweils gleich Null und deshalb der verbleibende elektrische Energiebedarf für Warmwasser unabhängig von der Ausrichtung der PV-Anlage.

Tabelle 13: PV-Ertrag bei verschiedener Ausrichtung der PV-Anlage, sowie verfügbarer Ertrag nach Abzug Haushaltsstrom (HH) und Strom für Elektromobilität (E-Mob).

		Januar	Juli
PV-Ertrag, 15° Ost/West (O/W)	[kWh _{el}]	662	3'995
PV-Ertrag, 45° Süd	[kWh _{el}]	1'043	3'762
Verfügbar nach Abzug Haushaltsstrom (O/W)	[kWh _{el}]	0	2'733
Verfügbar nach Abzug Haushaltsstrom (Süd)	[kWh _{el}]	0	2'500
Verfügbar nach Abzug HH und E-Mob (O/W)	[kWh _{el}]	0	1'816
Verfügbar nach Abzug HH und E-Mob (Süd)	[kWh _{el}]	0	1'583

Tabelle 14: Strombedarf (Netzbezug) zur Warmwasserbereitung mit PV und Elektroheizeinsatz.

		Januar	Juli
Zentral mit Warmhalteband (Ref-Z-Heizb)			
elektrische Energie Warmwasser gesamt (mit Elektroheizeinsatz)	[kWh _{el}]	2'246	2'016
davon Netzbezug bei 15° Ost/West (PV für HH und E-Mob)	[kWh _{el}]	2'246	200
davon Netzbezug bei 45° Süd (PV für HH und E-Mob)	[kWh _{el}]	2'246	433
Dezentral (Ref-Dez)			
elektrische Energie Warmwasser gesamt (mit Elektroheizeinsatz)	[kWh _{el}]	2'186	1957
davon Netzbezug bei 15° Ost/West (PV für HH und E-Mob)	[kWh _{el}]	2'186	141
davon Netzbezug bei 45° Süd (PV für HH und E-Mob)	[kWh _{el}]	2'186	374

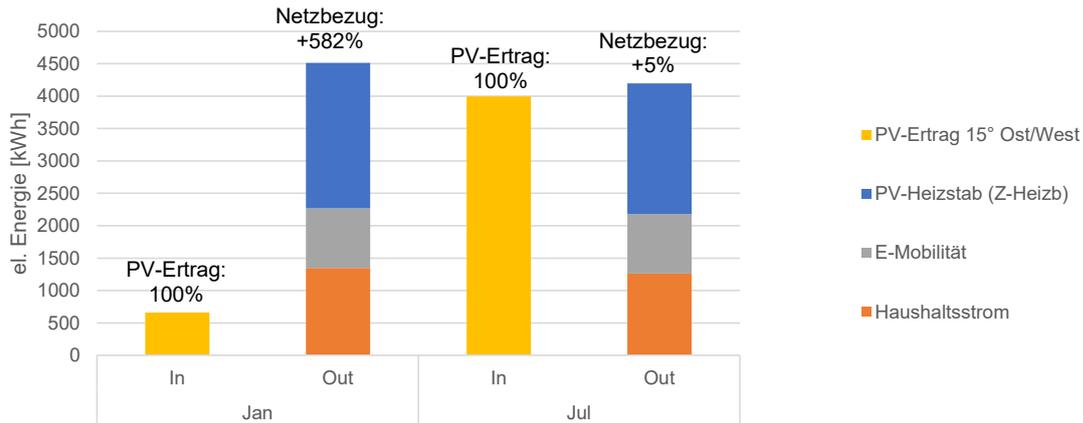


Abbildung 11: Strombedarf zur Warmwasserbereitung mit PV und Elektroheizeinsatz eines zentralen Systems.

4.4 FWM-Booster ab Raumheizverteilung (C: FWM-Boost)

Der elektrische Energiebedarf für die Wassererwärmung von dezentralen FWM-Boostern mit verschiedenen Vorlauftemperaturen in der Heizverteilung ist in Abbildung 12 und in Tabelle 15 bis Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 15: Dezentrale FWM-Booster mit Heizwärmeverteilung bei 35/30 °C.

FWM-Booster 35/30		Januar	Juli
Vorwärmung (thermische Energie)	[kWh]	835	0
elektrische Energie zur Vorwärmung per WP	[kWh _{el}]	252	0
elektrische Energie direkt elektrisch	[kWh _{el}]	1'048	1'643
elektrische Energie Total	[kWh_{el}]	1'300	1'643

Tabelle 16: Dezentrale FWM-Booster mit Heizwärmeverteilung bei 35/30 °C und begrenzter elektrische Leistung.

FWM-Booster 35/30 16A		Januar	Juli
Vorwärmung (thermische Energie)	[kWh]	844	703
elektrische Energie zur Vorwärmung per WP	[kWh _{el}]	255	139
elektrische Energie zur Deckung der Verteilverluste	[kWh _{el}]	0	24
elektrische Energie direkt elektrisch	[kWh _{el}]	1'039	951
elektrische Energie Total	[kWh_{el}]	1'294	1'114

Tabelle 17: Dezentrale FWM-Booster mit Heizwärmeverteilung bei 50/40 °C.

FWM-Booster 50/40		Januar	Juli
Vorwärmung (thermische Energie)	[kWh]	1'219	0
elektrische Energie zur Vorwärmung per WP	[kWh _{el}]	442	0
elektrische Energie direkt elektrisch	[kWh _{el}]	664	1'653
elektrische Energie Total	[kWh_{el}]	1'106	1'653

Tabelle 18: Dezentrale FWM-Booster mit Heizwärmeverteilung bei 50/40 °C und begrenzter elektrischer Leistung.

FWM-Booster 50/40 16A		Januar	Juli
Vorwärmung (thermische Energie)	[kWh]	1'219	970
elektrische Energie zur Vorwärmung per WP	[kWh _{el}]	442	156
elektrische Energie zur Deckung der Verteilverluste	[kWh _{el}]	0	29
elektrische Energie direkt elektrisch	[kWh _{el}]	664	683
elektrische Energie Total	[kWh_{el}]	1'106	868

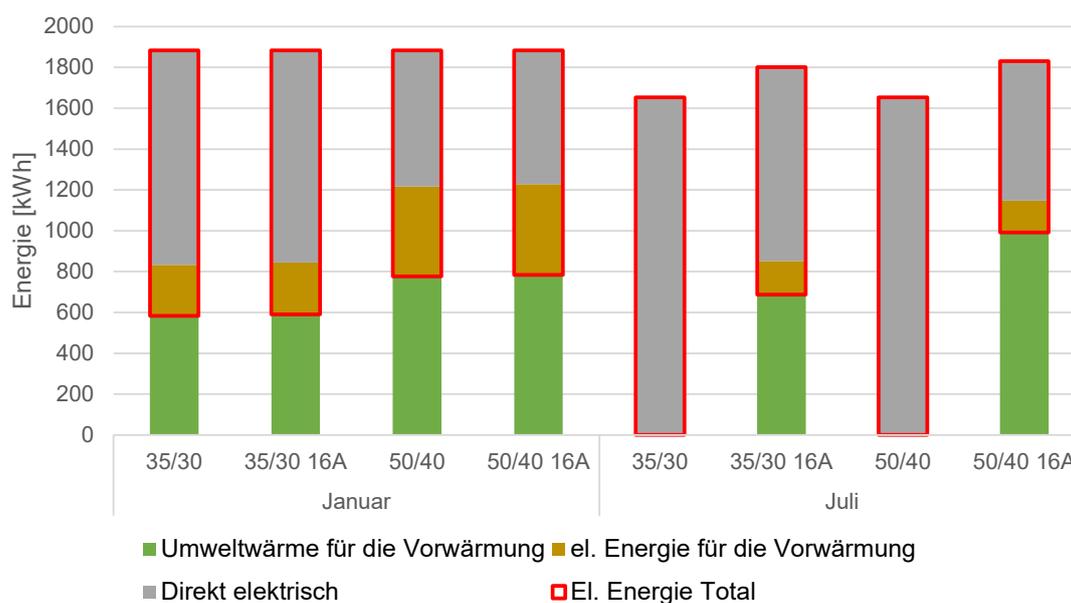


Abbildung 12: FWM-Booster mit verschiedenen Temperaturen in der Heizwärmeverteilung. Aufteilung auf Umweltwärme, elektrische Energie der WP für die Vorwärmung und Anteil direkt elektrisch.

Im Januar ist zwischen den Varianten 35/30 und 35/30 16A kaum ein Unterschied auszumachen. Dies deshalb, weil der Heizkreis sowieso in Betrieb ist und deshalb dessen Wärmeverluste nicht zu Lasten des Warmwassers gehen. Durch die Vorwärmung ab Raumheizkreis ist die elektrische Nachheizung mit 16 A ausreichend, um die Soll-Temperatur von 52 °C ab FWM zu erreichen.

Im Juli hingegen besteht ein deutlicher Unterschied: Bei Varianten ohne Leistungsbegrenzung der Nacherwärmung können diese die gesamte Wärme liefern, und die Raumwärmeverteilung kann deshalb in den Sommermonaten abgestellt werden. Dies führt zu insgesamt weniger Wärmebedarf, da die Verteilwärmeverluste wegfallen, jedoch fehlt hier der Eintrag von Umweltwärme durch die zentrale Wärmepumpe. Deshalb ist der gesamte Energieaufwand in Form von elektrischer Energie durch die Nachheizung des FWM zu leisten.

Bei den Varianten mit höheren Raumwärmeverteilttemperaturen von 50 °C Vorlauf und 40 °C Rücklauf (50/40) steigt der Anteil Umweltwärme, weil ein grösserer Anteil der Warmwassererwärmung über des FWM erfolgt, und weniger elektrisch nachgeheizt werden muss.

4.5 Vergleich der Varianten mit jahreszeitlicher Abhängigkeit

In Abbildung 13 ist eine Übersicht des elektrischen Energiebedarfs der Wassererwärmung in den Monaten Januar und Juli zu sehen. Gezeigt werden die Referenzsysteme (blau), sowie die Varianten A für Solarthermie (gelb), B für Photovoltaik mit Elektroheizeinsatz (braun-rot) und C für die FWM-Booster (grün). Die eingetragenen Prozentwerte beziehen sich jeweils für den gezeigten Monat auf die Veränderung gegenüber dem elektrischen Energiebedarf des Referenzsystems "Zentral" mit Zirkulation.

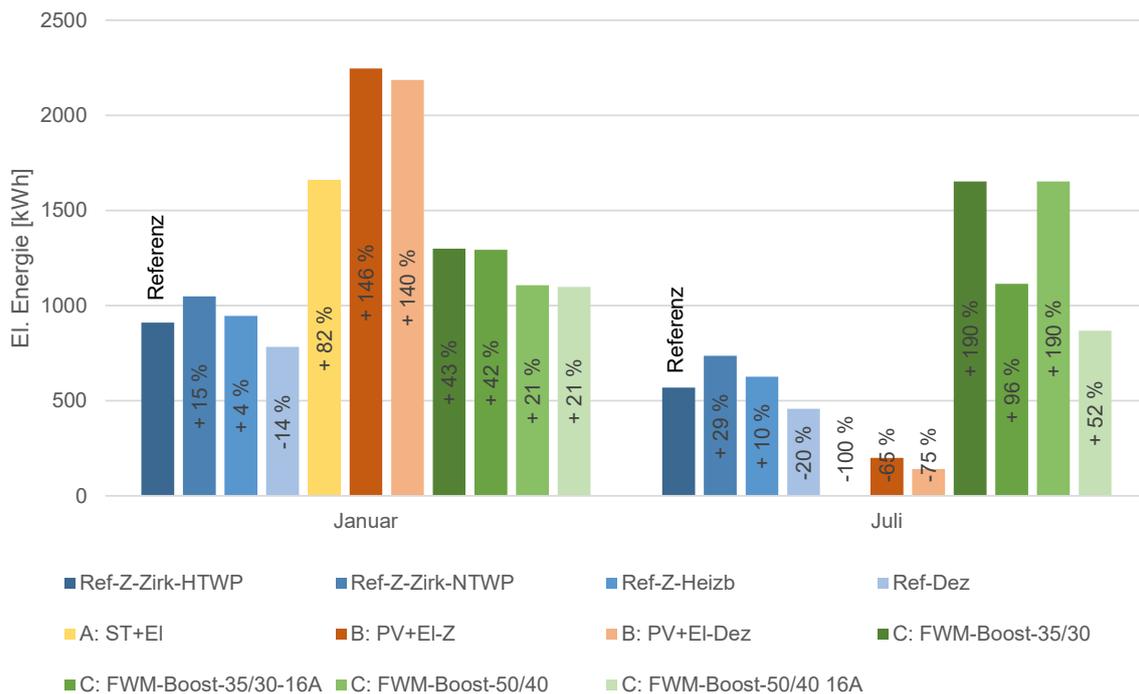


Abbildung 13: Übersicht über den elektrischen Energiebedarf der verschiedenen untersuchten Systeme in den Monaten Januar und Juli.

Die verwendeten Abkürzungen sind hier noch einmal kurz rekapituliert:

- Ref Referenzsystem mit Wärmepumpe
- Z Zentrale Warmwasseraufbereitung

Dez	Dezentrale Warmwasseraufbereitung
Zirk	Warmwasser-Zirkulation zur Warmhaltung der Verteilung
Heizb	Warmhalteband (Heizband) zur Warmhaltung der Verteilung
NTWP	gewöhnliche «Niedertemperatur»-Wärmepumpe welche 60 °C im Warmwasserspeicher nicht erreicht ohne zusätzlichen Elektroheizeinsatz
HTWP	Hochtemp.-WP welche 60 °C im Warmwasserspeicher auch ohne Elektroheizeinsatz erreicht
ST+EI	Solarthermie mit ausschliesslich el. Zusatzheizung für den Restwärmebedarf
PV+EI	PV mit Elektroheizeinsatz, Erwärmung Warmwasser ausschliesslich über den Elektroheizeinsatz mit möglichst hohem Anteil PV-Strom
FWM-Boost	dezentrale Frischwassermodule, welche Brauchwasser über die Raumheizverteilung (vor)-erwärmen, mit nachgeschalteter elektrischer Nachheizung zur Erreichung der Solltemperatur, Varianten: 35/30: Auslegetemperatur Heizkreis Vorlauf 35, Rücklauf 30 °C; 16A: Begrenzung der el. Nachheizung auf 16 A Stromstärke, dadurch zwingende Vorwärmung des Warmwassers durch FWM auch im Sommer (Raumwärmeverteilung auch im Sommer aktiv).

4.6 Spültisch-Instantan-Elektrowassererwärmer (D: SIE)

Der Einsatz von Instantan-Wassererwärmung kommt allenfalls für die Spültische in der Küche in Frage. Hier kann jedoch mit Instantan-Wassererwärmer, welche auch Temperaturen bis knapp unter 100 °C bereitstellen, nicht nur der thermische Aufwand ersetzt werden, der normalerweise durch zentrale oder dezentrale Warmwasserspeicher geliefert wird, sondern auch ein Teil des elektrischen Aufwands, der üblicherweise durch Teekoher oder Kochen auf dem Herd bereitgestellt wird (vgl. 3.6). Für die Berechnung des elektrischen Aufwandes der SIE sowie eventueller Ausstosswärmeverluste bis zum Eintritt des Wassers in die SIE ist zudem relevant, ob diese an das Kaltwasser (SIE Kalt) oder an das Warmwasser (SIE Warm) angeschlossen ist.

Die elektrische Energie für die Bereitstellung von Warmwasser am Spültisch der Küche ist in Tabelle 19 und in Abbildung 14 dargestellt. Als Referenz ist «Zentral mit Zirkulation» angegeben, und der elektrische Aufwand wird verglichen mit den beiden SIE-Varianten «Kaltwasseranschluss» (SI Kalt) und «Warmwasseranschluss» (SIE Warm). Weil hier praktisch keine jahreszeitliche Abhängigkeit besteht, wird jeweils der jährliche Energiebedarf gezeigt.

Tabelle 19: Elektrische Energie für die Bereitstellung von Warmwasser am Spültisch und für Kochen für das gesamte Gebäude mit dem Referenzsystem und unter Verwendung von Spültisch-Instantan-Elektrowassererwärmern (SIE) mit Kaltwasseranschluss und mit Warmwasseranschluss.

		Referenz Z-Zirk	SIE Kalt	SIE Warm
El. Aufwand für Lieferung Nutzwarmwasserbedarf an Küche durch zentrales System ⁽¹⁾	[kWh _{el} /a]	2'544		2'927
Elektrische Energie für Kochen, ersetzbar durch SIE ⁽²⁾	[kWh _{el} /a]	1'831		0
Ausstosswärmeverluste	[kWh _{el} /a]	1'215		1'215
Stand-by SIE	[kWh _{el} /a]		526	526
Warmwasserbereitung SIE	[kWh _{el} /a]		6'446	3'034
Total	[kWh_{el}/a]	5'590	6'972	7'702

(1) Im Fall Referenz «Zentral mit Zirkulation» ist der Nutzwarmwasserbedarf in der Küche ohne Kochen, im Fall SIE Warm mit «Warmwasseranschluss» ist der Nutzwarmwasserbedarf mit einem Anteil Vorwärmung durch das zentrale Referenzsystem für Kochen.

(2) Elektrische Energie für Kochen ist Erwärmung per Kochtopf und Wasserkocher bis ca. 100 °C.

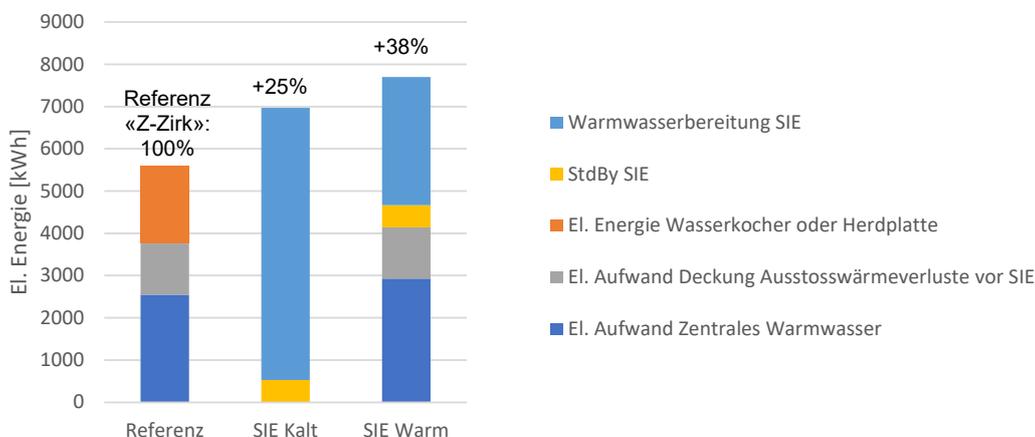


Abbildung 14: Elektrische Energie pro Jahr für die Bereitstellung von Warmwasser am Spültisch (Küche) mit dem Referenzsystem und bei Verwendung eines Instantan-Elektrowassererwärmers (SIE) mit Kaltwasseranschluss (Kalt) und mit Warmwasseranschluss (Warm).

5 Diskussion

5.1 Referenz-Gebäude mit zentraler Warmwassererzeugung (Ref-Z)

Der Nutzwarmwasserbedarf in den verglichenen Referenzsystemen ist jeweils identisch. Unterschiede ergeben sich im Vergleich der Warmwassererzeugung "zentral" und "dezentral" in den Wärmeverlusten und im Temperaturbereich, in dem die Wärmepumpe betrieben wird. Bei der dezentralen Wassererwärmung entfallen die warmgehaltenen Verteilungen und damit deren Wärmeverluste. Ausserdem können die Speichertemperaturen tiefer gehalten werden. Beides führt zu einem geringeren elektrischen Energiebedarf der Wärmepumpen in den dezentralen Systemen.

Bei den Varianten "Zentral" hat die Art und Weise, wie die Wärmeverluste der warmgehaltenen Leitungen gedeckt werden, einen entscheidenden Einfluss. Müssen Zirkulationswärmeverluste aufgrund der hohen Temperaturen mit einem Elektroheizeinsatz kompensiert werden, verschlechtert sich logischerweise die System-Arbeitszahl. Bei Verwendung eines Warmhaltebandes kann ein Drittel der Wärmeverluste aus dem Speicher mit einer Wärmepumpe gedeckt werden. Hingegen müssen zwei Drittel direkt elektrisch, also mit einem COP von 1, gedeckt werden. Obwohl die thermischen Wärmeverluste mit dem Warmhalteband geringer sind als mit der Zirkulation, ist der elektrische Energiebedarf durch den Anteil der direkt elektrischen Wärmeerzeugung höher.

Im Vergleich zur effizientesten Variante, der «dezentralen (Aussen-)Luft-Wasser-Wärmepumpen», liegt der elektrische Energiebedarf der «zentralen Referenzsysteme» zwischen 24 % («Referenzsystem mit Zirkulation und HTWP») und 61 % (Referenzsystem mit Zirkulation und Restwärmedeckung mit Elektroheizeinsatz) höher. Die dezentrale Variante ist jedoch wegen baulichen und akustischen Herausforderungen schwieriger zu realisieren.

5.2 Solarthermie mit Elektroheizeinsatz (A: ST+EI)

Aufgrund des geringen Solarpotenzials im Januar ist der elektrische Energiebedarf mit Solarthermie und ausschliesslich Elektroheizeinsatz als Zusatzheizung in diesem Monat um 82 % höher als beim Referenzsystem «Zentral mit Zirkulation». Im Juli hingegen gibt es keinen nennenswerten elektrischen Energiebedarf für dieses System.

Im Monat Januar ist die Summe aus Solarertrag (thermisch) und elektrischer Energie für den Elektroheizeinsatz identisch mit dem Wärmebedarf für die Warmwasserversorgung des Referenzsystems. Dies entspricht auch der Realität, da der Einsatz von solarthermischen Kollektoren in den Wintermonaten nicht zu einer Erhöhung der Speichertemperatur führt. Im Sommer hingegen sind die Speichertemperaturen höher, da der Wärmeeintrag aus den Kollektoren höher ist. Aus diesem Grund liegt auch der Gesamtwärmeaufwand über dem Wärmebedarf für die Warmwasserversorgung des Referenzsystems.

5.3 Photovoltaik und Elektroheizeinsatz (B: PV+EI)

Die Gegenüberstellung des PV-Ertrages im Januar zum elektrischen Energiebedarf für Haushaltsstrom, E-Mobilität und Wassererwärmung zeigt, dass der PV-Ertrag selbst für den Haushaltsstrom in dieser Jahreszeit nicht genügt. Dabei wurde angenommen, dass für die kurzzeitige Speicherung von PV-Strom Lösungen vorhanden sind, und deshalb mit einer Monatsbilanz gerechnet werden kann. In diesem System erfolgt die Wassererwärmung im Winter immer mit Strom aus dem Netz. Dies führt gegenüber der Referenz zu einem elektrischen Energiebedarf, der mehr als doppelt so hoch ist (+140% bis +146%). Im Sommer hingegen ist genügend PV-Strom vorhanden, um neben Haushaltsstrom und Elektromobilität auch den Grossteil des Warmwasserbedarfs zu decken.

5.4 Dezentrale FWM-Booster (C: FWM-Boost)

Dezentrale FWM-Booster können in den Wintermonaten einen grossen Teil des Energiebedarfs für die Vorwärmung aus der Heizwärmeverteilung bereitstellen. Dennoch ist das Total des elektrischen Energiebedarfs mit den FWM-Boostern höher (+20% bis +43%) als bei der Bereitstellung des Wärmebedarfs mit dem Referenzsystem. Allerdings ist für die Variante mit 50/40 °C Heizwärmeverteilung der elektrische Energiebedarf nur geringfügig höher als bei einem Referenzsystem mit «Zirkulation und Restwärmedeckung mit Elektroheizeinsatz» (Ref-Z-Zirk-NTWP). Da die Gebäude jedoch im Rahmen der Energiestrategie und aufgrund der Vorgaben durch die MukEn nach und nach besser gedämmt werden sollen, ist eher mit durchschnittlich sinkenden Temperaturen der Raumwärmeverteilensysteme zu rechnen, was wiederum gegen die Verwendung von FWM-Boostern entspricht.

Betrachtet man die Sommermonate, so beträgt die Zunahme des elektrischen Bedarfs gegenüber einer effizienteren Wärmepumpen-Wassererwärmung bis zu +190 % (also Faktor 3). Es erscheint deshalb zumindest fraglich, ob damit Art. 5, Abs. 1a EnG erfüllt werden kann.

In der Übergangszeit (Frühjahr und Herbst) muss, wenn die elektrische Leistung des FWM-Boosters nicht genügt um die Wassererwärmung allein zu bewerkstelligen, die gesamte Heizwärmeverteilung mit einer erhöhten Vorlauftemperatur betrieben werden. Dies hat auch einen negativen Einfluss auf die Effizienz der Wärmeversorgung für die Heizwärme. Dieser Effekt wurde im vorliegenden Projekt nicht genauer beziffert.

Bei limitierter elektrischer Leistung des FWM-Boosters ist auch im Sommer der Betrieb der Heizwärmeverteilung zwingend nötig. Die thermischen Wärmeverluste der Wärmeverteilung und eines allfälligen Pufferspeichers gehen dann zulasten der Wassererwärmung. Dies führt im Juli zu einem Mehrbedarf an elektrischer Energie von bis zu 190 %. Darüber hinaus muss in dieser Variante die Umwälzpumpe 24/7 betrieben werden. Um dies zu gewährleisten, muss das Verteilsystem entsprechend ausgestaltet sein (keine blockierenden Ventile und Verhinderung einer Wärmeabgabe an den Wohnraum).

5.5 Spültisch-Instantan-Elektrowassererwärmer (D: SIE)

Mit den hier getroffenen Annahmen ergibt sich eine Erhöhung des elektrischen Energiebedarfs für Warmwasser in der Küche um 25 % mit dem Spültisch-Instantan-Elektrowassererwärmer (z.B. Quooker), der an die Kaltwasserversorgung angeschlossen ist. Würde ein höherer Wasserbedarf zum Kochen angenommen, würde sich diese Differenz verringern, da die SIE für diese Anwendung effizienter ist als das Erwärmen von Kaltwasser in einem Kochtopf oder Teekoher. Ein an das Kaltwasser angeschlossener Spültisch-Instantan-Elektrowassererwärmer kann mit einem Durchlauferhitzer verglichen werden. Durch die Integration eines Warmwasserspeichers kann die elektrische Leistung deutlich reduziert werden, mit dem negativen Aspekt der StandBy-Verluste.

Wenn der Spültisch-Instantan-Elektrowassererwärmer am Warmwasser angeschlossen wird, erweist sich der elektrische Energiebedarf kontraintuitiv. Bei diesem System steigt der gesamte elektrische Energiebedarf um 38 % gegenüber dem Referenzsystem «Zentral mit Zirkulation» (Ref-Z-Zirk-HTWP). Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei einem Warmwasseranschluss auch die Ausstosswärmeverluste gedeckt werden müssen, die bei einem an das Kaltwasser angeschlossenen Spültisch-Instantan-Elektrowassererwärmer entfallen.

6 Schlussfolgerungen

6.1 Generelle Effizienz-Aspekte

Bei der direkten elektrischen Wassererwärmung müssen auch energiebezogene Vorgaben berücksichtigt werden, welche im Energiegesetz sowie in der Norm SIA 385/1:2020 beschrieben sind.

Das **Energiegesetz** (EnG - Stand: 1. September 2023) bezweckt eine sichere, wirtschaftliche und umweltverträgliche Energieversorgung, und schiebt konkret vor: **Jede Energie ist möglichst sparsam und effizient zu verwenden** (EnG, Art. 5, Abs. 1a).

Weiter steht in der Norm **SIA 385/1:2020** in 5.7.1.2 geschrieben: Wenn für die Wassererwärmung zeitweise höhere Temperaturen erforderlich sind, als die Wärmepumpe liefern kann, sind Nacherwärmungssysteme (z.B. Elektroheizeinsätze) so zu steuern, dass sie nur die **minimal erforderliche Energie für die Temperaturerhöhung** liefern (z. B. nur nach Ladung durch die Wärmepumpe freigeben). Für die Nacherwärmung werden separate Energie- oder Betriebsstundenzähler empfohlen.

6.2 Unterscheidung zwischen Januar (Winter) und Juli (Sommer)

In der Diskussion um die Deckung des Energiebedarfs der Schweiz hat sich in den letzten Jahren der Fokus von den Jahresbilanzen hin zur Deckung der Wintermonate verschoben. Im Winter ist der Ausbau der Produktion auf Basis erneuerbarer Energien aufgrund des in der Schweiz in dieser Jahreszeit reduzierten Solarstrahlungsangebots schwieriger und teurer. Gleichzeitig ist der Bedarf vor allem für Wärme aufgrund der kalten Jahreszeit deutlich höher. Wärme macht im Winter 65 % des Endenergiebedarfs der Schweiz aus.

Der Unterschied in der Energiebilanz bzw. im elektrischen Energiebedarf zwischen Januar (Winter) und Juli (Sommer) fällt besonders bei den Varianten der Variante A «Solarwärme mit Elektro-Zusatzheizung» (im Januar +82 %) sowie bei der Variante B «PV mit PV-Eigenstromnutzung über Elektroheizeinsatz» (im Januar +146 % im Fall «Zentral» bzw. +140 % im Fall «Dezentral») erheblich aus. Im Sommer bietet sich im Vergleich zum Winter ein weitaus höheres Potenzial für Solarenergie.

Der Einsatz von FWM-Boostern führt im Sommer zu einer deutlichen Erhöhung des elektrischen Energiebedarfs, allerdings bei gleichzeitiger Verfügbarkeit von PV-Strom. Die Erhöhung des Strombedarfes beträgt fast 200 % gegenüber dem Referenzsystem, wenn ausserhalb der Heizperiode keine Vorwärmung durch die Heizwärmeverteilung eingesetzt werden kann. Im Winter liegt die Erhöhung des Strombedarfes zwischen 21 % (mit Radiatoren als Heizsystem) und 43 % (mit Fussbodenheizung).

6.3 Kritische Betrachtung der MuKE 2014

Mit der aktuell geltenden MuKE 2014 ist eine direkt elektrische Wassererwärmung erlaubt, sofern 50 % des Energiebedarfes mit erneuerbarer Energie gedeckt werden. Im Lichte der Resultate aus dieser Studie muss diese Regelung kritisch hinterfragt werden:

Die aktuelle MuKE kann so interpretiert werden, dass sich die 50 % erneuerbare Deckung nur auf die Jahressumme bezieht. Dies würde Systeme erlauben, welche im Sommer zu 100 Prozent oder annähernd 100 Prozent solar betrieben werden, im Winter jedoch nur einen geringen oder gar keinen solaren Beitrag leisten und dann grösstenteils direkt elektrisch

heizen. Dies führt gerade in der versorgungskritischen Jahreszeit zu einer Zunahme des elektrischen Energiebedarfs für Warmwasser von +82 % (Solarthermie und Elektroheizeinsatz, ST+EI) bis +140 % (PV und Elektroheizeinsatz, PV+EI).

Die 50 % Regel wurde nicht zuletzt deshalb eingeführt, weil man solarthermische Warmwasser-Systeme mit Elektro-Zusatzheizung nicht behindern wollte. Eine 2019 durchgeführte Felderhebung hat jedoch gezeigt, dass Elektro-Wassererwärmer in Kombination mit Solarwärme deutlich weniger häufig sind (7 %) als in Systemen ohne Solarthermie (26 %) [9]. Dies legt die Schlussfolgerung nahe, dass, wer Solarwärme installiert, meistens auch den Warmwasserspeicher ersetzt und dabei die Zusatzheizung dem Hauptwärmeerzeuger überlässt. Entsprechend bedeutungslos ist für die Solarwärme die 50 %-Regel der MukEn.

In Kombination mit PV wird oft argumentiert, dass die Photovoltaik auf dem Dach in der Jahresbilanz mehr Strom liefert als im Haus verbraucht wird. Eine Betrachtung des kritischen Monats Januar zeigt jedoch, dass dies, für diesen Monat alleine betrachtet, bei weitem nicht zutrifft. Der PV-Ertrag reicht bei einem Mehrfamilienhaus im Mittelland typischerweise nicht einmal aus, um den Haushaltsstrom zu decken, geschweige denn den Bedarf der zunehmenden Elektromobilität oder gar (hier nicht einmal mitberücksichtigt) den elektrischen Aufwand einer Wärmepumpe für die Wärmeversorgung des Gebäudes.

Fazit zu Systemen mit Solarenergie:

Systeme mit Solarenergie (PV oder Solarthermie) und (ausschliesslich) elektrischer Zusatzheizung von Warmwasser, die zwar in der Jahressumme 50 % erneuerbar Warmwasser bereiten, aber im Januar deutlich mehr elektrische Energie verbrauchen als die effizienteren Wärmepumpen-Lösungen, erscheinen angesichts der zunehmenden Fokussierung auf die Deckung potenzieller Winter-Energielücken nicht mehr zeitgemäss. Die Unsicherheit der Berechnung dieser Solarvarianten ist relativ gering und das Ergebnis ziemlich robust. So würde zum Beispiel auch bei doppelter Solarfläche oder effizienteren PV-Modulen bzw. Kollektoren der Engpass zur Deckung des elektrischen Energiebedarfs eines Mehrfamilienhauses im Januar bestehen bleiben. Dies selbst dann, wenn nur dem Haushaltsstrom und der zunehmend Elektromobilität ein Vorrang eingeräumt wird. In den meisten Fällen müsste jedoch zusätzlich der Bedarf für Raumheizung über eine Wärmepumpe mit eingerechnet werden, was das Resultat noch deutlicher und robuster machen würde.

Generelles Fazit zu direkt elektrischer Wassererwärmung:

Die Verwendung von elektrischer Wassererwärmung erscheint selbst zu Zeiten verfügbaren PV-Stroms nicht im Einklang mit EnG, Art. 5, Abs. 1a. So lange der verfügbare PV-Strom anderweitig effizient verwendet werden kann, ist diese andere Nutzung deshalb vorzuziehen. Ausnahmen erscheinen nur da sinnvoll, wo die Standby-Verluste von Warmwasserspeicher oder deren Verteilung die Vorteile der effizienteren Wassererwärmung über Wärmepumpen vollständig oder annähernd vollständig kompensieren würden. Dies ist aber im normalen Wohnungsbau praktisch nie der Fall.

Empfehlungen zur Überarbeitung der MukEn:

Im Hinblick auf eine Überarbeitung der MukEn 2014 empfehlen die Autoren eine Überarbeitung von Art. 2, so dass **Systeme resultieren, welche auch in den Wintermonaten effizient betrieben werden und nicht zu einem deutlichen Mehrbedarf an elektrischer Energie gegenüber einer effizienten Wärmepumpenlösung führen**. Sinngemäss sollte der Neueinbau oder Ersatz einer direkt-elektrischen Erwärmung des Warmwassers in Wohnbauten nicht mehr erlaubt sein, oder nur noch dann erlaubt sein, wenn die Warmwassererzeugung in den Wintermonaten NICHT über diese Elektroheizung erfolgt.

Selbst bei Verwendung von Elektroheizeinsätzen ausschliesslich oder hauptsächlich im Sommer kann in Frage gestellt werden, ob dieser Art. 5 Abs. 1a des EnG erfüllt. Bei Verwendung von PV-Strom wäre es wohl deutlich effizienter und eventuell sachdienlicher, den PV-Strom anderweitig zu verwenden, oder über Solarwärme drei Mal mehr Wärme aus derselben verfügbaren Fläche auf dem Dach zur Verfügung zu stellen. Ähnliches trifft zu auf FWM-Booster, welche im Sommer ausschliesslich elektrisch beheizt werden. Wird die Raumwärmeverteilung im Sommer nur betrieben, um FWM-Booster zu bedienen, so führt dies ebenfalls zu einem erheblichen Mehraufwand an elektrischer Energie.

Im Falle der Spültisch-Instantan-Erwärmer (SIE) für die Küche ist die Unsicherheit der Datengrundlage sowie der Berechnungen relativ hoch. Die Ergebnisse zeigen einen Mehrbedarf zwischen 25 % und 38 %, bezogen auf die elektrische Energie für Warmwasser in der Küche. Diese Ergebnisse sind sensitiv auf die angenommenen Verbrauchsprofile, die Leitungslängen und Ausstosswärmeverluste sowie die Spül- und Kochgewohnheiten. Die Autoren empfehlen deshalb, den Einfluss von SIE auf den elektrischen Energiebedarf durch Feldstudien zu untersuchen, um zu robusteren Schlussfolgerungen für eine Berücksichtigung in der MukEn zu gelangen. Nicht untersucht wurde in dieser Studie der Einsatz für andere Zwecke wie Badezimmer, da dort mit deutlich negativen Ergebnissen, respektive deutlich erhöhtem elektrischem Energiebedarf, gerechnet werden muss.

7 Bibliographie

- [1] Mojic I, Cramer S, Caflisch M, Carbonell D, Haller M. Reference Framework for Building and System Simulations: Multifamily Reference Building 2019.
- [2] Messmer C, Haberl R, Schindler M, Zehnder M, Bohara K, Haller MY, et al. HpCosy - Heat Pump Comfort System. Muttenz: FHNW; 2023.
- [3] Haberl R, Türk O, Bohren A, Haller MY. DHWStrat - Methode zur Bestimmung der Schichtungseffizienz von Warmwasserspeichern. Bundesamt für Energie BFE; 2021.
- [4] Sicre B, Lobsiger-Kägi E, Sigrist D, Kohler A, Steffen C, Zenger B, et al. Warmwasser-Kurzentnahmen - Auswirkung und Vermeidung. Bern: Bundesamt für Energie BFE; 2020.
- [5] Freiburghaus M. Wasserverbrauch - Sinkender Wasserabsatz im Schweizer Haushalt. AQUA & GAS 2015;AQUA&GAS:72–9.
- [6] Freiburghaus M. AW: Auslegung und Berechnung von Warmwasser-Anlagen: Bedarf in Küche 2023.
- [7] Verbrauch | Wasserwerk n.d. <https://wasserwerk.at/home/alles-ueber-wasser/verbrauch> (accessed September 7, 2023).
- [8] Redaktion. Wasserkocher oder Herd – Was ist energiesparender? Nachhaltigkeits News 2023. <https://nachhaltigkeitsnews.de/wasserkocher-oder-herd-was-ist-energiesparender/> (accessed September 7, 2023).
- [9] Haller M, Ruesch F. LegioSafe - Legionellensicherheit in thermischen Solaranlagen. Rapperswil: SPF Institut für Solartechnik; 2019.

Annex A Haushalts-Belegungen und Stromprofile

Mit Hilfe des Programms LoadProfileGenerator (LPG) (Pflugradt, 2018) wurden Profile für sechs Haushalte angelegt. Diese Profile enthalten Anwesenheitsprofile der jeweiligen Personen und Verbrauchsprofile sowohl für die elektrischen Haushaltsgeräte als auch für den Warmwasserbedarf. In Mojic et al. [1] ist eine Beschreibung der einzelnen Profile sowie deren Zuordnung zu den einzelnen Wohnungen zu sehen.

Tabelle 20: Beschreibung der Haushaltstypen.

Bezeichnung	Beschreibung	Anzahl Personen	Haushalts- strom
		[-]	[MWh/a]
CHR44	Familie mit zwei Kindern, ein Elternteil berufstätig.	4	3.52
CHR33	Ehepaar, beide unter 30 Jahre.	2	2.88
CHS04	Ehepaar, beide im Ruhestand.	2	1.97
CHR27	Familie mit zwei Kindern, beide Elternteile berufstätig.	4	2.96
CHR18	Familie mit zwei Kindern, beide Elternteile zu Hause.	4	3.03
CHR55	Ehepaar, beide berufstätig.	2	2.40
Total		18	16.16

Der Bedarf an Trinkwarmwasser (TWW) resultiert ebenfalls aus den mit dem LPG erstellten Nutzerprofilen, wo der Verbrauch auf Minutenbasis in Liter beschrieben ist. In Tabelle 21 ist der mittlere Tagesbedarf an den Entnahmestellen als Jahresverbrauch in kWh dargestellt. Die Jahressumme beläuft sich dabei auf 17'263 kWh, was pro Wohneinheit einen Durchschnitt von 2'877 kWh ergibt, und pro Person 959 kWh.

Tabelle 21: Bedarf an Brauchwarmwasser in den einzelnen Wohneinheiten, als "an den Entnahmestellen bezogene" Nutzwarmwasserbedarf, in kWh/a.

	West	Ost
2. OG	2'622 [kWh/a]	3'343 [kWh/a]
1. OG	3'034 [kWh/a]	2'354 [kWh/a]
EG	1'939 [kWh/a]	3'971 [kWh/a]

Annex B Carnot Wirkungsgrad der WP

$$T_{HP,Source} = T_{Evap,in} - \Delta T_{HP,HX}$$

$$T_{HP,Sink} = T_{Cond,out} + \Delta T_{HP,HX}$$

$$\eta_{Carnot,HP} = \frac{T_{HP,Sink}}{\Delta T_{HP,SourceSink}}$$

$$COP = \eta_{HP} \cdot \eta_{Carnot,HP} \Delta T_{HP,SourceSink} = T_{HP,Sink} - T_{HP,Source}$$

$$\eta_{HP} = 0.45$$

Tabelle 22: Berechneter COP der angenommenen Luft/Wasser WP bei verschiedenen Bedingungen.

A-7 / W35	3.5	A-7 / W55	2.6
A+2 / W35	4.3	A+2 / W55	3.0
A+7 / W35	4.9	A+7 / W55	3.3

Annex C Effizienz solarthermischer Kollektoren

Für die Berechnung des Solarertrages der solarthermischen Kollektoren wurde vereinfacht von einem mittleren Wirkungsgrad der Kollektoren ausgegangen. Abbildung 15 zeigt den mittleren Wirkungsgrad einer Anlage mit einer Dimensionierung auf 65 % solaren Deckungsgrad.

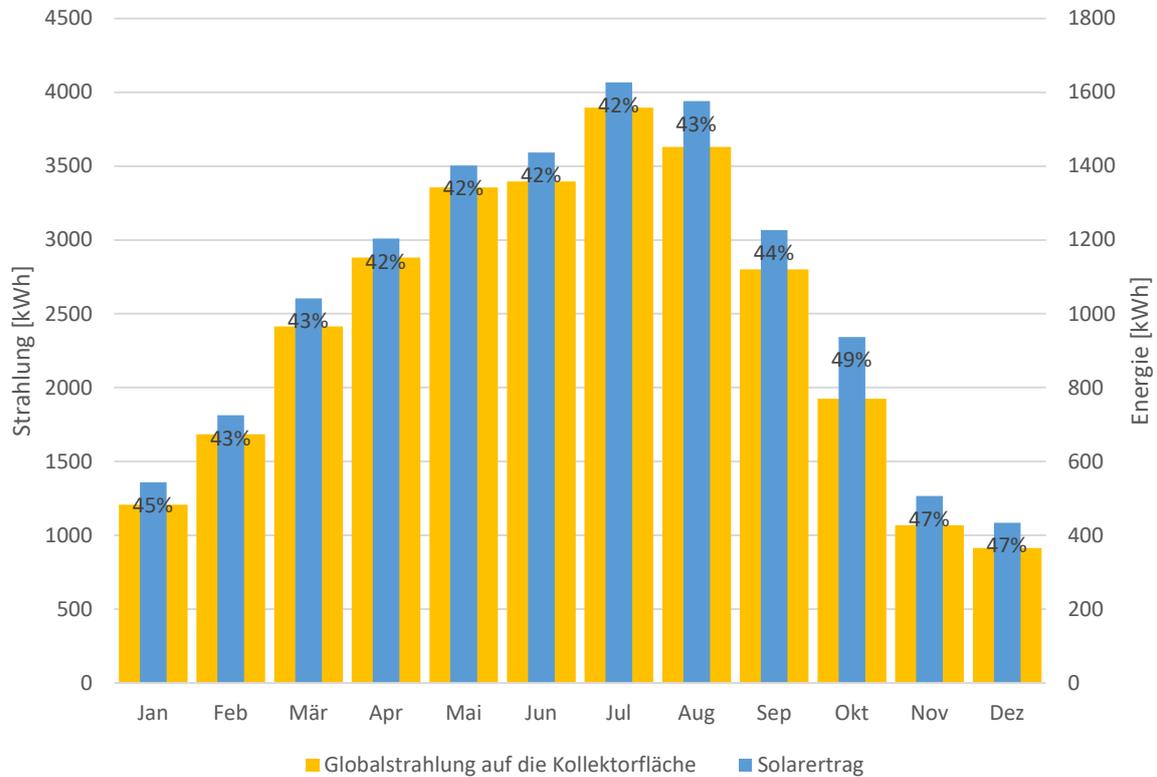


Abbildung 15: Globalstrahlung auf die Kollektorfläche und Solarertrag einer solarthermischen Anlage zur WW-Erwärmung mit einem Solaren Deckungsgrad von 65 % mit einem ähnlichen Wärmebedarf des Referenzgebäudes mit Zirkulation.