

ENERGIEKONZEPTE WEISSENSTEIN

Autoren:

Dr.-Ing. Achim Geissler
Leiter Forschungsgruppe Bau
Tel. 061 467 44 51
E-mail: achim.geissler@fhnw.ch

Claudio Menn
Wissenschaftlicher Assistent
Tel. 061 467 42 78
E-mail: claudio.menn@fhnw.ch

Falk Dorusch
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Tel. 061 467 46 06
E-mail: falk.dorusch@fhnw.ch

Begleitgruppe:

Olivier Jacquat (EBG Bern), Rolf Schneider (EBG Bern), René Bolt (EBG Bern), Daniele Gottier (BBE), Jeanette Beck (Stadtplanungsamt Bern), Markus Waber (Denkmalschutzpflege Bern), Rolf Schütz (W2H Architekten), Andreas Herzog (W2H Architekten), Andreas Wenger (W2H Architekten), Marion Spillmann (W2H Architekten)

Muttenz, Januar 2016

I. ZUSAMMENFASSUNG

Die historische Siedlung Weissenstein in Bern soll denkmalgerecht und nachhaltig saniert werden. Im Rahmen des hier zusammengefassten Projektes wurden Energiekonzepte entwickelt. Ausgehend von 10 Gebäudeenergieausweisen der Kantone (GEAK) als Grundlage für die Bedarfsanalyse werden 3 Energieversorgungs- sowie 3 Gebäudesanierungsvarianten hinsichtlich technischer Umsetzung, Energieeffizienz, Umweltauswirkungen und Wirtschaftlichkeit bewertet. Zudem wird mit einem mittelfristigen und langfristigen Zeithorizont ein Entwicklungspfad zur schrittweisen Umsetzung der Massnahmen aufgezeigt.

Der Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser beträgt für die Siedlung Weissenstein ca. 8 GWh jährlich (siehe Tabelle 1). Ohne weitere Sanierungsmassnahmen (Tabelle 1; Sanierungszustand = Ist) und der Berücksichtigung von Ergänzungsbauten am Siedlungsrand steigt dieser Energiebedarf auf jährliche 8.5 GWh. Unter diesen Gegebenheiten wird für die Siedlung eine Heizleistung von ca. 2.8 bzw. 3 MW benötigt.

Die Heizwärme und das Warmwasser werden zurzeit mithilfe von Gas-, Ölheizungen und Elektroboilern bereitgestellt. Dadurch wird jährlich eine Umweltbelastung von 2.1 Milliarden Umweltbelastungspunkten (UBP) (1.5 Millionen UBP pro EinwohnerIn), eine Primärenergie nicht erneuerbar von 46 Millionen MJ Öl Äquivalente (33'500 MJ Öl eq. pro EinwohnerIn) oder 2'600 Tonnen CO₂ Äquivalente (1.9 t CO₂ eq. pro EinwohnerIn) verursacht (Bilanzierungsrahmen: Heizung, Warmwasser, Lüftung (HWL); Strombezug: Schweizer Verbrauchermix). Das Ziel einer 2'000 Watt-Gesellschaft (1 t CO₂ eq. pro Person und Jahr) wird somit deutlich überschritten.

Für eine denkmalgerechte Sanierung werden 3 Massnahmenpakete vorgeschlagen. Alle Vorschläge beinhalten eine Dämmung des Dachs sowie eine Dämmung des Erdgeschosses gegen unbeheizte Räume. In der Variante DKFF1 (Dach, Keller, Fenster, Fassade 1 cm Aerogel) werden zudem teilweise Fenster ersetzt und an der Fassade 1 cm dicke Aerogel Vliese angebracht. Dieses Dämmmaterial zeichnet sich durch eine tiefe Wärmeleitfähigkeit aus und ist dadurch gut für die denkmalgerechte Sanierung geeignet. In der Variante DKFF4 werden bei den meisten Objekten die Fenster ersetzt, Wärmebrücken kaschiert und an der Fassade eine Aerogel Dämmplatte mit 4 cm dicke angebracht. Für die Variante DKFF4+L wird zudem eine Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung installiert.

In der mittelfristigen Energieversorgungsvariante wird von einem Ersatz bestehender Ölheizungen, die am Ende ihres Lebenszyklus angelangt sind, mit Luft/Wasser-Wärmepumpen (LWP) sowie mit Sole/Wasser-Wärmepumpen (SWP) ausgegangen. Zudem werden mehrere Häuserreihen zu Nahwärmenetzen verbunden. Aufgrund von den Schallemissionen aus LWP-Aggregaten, die begrenzte Fläche für die Verlegung von Erdsonden und die zu erwartenden Jahresarbeitszahlen (JAZ) von LWP und SWP ist hierfür mindestens Sanierungsvariante DKFF4 oder DKFF4+L umzusetzen.

Es ist möglich, langfristig den Energiebedarf der bestehenden Siedlung sowie von geplanten Neubauten am Siedlungsrand nahezu oder gänzlich (bei Netzbezug von zertifizierten Stromprodukten) ohne den Einsatz fossiler Energieträger zu decken. Eine

Heizenergieversorgung durch vier Nahwärmenetze, basierend auf zentralen SWP, Photovoltaik/thermische Kollektoren (PVT) sowie dezentralen LWP-Boilern für die Bereitstellung von Warmwasser weist dabei die geringsten Umweltbelastungen auf (Energieversorgungsvariante 1). Aufgrund der begrenzten Fläche zur Auslegung von Erdsonden und den zu erwartenden JAZ der SWP ist mindestens die Sanierungsvariante DKFF4 umzusetzen.

Die Deckung des Heizenergiebedarfs (sowie Warmwasserbedarf während der Heizperiode) durch ein Holzschnitzelkraftwerk (Energieversorgungsvariante 2) oder der Anschluss an das „Energie Wasser Bern“ (EWB)-Fernwärmenetz (Energieversorgungsvariante 3) sind energietechnisch auch ohne Sanierungsmassnahmen innerhalb der bestehenden Siedlung umsetzbar. Diese Varianten sehen dezentrale LWP-Boiler für die Bereitstellung von Warmwasser sowie PV-Anlagen auf den verfügbaren Dachflächen von den geplanten Ergänzungsbauten vor. Bei der Umsetzung eines Holzschnitzelkraftwerkes ohne weitere energetische Sanierung der Gebäude besteht jedoch das Risiko, dass der Platzbedarf des Holzlagers an die Grenzen der verfügbaren Fläche innerhalb der Siedlung stösst (ohne Sanierung beträgt die benötigte Lagergrösse ca. 10'000 m³ Holzschnitzel und entspricht bei einer Raumhöhe von 10 m ein Platzbedarf von 1'000 m²). Weiterhin muss damit gerechnet werden, dass die Zulieferung die Siedlungsbewohner stark beeinträchtigt (ca. 1 Lastwagen pro Tag während der Heizperiode).

Die Investitionsanalyse zeigt eine vernachlässigbar kleine Kostendifferenz zwischen Energieversorgungsvarianten 1 (SWP) und 2 (Holzschnitzelkraftwerk) (siehe Tabelle 1). Für Versorgungsvariante 3, den Anschluss an das Fernwärmenetz der EWB, sind die geringsten Investitionen der betrachteten Varianten zu erwarten. Es fallen lediglich Kosten für das Wärmeverteilnetz innerhalb der Siedlung, für die Wärmepumpenboiler und die PV-Anlagen an. Es wird davon ausgegangen, dass die Investitionen in die Heizenergieversorgung von der EWB getätigt werden und im Energiepreis der Fernwärme enthalten sind.

Die durchgeführte Untersuchung zur Wirtschaftlichkeit berücksichtigt ausschliesslich initiale Investitionen. Jährliche Kosten, die während des Betriebes anfallen (z.B. Kosten zur Deckung des Energiebedarfs und für die Wartung) werden vernachlässigt. Aufgrund der relativ nahe beieinander liegenden Höhe der Investitionen für die Energieversorgungsvarianten 1 und 2 ist eine dynamische Berechnung der Energiegestehungskosten zu den Versorgungsvarianten zu empfehlen.

Für allfällige Fördermöglichkeiten sind weitere Abklärungen mit möglichen Betreibern des Fernwärmenetzes sowie mit den regionalen Behörden notwendig. Zudem sind für die technische Umsetzung der Energieversorgungsvarianten weitere Abklärungen zu den vorherrschenden geologischen Gegebenheiten für den Einsatz von Erdsonden notwendig.

Nach einer Eingrenzung der Varianten wird eine umwelttechnische und ökonomische Einschätzung mit grösserer Detailtiefe empfohlen. Allenfalls sind auch weitere Energieversorgungsvarianten aufzunehmen, die in der Begleitgruppe bisher nicht behandelt wurden. Beispiele dafür sind gebäudeintegrierte Photovoltaik und Quartierspeicher zur Speicherung von überschüssigem Solarstrom. Für die ökonomische Bewertung wird empfohlen, neben initialen Investitionen die Kosten während des Betriebs zu berücksichtigen. Zudem ist der

bisherige Bilanzierungsrahmen für die Quantifizierung der Umweltauswirkungen vom Heizenergiebetrieb (Heizung, Warmwasser, Lüftung und Klima (HWLK)) sinnvollerweise auf die Graue Energie der Massnahmen auszuweiten.

Tabelle 1 Übersichtstabelle energetischer, umwelttechnischer und wirtschaftlicher Bewertung der betrachteten Energiekonzepte.

Zeithorizont	Varianten		Energetische Kenngrössen							Umweltauswirkung			Investitionen [CHF]			
	Energieversorgung	Sanierungs-zustand	Heizenergiebedarf inkl. WW [kWh]	Heizleistung inkl. WW [kW]	max. Leistung LWP [kW]	Anz. Erdsonden	JAZ LWP	JAZ SWP	Lagergrösse [Sm ³]	PNE [MJ oil eq./m ² A _E]	THGE [kg CO2 eq./ m ² A _E]	UBP/ m ² A _E	Sanierung	Energieversorgung	Wärmeverteilnetz	Total
Heute (A _E : 64'546 m ²)	Öl-, Gasheizung, Elektroboiler	-	8'093'756	2'847	-	-	-	-	-	704	40	31'900	-	-	-	-
Mittelfristig (Bestandsgebäude A _E : 64'546 m ²)	SWP, LWP, LWP-Boiler, Öl-, Gasheizung)	Ist	8'093'756	2'847	105	94	2.6	2.7	-	594	24	24'641	n/a	n/a	n/a	n/a
		DKFF1	5'165'299	1'945	74	58	2.7	2.9	-	372	14	15'580	n/a	n/a	n/a	n/a
		DKFF4	3'831'356	1'530	59	74	3.2	3.4	-	284	11	11'945	n/a	n/a	n/a	n/a
		DKFF4+L	3'195'010	1'283	49	46	3.3	3.8	-	263	10	10'968	n/a	n/a	n/a	n/a
Langfristig (Bestandsgebäude und Ergänzungsgebäude A _E : 86'561 m ²)	V1 (SWP, LWP-Boiler, PVT)	Ist	8'437'473	3'073	-	528	-	2.7	-	316	5	12'433	-	10'759'008	4'230'769	14'989'777
		DKFF1	5'509'016	2'171	-	317	-	2.9	-	178	3	7'031	27'263'408	8'458'773	4'230'769	39'952'950
		DKFF4	4'145'241	1'757	-	219	-	3.4	-	111	2	4'380	44'753'951	7'401'810	4'230'769	56'386'530
		DKFF4+L	3'508'895	1'510	-	173	-	3.8	-	91	1	3'600	53'858'704	6'772'586	4'230'769	64'862'059
	V2 (Holzschnitzel, LWP-Boiler, PV)	Ist	8'437'473	3'073	-	-	-	-	10'125	68	2	8'358	-	10'767'540	4'230'769	14'998'309
		DKFF1	5'509'016	2'171	-	-	-	-	6'611	57	1	5'836	27'263'408	8'463'490	4'230'769	39'957'667
		DKFF4	4'145'241	1'757	-	-	-	-	4'974	52	1	4'662	44'753'951	7'404'774	4'230'769	56'389'495
		DKFF4+L	3'508'895	1'510	-	-	-	-	4'211	61	1	4'544	53'858'704	6'774'507	4'230'769	64'863'980
	V3 (Fernwärme, LWP-Boiler, PV)	Ist	8'437'473	3'073	-	-	-	-	-	319	16	13'931	-	3'045'585	4'230'769	7'276'354
		DKFF1	5'509'016	2'171	-	-	-	-	-	216	9	9'285	27'263'408	3'045'585	4'230'769	34'539'762
		DKFF4	4'145'241	1'757	-	-	-	-	-	167	7	7'122	44'753'951	3'045'585	4'230'769	52'030'305
		DKFF4+L	3'508'895	1'510	-	-	-	-	-	156	6	6'543	53'858'704	3'045'585	4'230'769	61'135'058

A_E : Energiebezugsfläche, Sm³: Schüttraumvolumen Hackschnitzel in Kubikmeter, WW: Warmwasser, LWP: Luft/Wasser- Wärmepumpe, SWP: Sole/Wasser- Wärmepumpe, JAZ: Jahresarbeitszahl, PNE: Primärenergie nicht erneuerbar, THGE: Treibhausgasemissionen, UBP: Umweltbelastungspunkte, n/a: nicht verfügbar; DKFF: Dach Keller Fenster Fassade, DKFF+ L: Dach Keller Fenster Fassade plus Komfortlüftung; Bilanzierungsrahmen: Heizung, Warmwasser und Lüftung

Grau hinterlegte Felder: Von der Umsetzung dieser Varianten wird aus technischen Gründen abgeraten

II. INHALTSVERZEICHNIS

I.	Zusammenfassung	3
II.	Inhaltsverzeichnis	7
III.	Abbildungsverzeichnis	8
IV.	Tabellenverzeichnis	9
1	Einleitung	11
1.1	Ausgangslage	11
1.2	Fragestellungen	11
1.3	Vorgehen	11
2	Grundlagen	12
2.1	Situationsplan	12
2.2	Gebäudetypen und Geak Zertifizierung	13
2.3	Langfristige bauliche Veränderungen	14
3	Sanierungsvarianten	15
3.1	Beurteilungskriterien	15
3.2	Bauliche Massnahmen am Gebäude	16
4	Energetischer Ist- Zustand	18
4.1	Energiemix	18
4.2	Energiebedarf der Gebäudetypen	19
4.3	Aggregierter Energiebedarf	20
4.4	Umweltauswirkungen	21
5	Energieeffizienz durch denkmalschutzgerechte Erneuerung	22
5.1	Heizenergiebedarf	22
5.2	Aggregation Heizenergiebedarf und Heizleistung	23
5.3	Heizleistung und Wärmeabgabeleistung einzelner Gebäudekategorien	24
6	Wärmeversorgungskonzepte	26
6.1	Entwicklungsfelder	26
6.2	Technische Machbarkeit Kurz- und mittelfristiger Varianten der Wärmeversorgung ..	29
6.2.1	Übersicht	29
6.2.2	Luft/Wasser- Wärmepumpen: Benötigte Heizleistung und Schallemissionen gemäss Sanierungsvariante	30
6.2.3	Sole/Wasser-Wärmepumpen: Benötigte Heizleistung und Anzahl Erdsonden gemäss Sanierungsvariante	32
6.3	Langfristige Energieversorgung	33

6.3.1	Übersicht.....	33
6.3.2	V1: Sole/Wasser- Wärmepumpen.....	34
6.3.3	V2: Holzschnitzel Kraftwerk.....	35
6.3.4	Wärmenetzanschluss naheliegender Energieverbraucher.....	38
6.3.5	V3: Benachbarte Wärmelieferanten.....	38
6.3.6	PV- Anlagen.....	39
6.4	Bewertung Umwelteinfluss.....	40
6.4.1	Die Betrachtung eines typischen Objekts: Treibhausgasemissionen unterschiedlicher Energiebereitstellungsvarianten.....	40
6.4.2	Die Betrachtung der gesamthaften Siedlung.....	41
6.5	Abschätzung initiale Investitionen.....	43
7	Konklusion.....	45
	Literaturverzeichnis.....	47
	Anhang.....	50

III. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1	Besitzerverhältnisse und Systemgrenze Siedlung Weissenstein.....	13
Abbildung 2	Gebäudetypen der Siedlung Weissenstein Quelle: in Anlehnung an [39].....	14
Abbildung 3	Mögliche bauliche Veränderungen nach Quelle: [40].....	15
Abbildung 4	Wärmeverluste Gebäudetyp B (Ist-Zustand).....	16
Abbildung 5	Maueraufbau inkl. U-Werte für Ist-Zustand und Sanierungsvarianten DKFF1 und DKFF4.....	17
Abbildung 6	Energiemix Siedlung Weissenstein (Ist-Zustand).....	19
Abbildung 7	Ist- Zustand: Abschätzung Energiebedarf Siedlung Weissenstein.....	20
Abbildung 8	Anteil je Gebäudetyp am Gesamtbedarf Heizenergie und Warmwasser der Siedlung Weissenstein. Beispiel: Alle Gebäude der Kategorie C zusammen verursachen rund 13 % des Wärmebedarfs der Siedlung.....	21
Abbildung 9	GEAK Klassierung Effizienz Gebäudehülle.....	23
Abbildung 10	Kumulierter Heizenergiebedarf und Heizleistung inkl. Produktion von Warmwasser.....	24
Abbildung 11	Gebäudetypen A, B, C, D: Heizleistung basierend auf [29] vs. Wärmeabgabe der Radiatoren bei unterschiedlicher Vorlauftemperaturen.....	25
Abbildung 12	Definition der fünf Entwicklungsfelder, prozentuale Verteilung des Heiz- und Warmwasserwärmebedarfs, basierend auf dem Ist- Zustand der Gebäude.....	26
Abbildung 13	Entwicklungspfade Energieversorgung und -verteilung.....	28
Abbildung 14	Wärmeenergiemix Siedlung Weissenstein Entwicklungspfade (Gebäudehülle: Ist-Zustand).....	29
Abbildung 15	Schema der Kurz-/mittelfristige Entwicklung (bei Sanierungsvariante DKFF4).....	30

Abbildung 16	Benötigte Heizleistung der Luft/Wasser- Wärmepumpe gem. Sanierungsvarianten.....	31
Abbildung 17	Benötigte Heizleistung Sole/Wasser-Wärmepumpe in Abhängigkeit von der gewählten Sanierungsvariante. Kennzeichnung der Erdsondenfelder.....	33
Abbildung 18	langfristiges Energieversorgungskonzept V1: Sole/Wasser-Wärmepumpe gem. Sanierung DKFF4.....	34
Abbildung 19	Anzahl Erdsonden gemäss Varianten der energetischen Erneuerung.....	35
Abbildung 20	Heizleistung und Wärmebedarf V2 (inkl. Neubauten) gem. Sanierungsvarianten.....	36
Abbildung 21	Lagerbedarf Buche-Holzschnitzel.....	37
Abbildung 22	Standortfindung für ein Holzschnitzelkraftwerk, die Länge des Wärmeverteilnetzes beträgt etwa 4 km	37
Abbildung 23	mögliche Anbindung der Siedlung an das Fernwärmenetz der ewb, Kartenauszug aus dem der Geoportal Stadt Bern	39
Abbildung 24	Typ D Gebäude: Emissionen gem. Energieversorgungs- und Sanierungsvarianten.....	40
Abbildung 25	Primärenergie nicht erneuerbar: Mittel- und Langfristige Entwicklungspfade gem. Sanierungsvarianten.....	42
Abbildung 26	Umweltbelastungspunkte (UBP): Mittel- und Langfristige Entwicklungspfade gem. Sanierungsvarianten.....	43
Abbildung 27	Investitionskosten langfristige Energieversorgungsvarianten inkl. Sanierungsvarianten.....	44
Abbildung 28	Kosteneinschätzung zu den Sanierungsvarianten DKFF1, DKFF4, DKFF4+L bei EFH und MFH.	45
Abbildung 29	Bilanzierungsrahmen Siedlung Weissenstein in Anlehnung an [16].....	50
Abbildung 30	Entscheidungsschema Nutzung Solarthermie.....	54
Abbildung 31	Preiskalkulation AeroCalce Wärmedämmsystem (10 mm).	61

IV. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1	Übersichtstabelle energietechnischer, umwelttechnischer und wirtschaftlicher Bewertung der betrachteten Energiekonzepte.	6
Tabelle 2	Objekte der Siedlung Weissenstein: Anzahl, A _E und GEAK-Plus Zertifizierung.	13
Tabelle 3	Übersicht der Varianten baulicher Massnahmen.....	18
Tabelle 4	Übersicht Heizwärmebedarf und Heizleistung inkl. Warmwasser nach Gebäudetyp.	56
Tabelle 5	Annahmen zum kumulierten Heizenergiebedarf.....	56
Tabelle 6	GEAK plus zertifizierte Gebäude	56
Tabelle 7	Wärmebedarf Warmwasser p.a. gemäss SIA 380/1:2009.	57
Tabelle 8	Heizenergiebedarf geplanter Neubauten (Zielwert gemäss SIA 380/1:2009)....	57
Tabelle 9	Parameter zur Heizlast in der Ausgangssituation.	58
Tabelle 10	Anzahl Radiatoren gemäss Gebäudetyp.....	58

Tabelle 11	verwendete L/W WP, S/W WP für die JAZ Berechnung.	59
Tabelle 12	Klimadaten	59
Tabelle 13	Eigenschaften der Bauteile gem. Sanierungsvarianten.	59
Tabelle 14	Annahmen zur Luftwechselrate bei 50 Pa Druckdifferenz bei den Sanierungsvarianten.....	60
Tabelle 15	Kostenschätzung zu den Sanierungsvarianten.	60
Tabelle 16	Fördersysteme in Bern und auf Bundesebene.	61
Tabelle 17	JAZ und Übertemperatur gem. Sanierungsvariante und Tech. zur Bereitstellung von Wärme.	62
Tabelle 18	Datengrundlage zur Gebäudetechnik.....	62
Tabelle 19	Datengrundlage Investitionskosten Holzsnitzelanlage.	63
Tabelle 20	Investition Wärmepumpenboiler.....	63
Tabelle 21	Investition Photovoltaik.	63
Tabelle 22	Datengrundlage Umweltbewertung.....	64
Tabelle 23	Energieversorgungsvarianten eines Typ D Gebäudes für die Berechnung der Treibhausgasemissionen.	64

1 EINLEITUNG

1.1 AUSGANGSLAGE

Die historische Siedlung Weissenstein, bestehend aus 230 Einfamilienhäusern und 40 Mehrfamilienhäusern, soll zukunftsgerecht saniert werden. In einer Machbarkeitsstudie, die durch die Eisenbahner-Baugenossenschaft Bern (EBG Bern) und die Baugenossenschaft Brünnen-Eichholz (BBE) in Auftrag gegeben wurde, werden verschiedene Varianten der energetischen Sanierung untersucht. Das Institut Energie am Bau (IEBau) der Fachhochschule Nordwestschweiz begleitet die Konzeptionierung der energetischen Sanierung. Zudem werden die Firma W2h (und weitere Unternehmungen) mit der Analyse von städtebaulichen und raumplanerischen Möglichkeiten beauftragt.

In einem ersten Schritt wurde im Rahmen einer studentischen Projektarbeit ein Grobkonzept mit drei Sanierungsvarianten erstellt [11]. Neben LWP und SWP wurde in dieser Arbeit die Möglichkeit einer engl. „Power to Gas“ Anlage untersucht. In einem Folgeprojekt werden nun die technisch ausgereiften Technologien (LWP und SWP) konkretisiert. Zudem werden mit einem Holzschnitzelkraftwerk und den Anschluss an ein Fernwärmenetz weitere Energieversorgungsvarianten betrachtet. Diese Varianten werden aufgrund von Kriterien der EBG Bern sowie der BBE bewertet.

Die Erarbeitung von Varianten einer denkmalgerechten Sanierung sowie von Energieversorgungsvarianten wird laufend mit den relevanten Akteuren abgesprochen. Dieser Begleitgruppe wohnen u.a. Vertreter des Stadtplanungsamts und des Amts für Denkmalschutz in Bern bei.

1.2 FRAGESTELLUNGEN

- A1 Welcher Energiebedarf ist bei verschiedenen Sanierungsvarianten zu erwarten?
- a. Welchen Energiebedarf weisen zurzeit einzelne Gebäudetypen auf?
 - b. Welche Sanierungsvarianten sind gegeben der Rahmenbedingungen sinnvoll?
 - i. Welche baulichen Massnahmen sind denkmalschutzkonform?
 - ii. Wie hoch ist der Energiebedarf gemäss den Sanierungsvarianten bei einzelnen Gebäudetypen?
 - iii. Wie hoch sind die Kosten zu den Sanierungsvarianten einzuschätzen?
 - c. Wie hoch ist die benötigte Heizleistung einzelner Gebäudetypen?
- A2 Welche Energiekonzepte sind zur Deckung des Energiebedarfs sinnvoll?
- a. Wie ist die Realisierbarkeit einzelner Energiekonzepte einzuschätzen?
 - b. Wie hoch sind die Investitionen zu den Energiekonzepten einzuschätzen?
 - c. Welcher Umweltnutzen ist zu erwarten?

1.3 VORGEHEN

Der Ist-Zustand wird mit Hilfe des Gebäudeenergieausweises der Kantone (GEAK) erarbeitet, wobei die unterschiedlichen Gebäudetypen berücksichtigt werden. Für eine gesamthafte Bewertung der Siedlung wird der ermittelte Heizenergiebedarf einzelner Gebäudetypen auf alle

Objekte skaliert. Zudem wird der GEAK für eine Bewertung erforderlicher baulicher Massnahmen zur Ertüchtigung der Gebäudehülle genutzt. Die Erkenntnisse aus dem GEAK plus fliessen anschliessend in das Gesamtkonzept der energetischen Sanierung ein. Die Arbeiten werden durch GEAK-Experten des IEBau sowie durch das Institut bau+energie (ibe) ausgeführt.

Die Sanierungsvarianten der Gebäudehülle und der Wärmeversorgungsvarianten werden aufgrund von Rückmeldungen aus der Begleitgruppe angepasst. Für die Bewertung der Varianten werden die Gebäudesimulationssoftware „Polysun“ sowie „Microsoft Excel“ verwendet.

2 GRUNDLAGEN

2.1 SITUATIONSPLAN

Die Mehrheit der Objekte in der Siedlung Weissenstein befindet sich im Eigentum zweier Baugenossenschaften. In Abbildung 1 sind die Gebäude der Eisenbahner Baugenossenschaft Bern (EBG Bern) und der Baugenossenschaft Brünnen Eichholz (BBE) ersichtlich. Für die Berechnung des Energiebedarfs sowie zur Ausarbeitung der Energieversorgungsvarianten werden, wie aus Abbildung 1 ersichtlich wird, neben Gebäude der EBG Bern und BBE auch Objekte berücksichtigt, die sich im Privateigentum befinden. Ausserhalb der Systemgrenze befinden sich Privatliegenschaften im Osten des Quartiers Weissenstein, die Alterssiedlung Lentulus sowie das Heilpädagogische Schulheim Bern (Weissenheim). Die Anwohnerzahl der Siedlung (innerhalb der Systemgrenze) beträgt ca. 1'376 Personen [34].

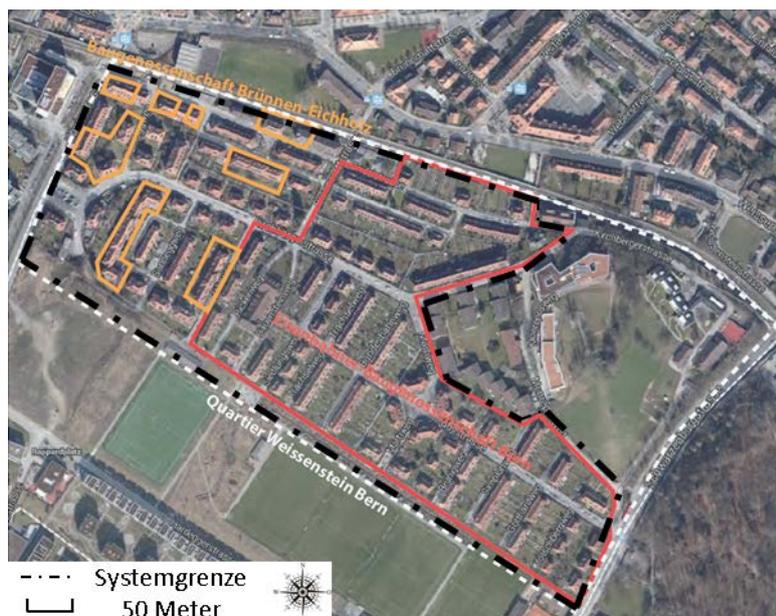


Abbildung 1 Besitzerverhältnisse und Systemgrenze Siedlung Weissenstein.

2.2 GEBÄUDETYPEN UND GEAK ZERTIFIZIERUNG

Es können 15 verschiedenen Gebäudetypen unterschieden werden (Abbildung 2) (Kategorisierung in Anlehnung [40]). Stellvertretend für die Gebäudekategorie A-D, M und N der EBB sowie für die Gebäudekategorie G, K der BBE werden je ein GEAK-Plus ausgestellt (siehe Tabelle 2 und Tabelle 5 im Anhang). Zur Gebäudekategorie L werden zwei GEAK-Plus erstellt. Aus diesem Grund wird im vorliegenden Bericht die Kategorie mL stellvertretend für das Mittelhaus der Kategorie L eingeführt. Für eine möglichst konservative Schätzung des Heizenergiebedarfs sowie der benötigten Heizleistung werden für die Untersuchung Eckhäuser bevorzugt.

Tabelle 2 Objekte der Siedlung Weissenstein: Anzahl, A_E und GEAK-Plus Zertifizierung.

Gebäudetypen	Anzahl		A_E [m ²]	
	Objekte	GEAK+	Pro Objekt	Σ Anzahl Objekte
A	32	1	121	3'864
B	119	1	133	15'837
C	55	1	152	8'376
D	8	1	200	1'598
E	21	-	150	3'150
F	12	-	150	1'800
G	12	1	493	5'911
H	16	-	150	2'400
I	1	-	374	374
J	1	-	706	706
K	11	1	596	6'553
L	10	2	686	6'948
M	1	1	709	2'805
N	4	1	121	4'224

Total	303	10		64'546
-------	-----	----	--	--------

Wie aus Tabelle 2 hervorgeht, decken die Gebäudekategorie A, B und C der EBG Bern einen Grossteil (über 2/3) der gesamten Anzahl Objekte ab. Eine Abschätzung der Energiebezugsfläche (A_E) zeigt aufgrund zahlreicher Mehrfamilienhäuser eine stärkere Verteilung zwischen den Gebäudetypen. Die Abschätzungen zur Energiebezugsfläche wurden aufgrund von Gebäudeplänen und Messungen vorgenommen [11, 40]. Dennoch decken die Einfamilienhäuser der Kategorie B und C über ein Drittel der gesamthaften A_E in der Siedlung Weissenstein ab.



Abbildung 2 Gebäudetypen der Siedlung Weissenstein Quelle: in Anlehnung an [39].

2.3 LANGFRISTIGE BAULICHE VERÄNDERUNGEN

Wie eingangs in Kapitel 1.1 erwähnt, wurde das Architekturbüro W2h mit der Entwicklung einer auf lange Sicht ausgerichteten raumplanerischen Strategie beauftragt. Unter Rücksichtnahme von Trends im Bevölkerungswachstum (Schweiz: positiv seit 1987[3] ; Stadt Bern: positiv seit 2007 [2]) werden Entwicklungspotentiale zur Verdichtung der Siedlung Weissenstein aufgezeigt.

Wie aus Abbildung 4 ersichtlich wird, könnten Neubauten am südlichen und nördlichen Siedlungsrand eine Antwort auf das ansteigende Bevölkerungswachstum sein. Entlang der Bahnlinie im Norden würden somit dreistöckige Gebäude mit einer Bruttogeschossfläche (BGF) von rund 8'800 m² entstehen. Am Südrand entspricht das Bauvorhaben einer BGF von rund

13'000 m². Innerhalb der Siedlung sind einstöckige Neubauten im Umfang einer BGF von ca. 2'300 m² und einer 130 m² BGF Altersresidenz mit zwei Stockwerken. Diese Veränderungen werden in der Entwicklung von Energiekonzepten mit einbezogen. Demgegenüber werden geplante Aufstockungen und innere Veränderungen in den Berechnungen vernachlässigt. Es wird davon ausgegangen, dass die daraus entstehenden Änderungen im Energiebedarf keinen relevanten Einfluss auf die Dimensionierung und Wahl der Wärmeerzeugung nehmen.

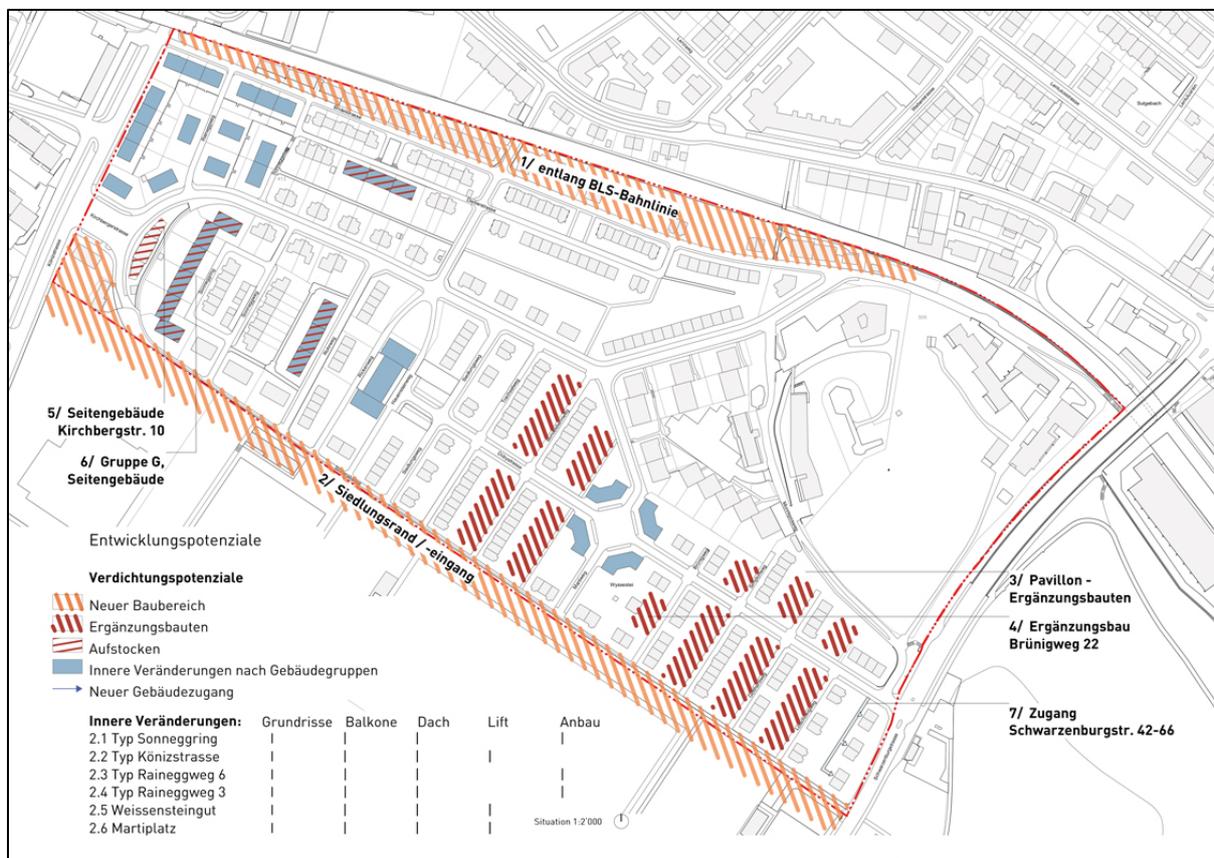


Abbildung 3 Mögliche bauliche Veränderungen nach Quelle: [40]

3 SANIERUNGSVARIANTEN

3.1 BEURTEILUNGSKRITERIEN

Folgender Kriterienkatalog bildet die Bewertungsgrundlage baulicher Massnahmen für die Sanierung der Siedlung Weissenstein:

- a) Energietechnische Faktoren
- b) Kostenabschätzung
- c) Einschränkungen für die Mieterschaft
- d) Zeit, Vielfalt der Akteure
- e) Platzbedarf
- f) Umweltnutzen
- g) Denkmalschutz

3.2 BAULICHE MASSNAHMEN AM GEBÄUDE

Mit dem Ziel, die Siedlung Weissenstein energetisch und denkmalgerecht zu sanieren wurden in Zusammenarbeit mit der Begleitgruppe (siehe Abschnitt 1.1) 3 Varianten ausgearbeitet. Der heutige energetische Zustand der Siedlung entspricht nicht den Anforderungen einer umfassenden Sanierung.

An den Gebäuden der EBG Bern wurden bisher einige Massnahmen zur energetischen Sanierung durchgeführt. Aus der Begehung der GEAK-ExpertInnen geht hervor, dass bei den EFH an der Kellerdecke sowie an der Innenseite des Satteldachs Dämmmaterialien installiert wurden. Zudem weisen die Gebäude eine 2-fache Isolierverglasung auf. Verbleibende Schwachpunkte sind neben der Fassade der teilweise oder ungedämmte Treppenuntersicht gegen den unbeheizten Keller. Die MFH aus dem Bestand der EBG Bern weisen meistens 2-fache Isolierverglasung auf. Das Satteldach sowie die Wände gegen unbeheizte Räume sind energetisch in einem schlechten Zustand (siehe weitere Ausführungen im GEAK-Beratungsbericht).

Bei den MFH, die sich im Besitz der BBE befinden, wurden teilweise die Fenster ersetzt. Die Wände gegen unbeheizt sowie das Dach weisen entweder keine oder lediglich eine sehr schwache Dämmung auf (siehe weitere Ausführungen im GEAK-Beratungsbericht).

Keine der Objekte weist eine Dämmung der Fassade auf. Aus einer beispielhaften Energiebedarfsrechnung für ein Gebäude des Typs D (Martiweg Nr. 21) gemäss Schweizer Norm wird ersichtlich, dass ca. 60 % der Wärmeverluste durch die Fassade entstehen [33].

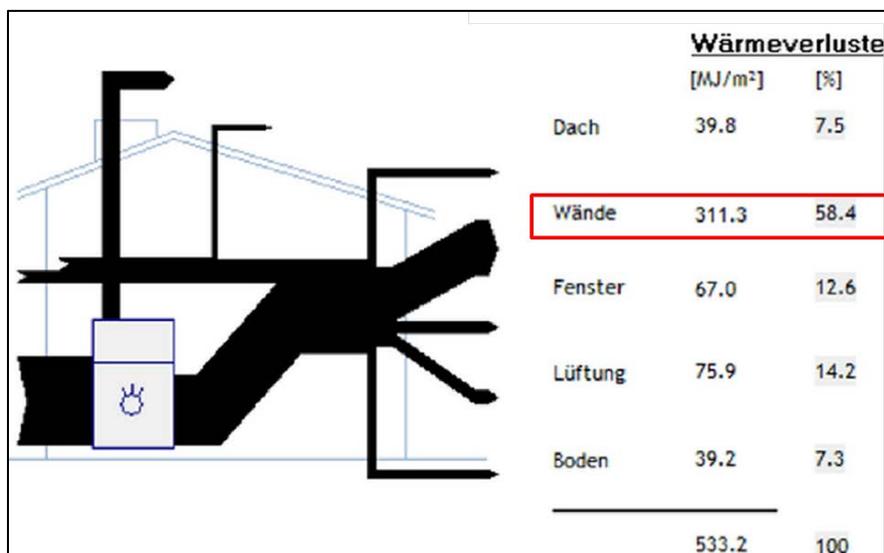


Abbildung 4 Wärmeverluste Gebäudetyp B (Ist-Zustand).

Zur Sanierung der Siedlung Weissenstein werden folgende Massnahmen in Betracht gezogen:

- Fensterersatz (3-fach Verglasung)
- Fassade Aussendämmung
- Kellerdeckendämmung (inkl. Treppenuntersicht)
- Dämmung oberste Geschossdecke bzw. Dach

- Einbau einer Komfortlüftung

Der Fokus liegt auf der Aussendämmung der Fassade, der Dachdämmung und einem Fensterersatz. Es wird zudem eine Variante mit einer Komfortlüftung inklusive Wärmerückgewinnung berücksichtigt. In Tabelle 3 sind die Varianten zusammengefasst. Alternativ käme auch eine Innendämmung der Gebäudehülle infrage. Die Umsetzung dieser Massnahme hätte jedoch grössere Einschränkungen für die Mieterschaft während der Durchführung sowie eine dauerhafte Reduktion der Wohnfläche zur Folge und wird daher nicht weiter berücksichtigt.

Mit dem Ziel, Denkmalschutz konforme Massnahmen an der Gebäudehülle zu erarbeiten, werden für die Aussenfassade Aerogel-Dämmstoffe mit äusserst geringer Wärmeleitfähigkeit vorgesehen. In der „minimalen“ Variante DKFF1 werden Anforderungen des Denkmalschutzes stark gewichtet. Dies bedeutet, dass durch den baulichen Eingriff die Bauteildicke der Mauer um lediglich ein Zentimeter zunimmt und daher keine sichtbaren Veränderungen entstehen (siehe Abbildung 5). In der Minimalvariante DKFF1 ist eine 10 mm dicke Dämmung der Fassade mit dem Dämmstoff Aerogel Vliese vorgesehen, wobei die Wärmebrücken bei den Fenstergewänden bestehen bleiben. Die Wärmedurchlässigkeit wird bei dieser Variante um ca. 45 % reduziert (siehe Abbildung 5).

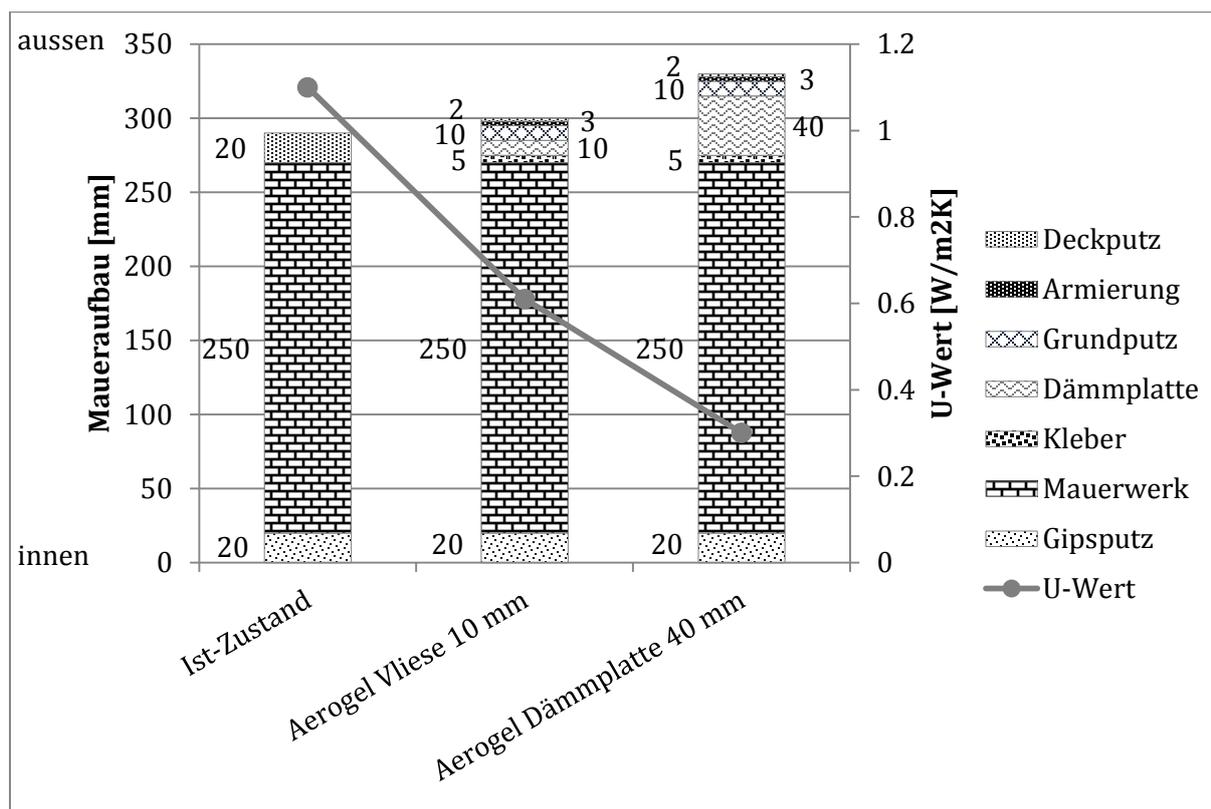


Abbildung 5 Mauer Aufbau inkl. U-Werte für Ist-Zustand und Sanierungsvarianten DKFF1 und DKFF4.

In Variante DKFF4 wird eine vier cm dicke Aerogel Dämmplatte zur Aussendämmung verwendet und die Wärmebrücken der Fenstergewände werden kaschiert. Die Variante stellt ein Kompromiss zwischen einer energetischen Sanierung und den Anforderungen des

Denkmalschutzes dar. Die Mauerdicke erhöht sich hierbei im Vergleich zum Ist-Zustand um ca. vier cm und die Wärmedurchlässigkeit wird um ca. 73 % reduziert (siehe Abbildung 5). Aufgrund der Mauerdicke müssen die Fenstergewände geringfügig aufgedoppelt werden.

Durch eine Dachdämmung und einem Fensterersatz werden Anforderungen des Denkmalschutzes nicht nennenswert tangiert. In allen Varianten DKFF1, DKFF4 und DKFF4+L ist vorgesehen, die bestehenden Fenster mit 2-facher Wärmeschutzverglasung aus dem Jahre 2000 durch Fenster mit dreifacher Wärmeschutzverglasung zu ersetzen. Das Dach wird abgedeckt und von aussen mit einer acht cm Holzfaserdämmung gedämmt. Zudem wird der Gaubendeckel mit einer 20 cm Dämmung versehen.

Eine mechanische Lüftung kann den Wohnkomfort erhöhen und den Energieverbrauch reduzieren. Bei Neubauten ist ein kontrollierter Luftwechsel bereits heute die Regel und nicht eine Ausnahme. Für die Betrachtung einer mittleren bis langen Frist wird daher mit DKFF4+L eine Komfortlüftung berücksichtigt. Eine bauliche Anforderung für die Funktionsfähigkeit einer mechanischen Lüftung ist grundsätzlich eine luftdichte Gebäudehülle [30]. Eine vorliegende Messung eines Bestandsgebäudes der Siedlung Weissenstein zeigt eine relativ grosse Undichtigkeit der Gebäudehülle [20]. Für die Installation einer mechanischen Lüftung sind somit bauliche Massnahmen zur Abdichtung der Gebäudehülle notwendig. Zudem ist zu klären, ob bestehende Schächte (z.B. Kamin) für die Verlegung von Luftkanälen genutzt werden können. Der mit den Massnahmen zusammenhängende Aufwand kann in der Kostenabschätzung nicht berücksichtigt werden.

Tabelle 3 Übersicht der Varianten baulicher Massnahmen.

Varianten	Bauliche Massnahmen	
DKFF1	<ul style="list-style-type: none"> • Teilweise Fensterersatz • 1 cm Aerogel Vliese an Fassade 	<ul style="list-style-type: none"> • 8 cm Holzfaser-Dämmung beim obersten Geschoss • Bei Notwendigkeit Dämmung Untersicht-Treppe gegenüber Keller • Dämmung gegen unbeheizte Räume
DKFF4	<ul style="list-style-type: none"> • Meistens Fensterersatz • Teilweise Kaschierung von Wärmebrücken • 4 cm Aerogel Dämmplatte an Fassade 	
DKFF4+L	<ul style="list-style-type: none"> • Gleiche Massnahmen wie DKFF4 • Komfortlüftung inklusiver Wärmerückgewinnung 	

4 ENERGETISCHER IST- ZUSTAND

4.1 ENERGIEMIX

In der Siedlung Weissenstein basiert ein Grossteil der Endenergie auf dem Energieträger Erdöl (siehe Abbildung 6). Die Heizenergie wird in den Gebäuden der EBG Bern ausschliesslich durch Ölheizungen erzeugt. In den Gebäuden der BBE erfolgt die Wärmeerzeugung mit Gas. Das Warmwasser wird mit einer Ölheizung, in einigen Gebäuden mit einer Gasheizung oder durch einen Elektroboiler erzeugt. Ein Grossteil des Stromverbrauchs ist auf den Gerätestrom (Beleuchtung, Haushaltsgeräte, Kleingeräte und Elektronik) zurückzuführen. Zudem ist die Hilfsenergie ein weiterer Anteil des Verbrauchs an elektrischer Energie im Bereich Heizung

Lüftung und Klima (HLK). Die in Abbildung 6 dargelegte Energiebilanzierung umfasst Energie für Heizung, Warmwasser, Lüftung, Hilfsbetriebe und Haushaltsstrom (siehe Abschnitt A.1.1).

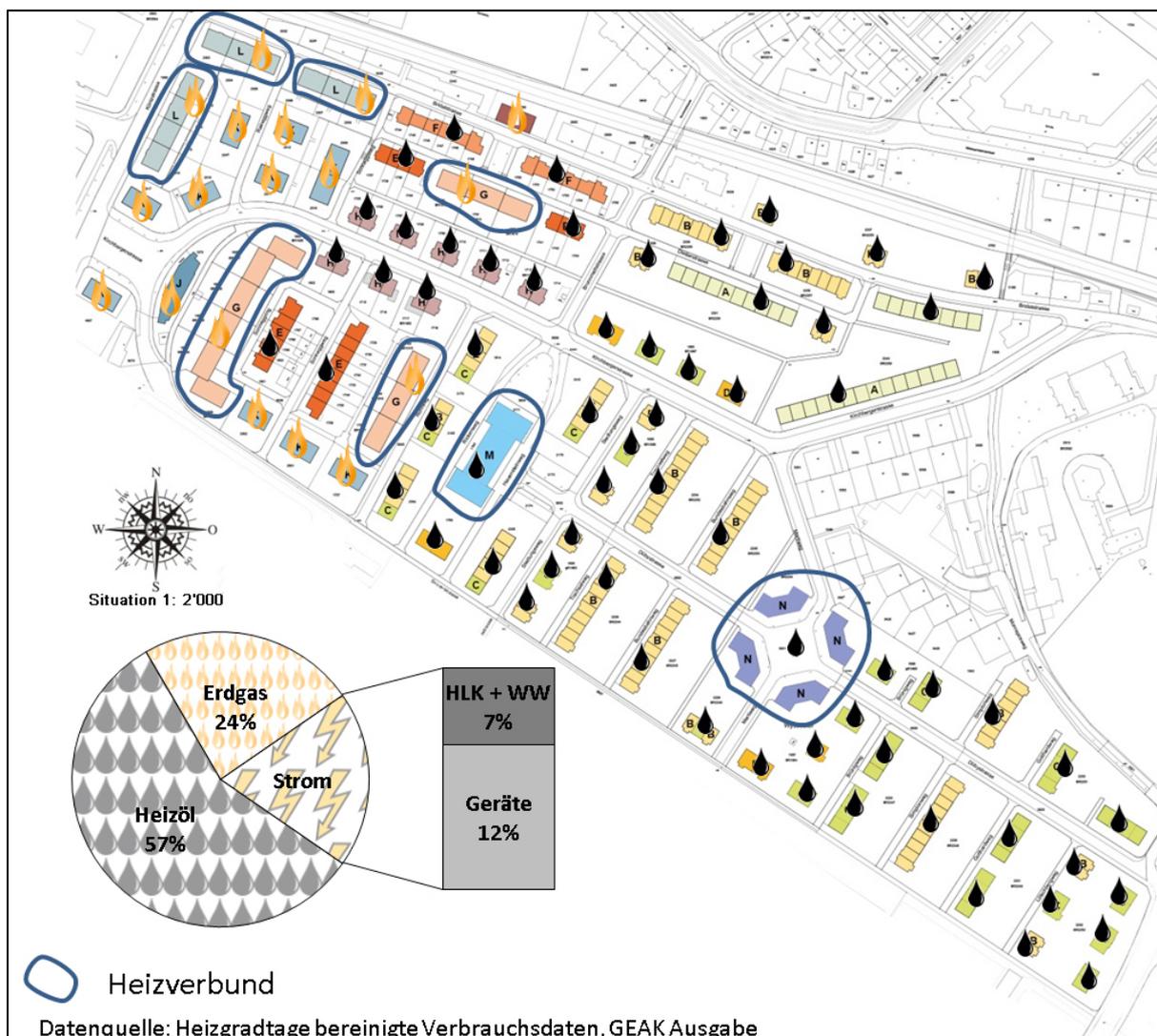


Abbildung 6 Energiemix Siedlung Weissenstein (Ist-Zustand).

4.2 ENERGIEBEDARF DER GEBÄUDETYPEN

In Abbildung 7 ist der Energiebedarf gemäss Gebäudekategorie für die Erzeugung von Heizenergie und Warmwasser aufgeführt. Die Datengrundlage obliegt einerseits Einschätzungen der GEAK-Experten, andererseits wurden fehlende Angaben zu bestimmten Gebäudekategorien sowie der Energiebedarf für die Bereitstellung von Warmwasser gemäss Tabelle 4 resp. Tabelle 5 ergänzt.

Bei allen Gebäudetypen wird der auf der Norm SIA 380/1 [33] basierende Grenzwert für den Heizwärmebedarf von Neubauten um ein Vielfaches überschritten. Der höchste Energiebedarf für Heizenergie und Warmwasser ist bei den Gebäudetypen G und I auszumachen. Zur Gebäudekategorie mL wird der Energiebedarf vergleichsweise tief eingeschätzt. Der relativ tiefe Heizenergiebedarf bei den Gebäudetypen L und mL ist teilweise auf einen Ersatz der Fenster mit

einer 3-fach Verglasung aus dem Jahre 2013 zurückzuführen. Zudem kann die Differenz in der unterschiedlichen Anordnung als Eck- und Mittelgebäude begründet werden. Der Warmwasserverbrauch beruht auf Standardwerte gemäss der SIA Norm [33] (siehe Tabelle 6 unter A.2.1.1).

Die Grenzwertberechnung aus dem GEAK orientiert sich an der SIA Norm für thermische Energie für Hochbauten [33]. Aus der Grafik wird ersichtlich, dass die Mehrfamilienhäuser einen tieferen Grenzwert aufweisen als dies bei Einfamilienhäusern der Fall ist (Abbildung 7). Dies ist auf eine tiefere Gebäudehüllziffer der Mehrfamilienhäuser zurückzuführen. Aufgrund eines Steigungsfaktors ergibt sich ein tieferer Grenzwert für kompakte Bauten mit einer entsprechend kleineren Gebäudehüllzahl [33].

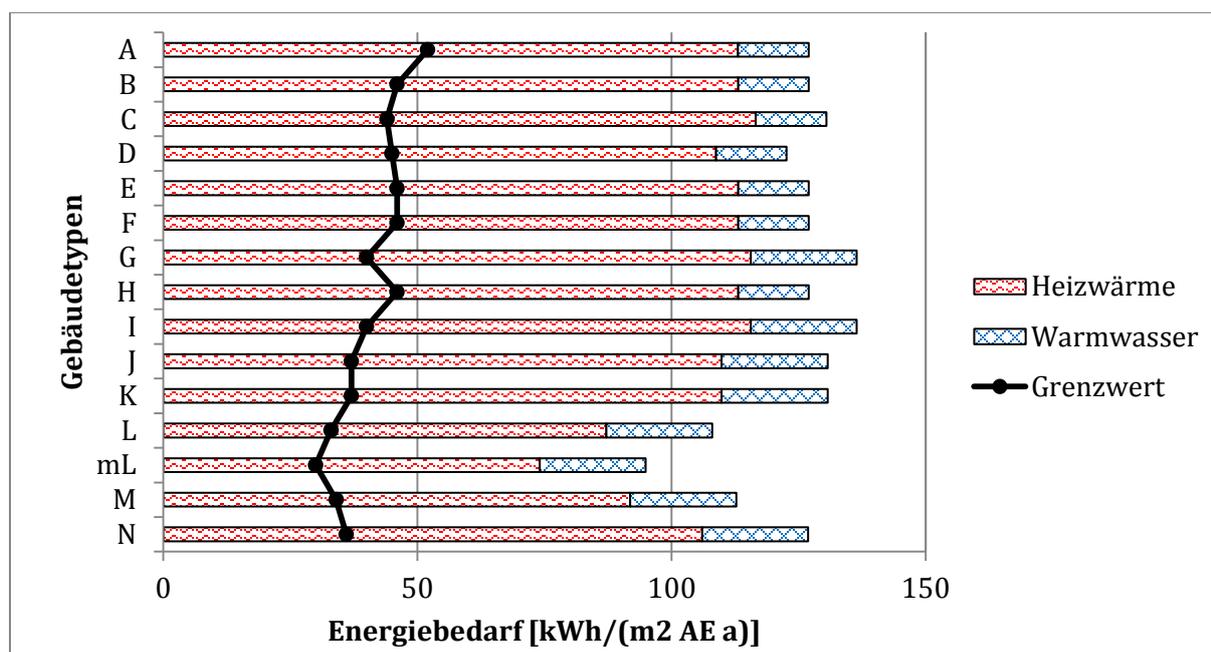


Abbildung 7 Ist- Zustand: Abschätzung Energiebedarf Siedlung Weissenstein.

4.3 AGGREGIERTER ENERGIEBEDARF

Die Abschätzung zum kumulierten Heizenergiebedarf inklusiver Warmwasser ergibt 8'094 MWh p.a. gesamthaft für die Siedlung Weissenstein (gemäss Systemgrenze siehe Abbildung 1 im Abschnitt 1.1.). Dies entspricht einem jährlichen Wärmebedarf von 125 kWh/m² AE für Heizung und Brauchwasser. Der Berechnung liegen die Annahmen gemäss A.2.3.3 zugrunde. Die kumulierte Heizleistung (ohne die Bereitstellung von Warmwasser) beträgt 2.72 MW und wurde gemäss der Methodik in A.1.2 und basierend der Datengrundlage in A.2.1.2 berechnet.

Insgesamt können 59 % des gesamten Heizenergiebedarfs inkl. WW der Gebäudetypen B, C, K und G zugeordnet werden (siehe Abbildung 8).

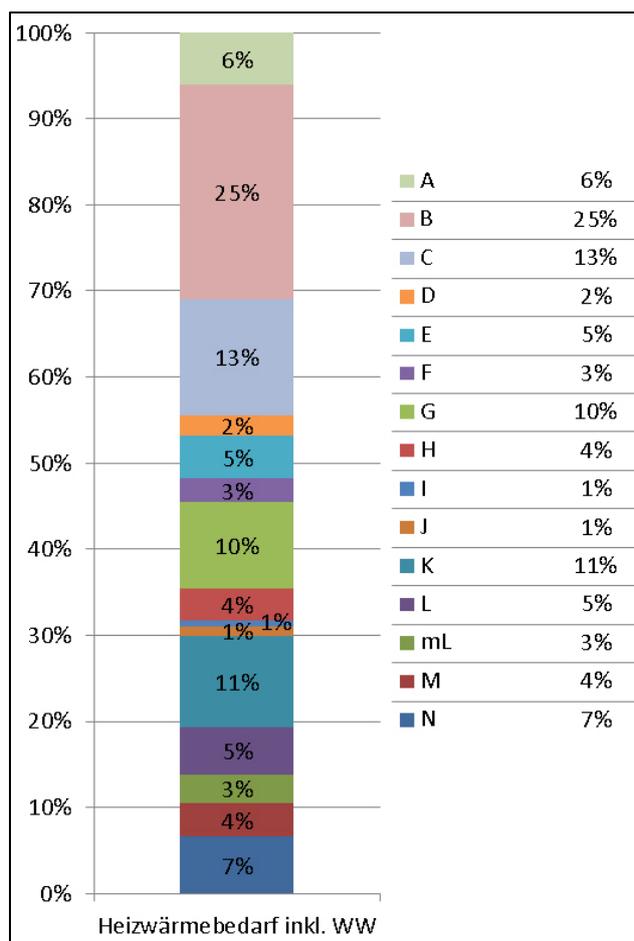


Abbildung 8 Anteil je Gebäudetyp am Gesamtbedarf Heizenergie und Warmwasser der Siedlung Weissenstein. Beispiel: Alle Gebäude der Kategorie C zusammen verursachen rund 13 % des Wärmebedarfs der Siedlung.

4.4 UMWELTAUSWIRKUNGEN

Der Energieverbrauch aus der gesamthaften Siedlung Weissenstein entspricht einer Primärenergie aus nicht erneuerbaren Energiequellen von ca. 59 Millionen MJ Öl Äquivalente ($\approx 254 \text{ kWh Öl-eq}/(\text{m}^2 \text{ A}_E \text{ a})$) respektive 2.6 Milliarden UBP ($\approx 40'203 \text{ UBP}/(\text{m}^2 \text{ A}_E \text{ a})$) oder 2'800 Tonnen CO_2 Äquivalente Treibhausgasemissionen ($\approx 43 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}/(\text{m}^2 \text{ A}_E \text{ a})$). Die durchschnittliche Umweltbelastung aus dem privaten Konsum einer Person beträgt ca. 20 Mio. UBP p.a. [21]. Der Anteil für Heizung, Warmwasser, Lüftung (HWL), und Gerätestrom (inkl. Beleuchtung) eines Quartiersbewohners entspricht somit 9.5 % der gesamthaften Umweltbelastung für den privaten Konsum einer Person p.a. (ausgehend von einer Einwohnerzahl von 1'376 [34]). Das Ziel für eine 2'000 Watt-Gesellschaft beträgt u.a. für die Schweiz eine Tonne $\text{CO}_2 \text{ eq}$. pro EinwohnerIn bis 2100 (Stand 2013: 7.2 Tonnen) [10]. Die $\text{CO}_2 \text{ eq}$. p.a. für HWL und Gerätestrom eines Bewohners der Siedlung Weissenstein entsprechen somit bereits heute über 2 Tonnen (ausgehend einer Einwohnerzahl von 1'376 [34]).

Die berechnete Umweltbelastung bezieht sich auf ein Jahr und wurde mithilfe der Ökobilanzdaten aus der Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren (KBOB) berechnet [22].

5 ENERGIEEFFIZIENZ DURCH DENKMALSCHUTZGERECHTE ERNEUERUNG

5.1 HEIZENERGIEBEDARF

Die GEAK-Klassierung zur Effizienz der Gebäudehülle basiert auf einer Norm-Heizenergiebedarfsrechnung [33]. Bei diesem Verfahren wird der Heizenergiebedarf in das Verhältnis zum Grenzwert für Neubauten gesetzt und entsprechend der Grenzwertreichung in Klassen unterteilt (A-G). Zwischen den Klassen C und B wird der Grenzwert für Neubauten zu 100% erreicht. Gemäss SIA 380/1 liegt der Grenzwert für Erneuerungen bei 125 % [33].

In Abbildung 9 sind die Ergebnisse zum Gebäudeenergieausweis gemäss Gebäudekategorie und Sanierungsvariante dargestellt. Aus der Grafik wird ersichtlich, dass der Heizenergiebedarf der untersuchten Eck-Mehrfamilienhäuser (G, K, L, M, N) im Vergleich zu den Eck-Einfamilienhäusern (A-D) etwas höher ausfällt. Der Grenzwert wird im Ist-Zustand zwei bis dreimal überschritten. Auch bei der Sanierungsvariante DKFF1 wird der zurzeit gültige Grenzwert zum Heizwärmebedarf bei Neubauten nicht eingehalten. Mithilfe der Sanierungsvariante DKFF4 kann der Grenzwert zu den meisten untersuchten Gebäudekategorien eingehalten werden. Gemäss der Sanierungsvariante DKFF4+L wird der Grenzwert von allen Gebäudekategorien unterschritten.

Sanierungsmassnahmen mit resultierender Verbesserung der GEAK-Klassierung um mindestens zwei Klassen werden im Kanton Bern finanziell unterstützt (siehe Tabelle 14 im Abschnitt A.2.3.3). Wie aus Abbildung 9 hervorgeht, führt die Entscheidung für die Sanierungsvariante DKFF4 oder DKFF4+L bei mehreren Gebäudetypen zu höheren Förderbeiträgen.

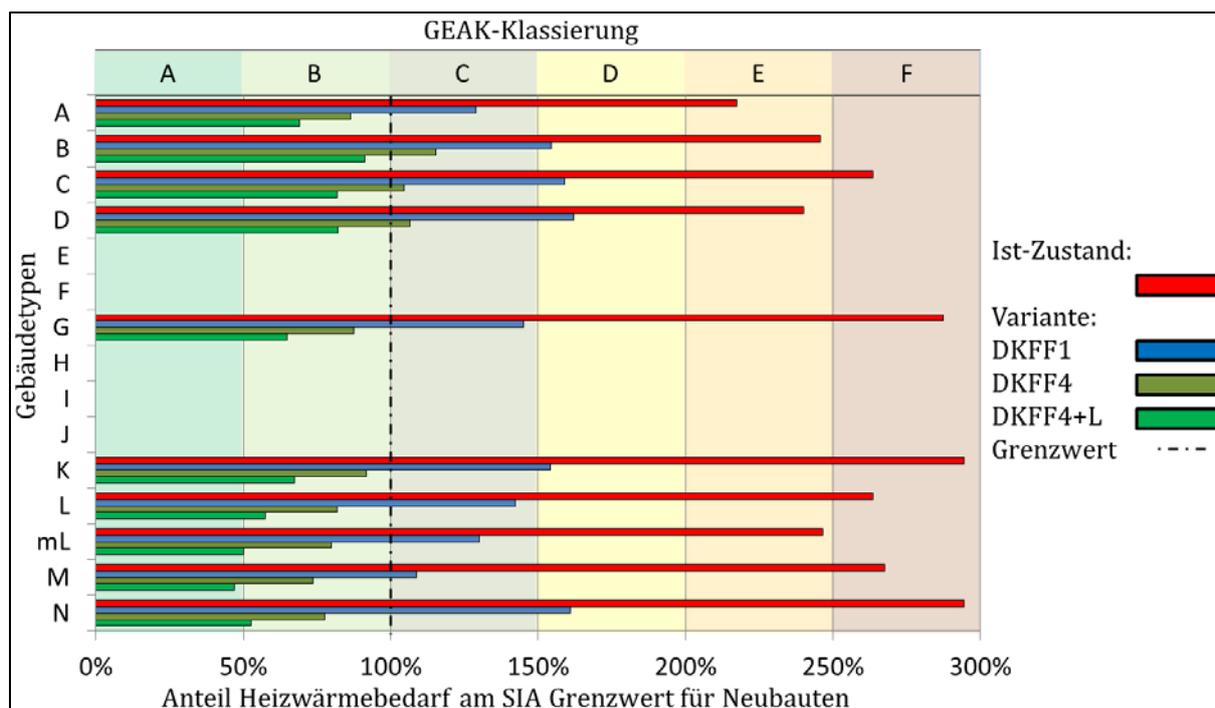


Abbildung 9 GEAK Klassierung Effizienz Gebäudehülle.

5.2 AGGREGATION HEIZENERGIEBEDARF UND HEIZLEISTUNG

Für die Skalierung des Heizenergiebedarfs einzelner Gebäudetypen auf die gesamthafte Siedlung Weissenstein werden Annahmen zu Kategorien ohne GEAK-Plus getroffen (E, F, H, I und J; siehe Tabelle 4).

In Abbildung 10 sind der kumulierte Heizwärmebedarf inklusive Wärmebedarf für Warmwasser sowie die kumulierte Heizleistung inklusive Leistungszuschlag für Brauchwarmwasser dargestellt. Im Anhang sind der aggregierte Wärmebedarf und die Heizleistung inklusive Warmwasserzuschläge pro Gebäudetyp aufgeführt (siehe Tabelle 4).

Der jährliche Bedarf an Heizenergie und Warmwasser im Ist-Zustand entspricht $125 \text{ kWh/m}^2 A_E$. Der summierte Heizenergiebedarf der Siedlung kann mithilfe der Sanierungsvarianten DKFF1 um 36 % auf $80 \text{ kWh}/(\text{m}^2 A_E \text{ a})$, mit Variante DKFF4 um 53 % auf $59 \text{ kWh}/(\text{m}^2 A_E \text{ a})$ und mit Variante DKFF4+L um 61 % auf $49 \text{ kWh}/(\text{m}^2 A_E \text{ a})$ reduziert werden.

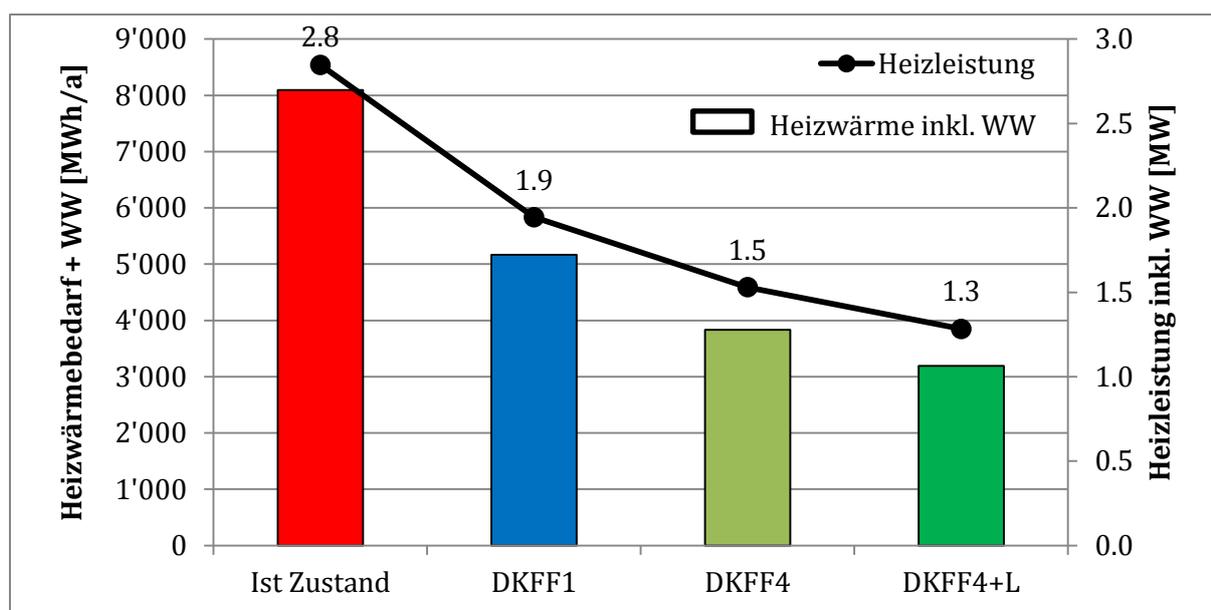


Abbildung 10 Kumulierter Heizenergiebedarf und Heizleistung inkl. Produktion von Warmwasser.

5.3 HEIZLEISTUNG UND WÄRMEABGABELEISTUNG EINZELNER GEBÄUDEKATEGORIEN

Für die Einschätzung geeigneter Erzeugervarianten wird beispielhaft anhand von einzelnen Gebäudekategorien die Abgabeleistung bestehender Radiatoren der benötigten Heizleistung gegenübergestellt. Die Abgabeleistung wird in Abhängigkeit von variierenden Vorlauftemperaturen (bei gleichbleibender Temperaturspreizung von 10 Kelvin) dargestellt. Für den Vergleich der Effizienz unterschiedlicher Erzeugersysteme wird die Jahresarbeitszahl (JAZ) entsprechend der Vorlauftemperatur sowie des Heizenergiebedarfs einer Luft/Wasser- und einer Sole/Wasser-Wärmepumpe abgebildet. Die JAZ drückt das Verhältnis zwischen der kumulierten abgegebenen thermischen Energie zur aufgenommenen elektrischen Energie p.a. aus.

In Abbildung 11 ist das Ergebnis zu den Einfamilienhäusern der Kategorien A, B, C und D dargestellt. Aus der Grafik geht hervor, dass für den Ist-Zustand die abgegebene Wärmeleistung der Radiatoren nicht der benötigten Heizleistung entspricht, sobald die Vorlauftemperatur von 50 °C (bei Gebäudetypen B und C) respektive 45 °C (Gebäudetypen A und D) unterschritten wird. Infolge der Sanierungsmassnahme C sind Niedertemperaturen von 35 °C ausreichend zur Deckung der notwendigen Heizleistung gemäss Berechnung. Die Vorgehensweise zur Berechnung und die Datengrundlage sind aus dem Anhang zu entnehmen (siehe A.1.2, A.1.3 und für die Datengrundlage A.2.2).

Die über die Sanierungsvarianten gemittelte Jahresarbeitszahl zeigt, welche Energieeinsparungen bei einer Reduktion der Vorlauftemperatur beim Heizsystem zu erwarten sind. Wie aus Tabelle 9 ersichtlich wird, wird in dieser beispielhaften Berechnung eine für den Ist-Zustand ausreichend dimensionierte WP berücksichtigt. Eine Reduktion der Vorlauftemperatur von 50 °C (entsprechend dem Ist-Zustand) auf 40 °C (bei Umsetzung der Sanierungsvariante DKFF4) führt durchschnittlicher bei den Gebäudetypen (A-D) zu einer Verbesserung der JAZ der Sole/Wasser-Wärmepumpe (S/W-WP) von 17 % resp. 13 % bei der Luft/Wasser-Wärmepumpe (L/W-WP). Eine Reduktion von 50 °C auf 35 °C lässt eine

Verbesserung in der über die Gebäudevarianten gemittelten JAZ von 28 % für die S/W-WP respektive 22 % bei der L/W-Wärmepumpe erwarten.

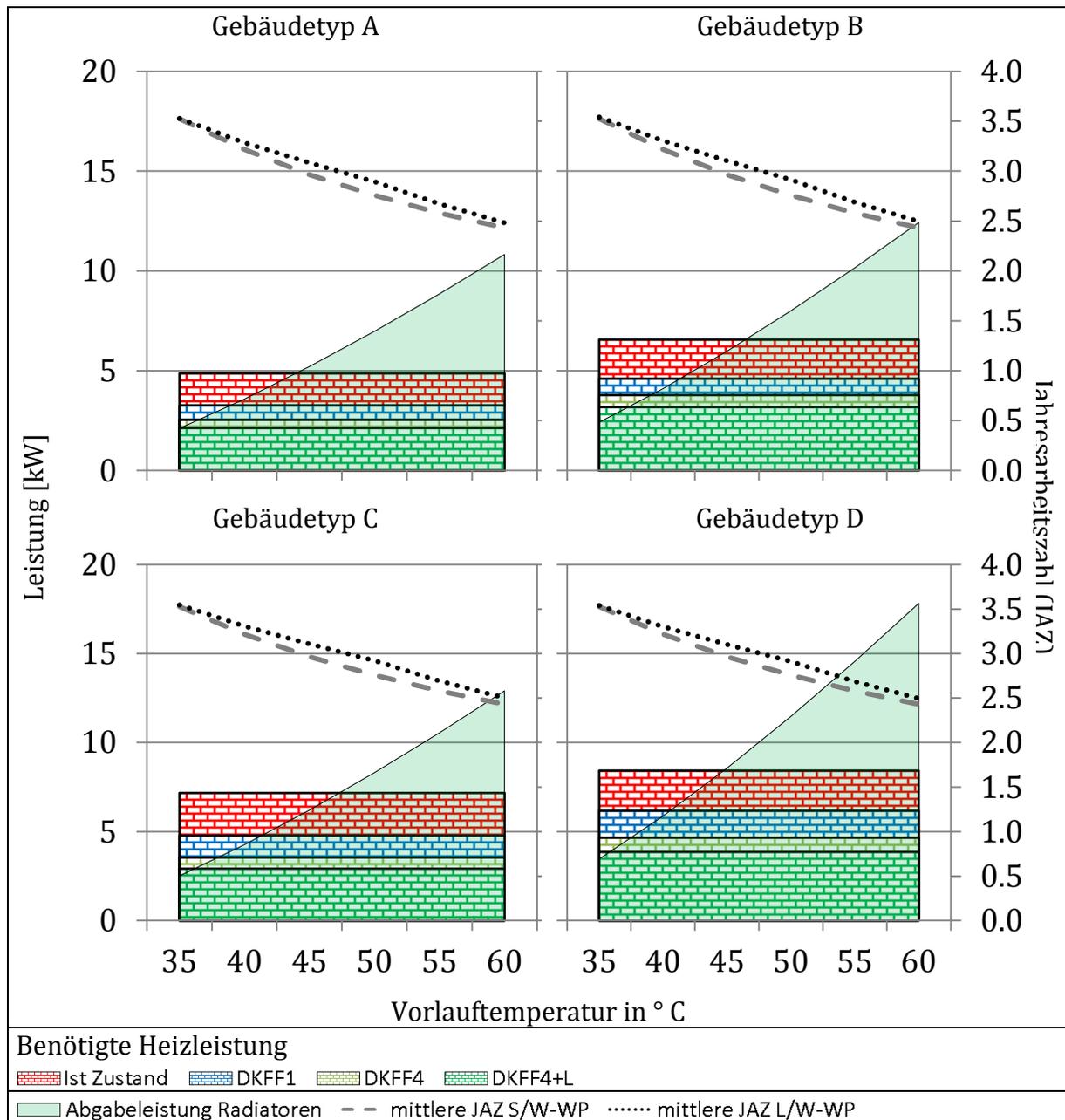


Abbildung 11 Gebäudetypen A, B, C, D: Heizleistung basierend auf [29] vs. Wärmeabgabe der Radiatoren bei unterschiedlicher Vorlauftemperaturen.

6 WÄRMEVERSORGUNGSKONZEPTE

6.1 ENTWICKLUNGSFELDER

Für die Erarbeitung von Wärmeversorgungsvarianten werden die Gebäude der Siedlung in fünf Entwicklungsfelder unterteilt. Zudem werden die geplanten Bauvolumen am südlichen und nördlichen Siedlungsrand gesondert von dem heutigen Gebäudebestand betrachtet (siehe auch Abschnitt 2.3). Für jedes Entwicklungsfeld werden individuelle Energieversorgungslösungen erarbeitet, wobei eine kurz-/mittelfristige als auch eine langfristige Planungsperspektive eingenommen wird.

Wie in Abbildung 12 ersichtlich wird, beträgt der berechnete Heizenergiewärmebedarf für Heizung und Warmwasser für die Objekte im Süden der Siedlung 62 % (Felder 1-4, Anteil A_E 60 %). Der Wärmebedarf im Norden der Siedlung entspricht damit einem Anteil von 38 % (Felder 5, Anteil A_E 40 %).

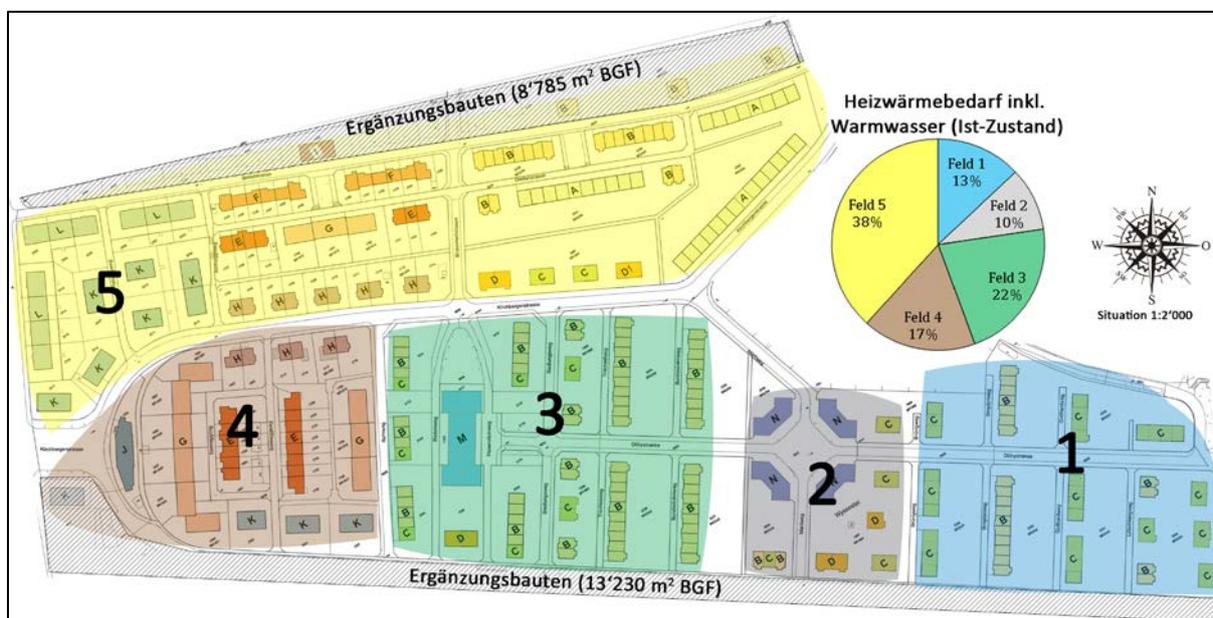


Abbildung 12 Definition der fünf Entwicklungsfelder, prozentuale Verteilung des Heiz- und Warmwasserwärmebedarfs, basierend auf dem Ist-Zustand der Gebäude.

Für die zurzeit primär dezentrale Energieversorgung, basierend auf Öl und Erdgas, wird eine Entwicklung hin zu einem oder mehreren Energienetzen angestrebt. Das Konzept unterscheidet eine kurz-/mittelfristige als auch drei langfristige Entwicklungspfade und wird somit einem gestuften Vorgehen gerecht (siehe Abbildung 13). Zeitlich knüpft der mittelfristige Entwicklungspfad an den Ist-Zustand (vgl. Kapitel 3) der Siedlung an. In dieser Perspektive werden Entscheidungshilfen für den laufenden Ersatz von Öl- und Gasheizungen geliefert. Aufbauend auf den kurz-/mittelfristigen Massnahmen werden in einem längerfristigen Zeithorizont die geplanten baulichen Veränderungen (vgl. Abschnitt 2.3) im Konzept der Energieversorgung aufgenommen.

Die Entwicklungspfade implizieren einen Wandel in der Technologie zur Bereitstellung von Heizenergie und Warmwasser. In der kurzen bis mittleren Frist werden in den Feldern 1 und 3 bestehende Ölheizungen in den EFH mit Luft/Wasser-Wärmepumpen (LWP) ersetzt und zu 12 Energienetzen zusammengeführt. Die Abstände zwischen den Häuserreihen eignen sich hinsichtlich der Lärmemissionen besonders gut für den Einsatz von LWP. Die Öl-Heizungen der Mehrfamilienhäuser M (Hauensteinweg 12) und N (Martiweg 9-17) wurden im Jahre 1996 resp. 2002 installiert und müssen in absehbarer Zeit ersetzt werden. Für das gesamte Feld zwei und das MFH (M) aus Feld drei sind aus diesem Grunde kurz-/mittelfristig Energieverbünde basierend auf zwei Sole/Wasser-Wärmepumpen (SWP) vorgesehen. Auch bei der Bereitstellung von Warmwasser findet ein technologischer Wechsel statt. Anstelle von Elektro-Boilern werden für die Felder eins bis drei Wärmepumpenboiler eingesetzt. In Abschnitt 6.2 wird dieses kurz-/mittelfristige Vorhaben präzisiert und in Abhängigkeit von den Sanierungsvarianten auf die technische Machbarkeit bewertet.

Längerfristig werden drei Varianten zur Bereitstellung von Heizenergie unterschieden.

In **Variante 1** wird mithilfe zweier Sondenfelder Niedertemperaturwärme aus dem Erdreich genutzt. Ein Sondenfeld am südlichen Rand der Siedlung bedient die Wärmepumpe(n) für die Gebäude der Felder eins bis vier sowie die anliegenden geplanten Neubauten. Die Wärmepumpe(n) für die Gebäude des Feldes fünf sowie die anliegenden Neubauten nutzen durch ein Sondenfeld am Nordrand der Siedlung Niedertemperaturwärme aus dem Erdreich. Die LWP aus den Feldern eins und drei werden längerfristig gänzlich mit SWP ersetzt. Mithilfe von Photovoltaik-Thermischen Modulen (PVT) Installationen situiert auf den neu entstehenden Dachflächen der Ergänzungsbauten wird Elektrizität sowie Wärme generiert. Die gewonnene Wärme dient einerseits zur Regeneration der Sondenfelder. Andererseits besteht die Möglichkeit, Solarwärme auf niedrigem Temperaturniveau zur quellenseitigen Unterstützung der Wärmepumpen einzusetzen und damit den Wärmeentzug aus den Sondenfeldern zu verringern.

In **Variante 2** wird die Heizenergie sowie Wärmeenergie zur Warmwasserbereitung während der Heizperiode durch ein Holzsnitzelkraftwerk bereitgestellt.

Für die **Variante 3** wird der Anschluss an ein nahegelegenes Fernwärmenetz in Betracht gezogen.

In den Varianten zwei und drei wird die nutzbare Dachfläche der Ergänzungsbauten für die Installation von PV-Modulen verwendet und die Wärmeverteilung durch ein zentrales Verteilnetz sichergestellt. Längerfristig werden in allen Varianten Elektroboiler durch Wärmepumpenboiler ersetzt. In Abschnitt 6.2 werden die Entwicklungspfade mit längerfristigem Zeithorizont präzisiert und auf die technische Machbarkeit hin geprüft.

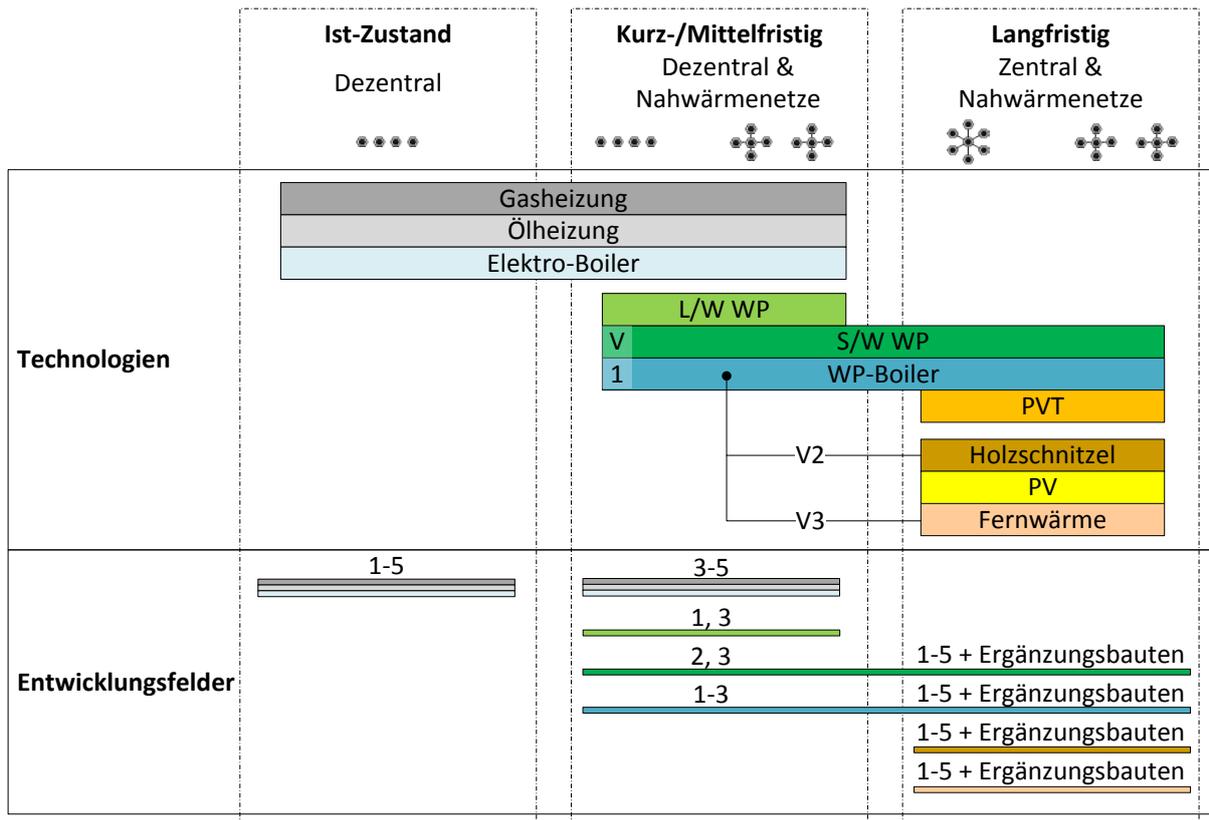


Abbildung 13 Entwicklungspfade Energieversorgung und -verteilung.

Der Wärmeenergiemix der Siedlung verändert sich basierend auf den Entwicklungspfaden von primär Erdgas und Erdöl als Energieträger hin zu Elektrizität (V1), Holz (V2) oder Fernwärme (V3) (siehe Abbildung 14). Die Fernwärme setzt sich aus den Energiequellen Gas, Holz und einer Kehrlichtverbrennung zusammen (siehe A.2.6).

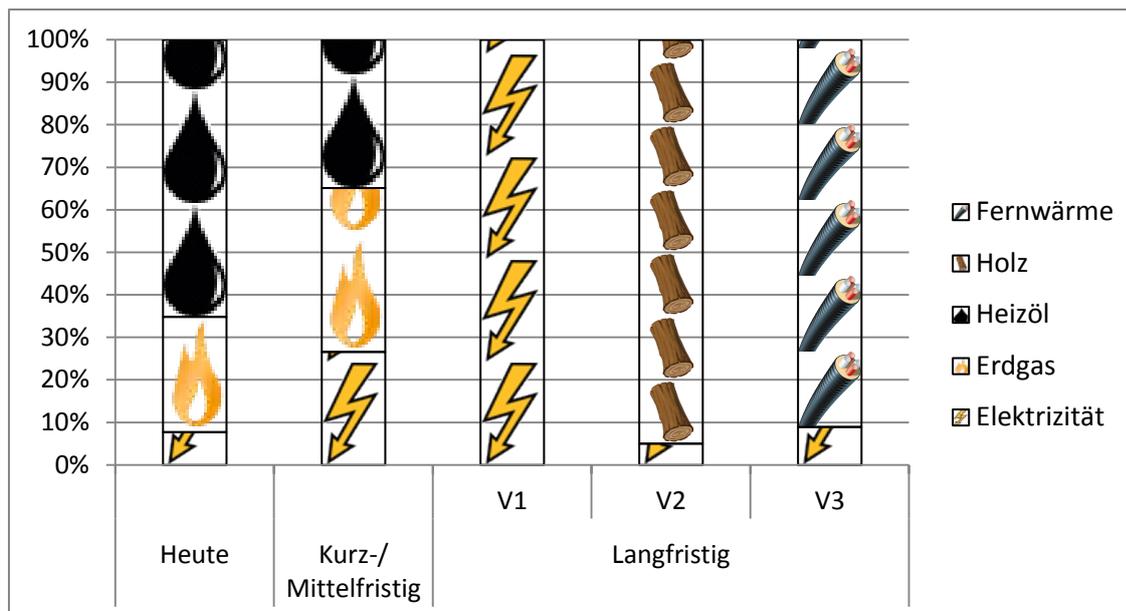


Abbildung 14 Wärmeenergiemix Siedlung Weissenstein Entwicklungspfade (Gebäudehülle: Ist-Zustand).

6.2 TECHNISCHE MACHBARKEIT KURZ- UND MITTELFRISTIGER VARIANTEN DER WÄRMEVERSORGUNG

6.2.1 ÜBERSICHT

Innerhalb des kürzeren Zeithorizonts werden Entscheidungshilfen für den Ersatz von Ölheizungen aufgezeigt, die bereits in den nächsten Jahren das Ende ihres Lebenszyklus erreicht haben. Es wird somit eine Technologie zur Zeitüberbrückung notwendig, die vor der später vorgesehenen Erschließung des südlichen und nördlichen Siedlungsrandes eingesetzt werden kann.

LWP sind relativ kostengünstig und mit einem geringen baulichen Aufwand verbunden. Aus diesen Gründen sind für die kurz- und mittelfristige Erneuerung insgesamt 12 Wärmepumpen für die ca. 140 EFH in Feld eins und drei vorgesehen (siehe Abbildung 15). Die Energieeffizienz sowie die Lärmbelastung der LWP sind vom Wärmebedarf der zu versorgenden Gebäude abhängig. In Abschnitt 6.2.2 werden diese Kriterien in Abhängigkeit von den Sanierungsvarianten aus Kapitel 3 untersucht und das Vorhaben hinsichtlich der technischen Umsetzbarkeit bewertet. Basierend auf den Entwicklungspfaden ist für das gesamte Feld zwei und das Herrschaftsgebäude (M) aus dem Feld drei eine Energieversorgung basierend auf SWP vorgesehen (siehe Abbildung 15). Die Energieeffizienz der Wärmepumpe sowie die Anzahl benötigter Sonden sind vom Wärmebedarf der versorgten Gebäude abhängig. Diese Kriterien dienen als Grundlage für die Einschätzung der technischen Machbarkeit und werden in Abschnitt 6.2.3 behandelt.

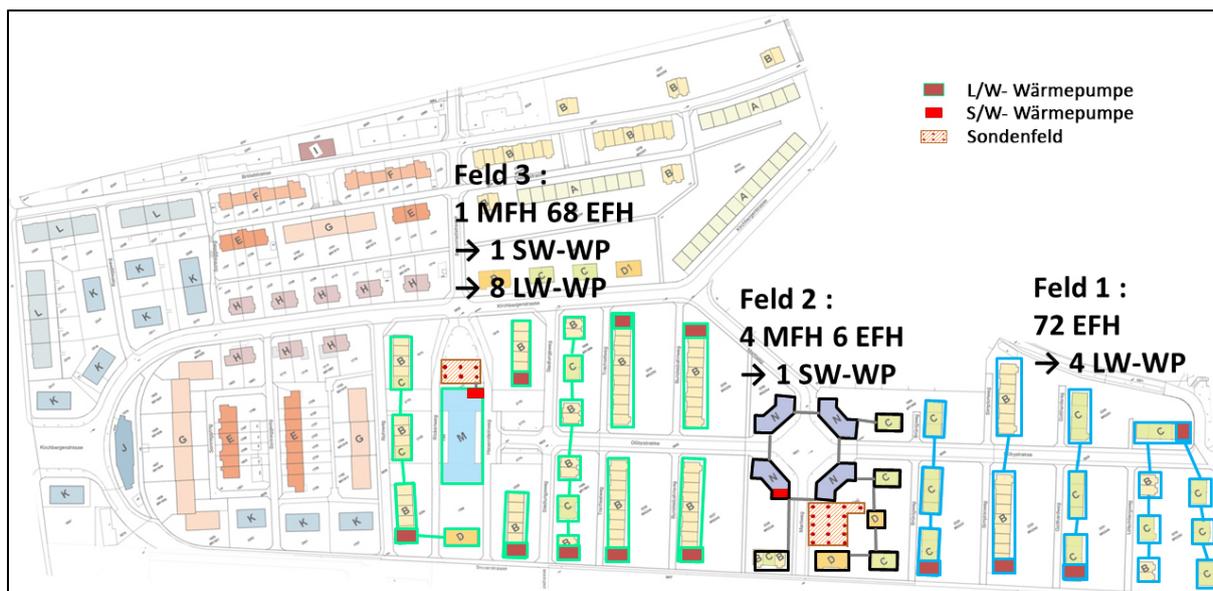


Abbildung 15 Schema der Kurz-/mittelfristige Entwicklung (bei Sanierungsvariante DKFF4).

6.2.2 LUFT/WASSER- WÄRMEPUMPEN: BENÖTIGTE HEIZLEISTUNG UND SCHALLEMISSIONEN GEMÄSS SANIERUNGSVARIANTE

Damit die benötigte Heizleistung (Berechnung nach A.1.2 und Datengrundlage gem. A.2.1.2) bereitgestellt werden kann, sind die LWP beim kurz-/mittelfristigen Ersatz in Abhängigkeit von der Sanierungstiefe (siehe Kapitel 3) unterschiedlich zu dimensionieren. Die Nennleistung der Wärmepumpen kann die Lärmmissionen und die Energieeffizienz beeinflussen. Zudem wirkt sich die Nennleistung der Wärmepumpe auf die Investitionskosten der Anlage aus. Ausgehend von Kriterien zum Schall und zur Energieeffizienz ist für die Siedlung Weissenstein mindestens Variante DKFF4 als Sanierungsvariante zu empfehlen.

Wie aus Abbildung 16 hervorgeht, sind gemäss Ist-Zustand der Gebäudehülle Aggregate zu installieren, die eine Nutzleistung von bis zu 105 kW (Wärmepumpe Nr. 12) erbringen. Diese benötigte Heizleistung kann reduziert werden auf max. 74 kW gemäss Variante DKFF1, 59 kW bei Variante DKFF4 und 49 kW unter der Sanierungsvariante DKFF4+L. Die zu installierende Nennleistung sollte aufgrund von Verlusten die Nutzleistung übersteigen.

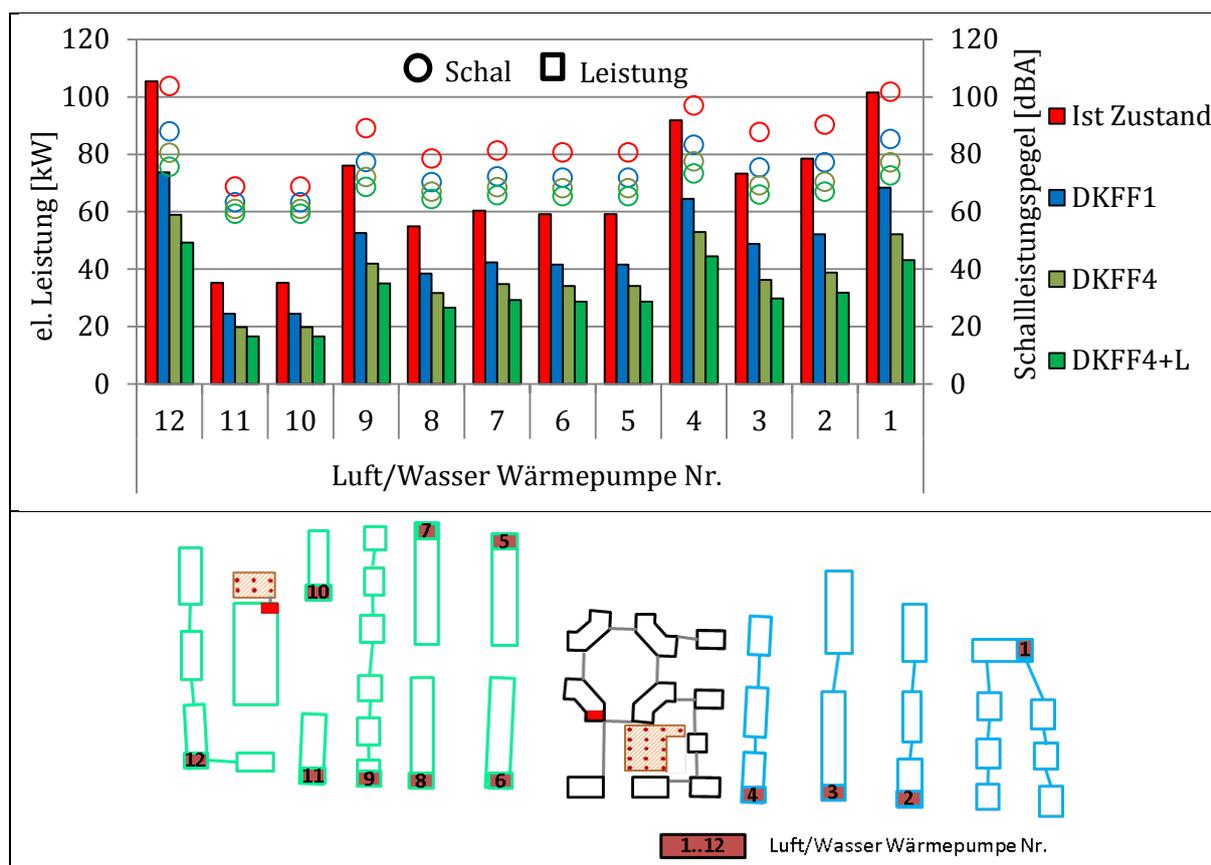


Abbildung 16 Benötigte Heizleistung der Luft/Wasser- Wärmepumpe gem. Sanierungsvarianten.

Dott und Afje [24] haben Kriterien für den Einsatz von Luft/Wasser- Wärmepumpen im urbanen Gebiet erarbeitet. Die Ergebnisse zeigen keinen klaren Zusammenhang zwischen der Heizleistung und den Schallemissionen [24]. In der Untersuchung von Stocker [36] hingegen ist bei LWP grösser 10 kW Leistung ein positiver Zusammenhang zu den Schallemissionen erkennbar. Eine Empfehlung kantonaler Lärmschutzfachleute zur Lärmbelastung durch LWP zeigt den erwarteten Schalleistungspegel in Abhängigkeit von der Heizleistung bei einem Temperaturhub von 33 Kelvin (für Berechnung siehe A.1.4.1). Aus Abbildung 16 sind die entsprechenden Schalleistungspegel (Emissionspegel) zu den LWP ersichtlich. Mit einem Abstand von 15 Metern zum nächstliegenden Nachbarn kann der Schalleistungspegel beim Immissionsort um ca. 14 dB(A) reduziert werden [24]. Aus diesem Grund wurde, wie in Abbildung 16 ersichtlich ist, auf eine möglichst lärmbelastungsschonende Aufstellung der Wärmepumpenaggregate geachtet.

Wie aus Kapitel 5.3 hervorgeht, ist bei unsanierten EFH, bedingt durch die kleineren Wärmeabgabeflächen bei wandmontierten Radiatoren, eine höhere Vorlauftemperatur notwendig. Aus dem Temperaturhub (die Differenz in Kelvin zwischen Wärmequelle und Heizvorlauf) geht ein negativer Effekt auf die Energieeffizienz der Wärmepumpe hervor. Dieser Effekt wurde bei der Berechnung der Endenergie mithilfe der JAZ berücksichtigt (siehe A.1.4.1). Dott und Afje [24] kommen in ihrer Untersuchung zu ähnlichen Resultaten. Gemessen an der Leistungszahl engl.: „Coefficient of Performance“ (COP) einer Luft/Wasser-Wärmepumpe, reduziert sich diese von 3.5 bei 33 Kelvin zu 2.6 bei 38 Kelvin und 1.8 bei 62 Kelvin Temperaturhub (Median aus den untersuchten Anzahl Wärmepumpen, [24]). Zwischen der

installierten Nennleistung und der Leistungszahl (COP) der Wärmepumpe ist kein direkter Zusammenhang erkennbar [24].

6.2.3 SOLE/WASSER-WÄRMEPUMPEN: BENÖTIGTE HEIZLEISTUNG UND ANZAHL ERDSONDEN GEMÄSS SANIERUNGSVARIANTE

Die verfügbare Fläche für die Verlegung von Erdsonden ist innerhalb der Siedlung stark begrenzt (siehe Abbildung 15). Bei der Analyse der Verfügbarkeit der Flächen war die möglichst geringe Einschränkung der Mieterschaft ein wesentliches Kriterium (siehe Abschnitt 3.1). Ausgehend von einer Bohrtiefe von 150 Metern (entspricht der bekannten Geologie eines vorliegenden Bohrprofils aus der Siedlung) und einem Abstand von ca. fünf Metern zwischen den Erdsonden, ist gemäss der Sanierungsvarianten mit unterschiedlich vielen Sonden zu rechnen. Zudem verändert sich die benötigte Heizleistung der Wärmepumpen. Aufgrund der begrenzt verfügbaren Fläche innerhalb der Siedlung ist mindestens die Sanierungsvariante DKFF4 zu empfehlen.

Wie aus Abbildung 17 ersichtlich wird, sind im Erdsondenfeld 1 ohne Massnahmen ca. viermal mehr Erdsonden zu verlegen (49 Stück) als mit Variante DKFF4+L (12 Stück). Im Erdsondenfeld 2 sind ohne Sanierungsmassnahmen 19 und mit der Variante DKFF4+L 4 Erdsonden notwendig. In Abbildung 17 ist die benötigte Fläche gekennzeichnet, die gemäss Sanierungsvariante DKFF4 eingeplant werden muss. Analog zu den LWP kann mit den Sanierungsvarianten DKFF4 und DKFF4+L die Vorlauftemperatur reduziert werden (siehe A.2.4.1). Dies wirkt sich positiv auf die Energieeffizienz der Wärmepumpen aus (gemessen an der JAZ siehe A.2.4.1). Mit der Entscheidung keiner oder lediglich einer leichten Sanierung (Ist-Zustand und der Variante A) ist neben einer grösseren Anzahl verlegter Erdsonden eine Wärmepumpe mit höherer Heizleistung zu installieren (siehe Abbildung 17).

Aufgrund der innerhalb der Siedlung verfügbaren Fläche wird die Bereitstellung von Heizenergie mit SWP ausschliesslich für die Sanierungsvarianten DKFF4 und DKFF4+L als realisierbar eingeschätzt.

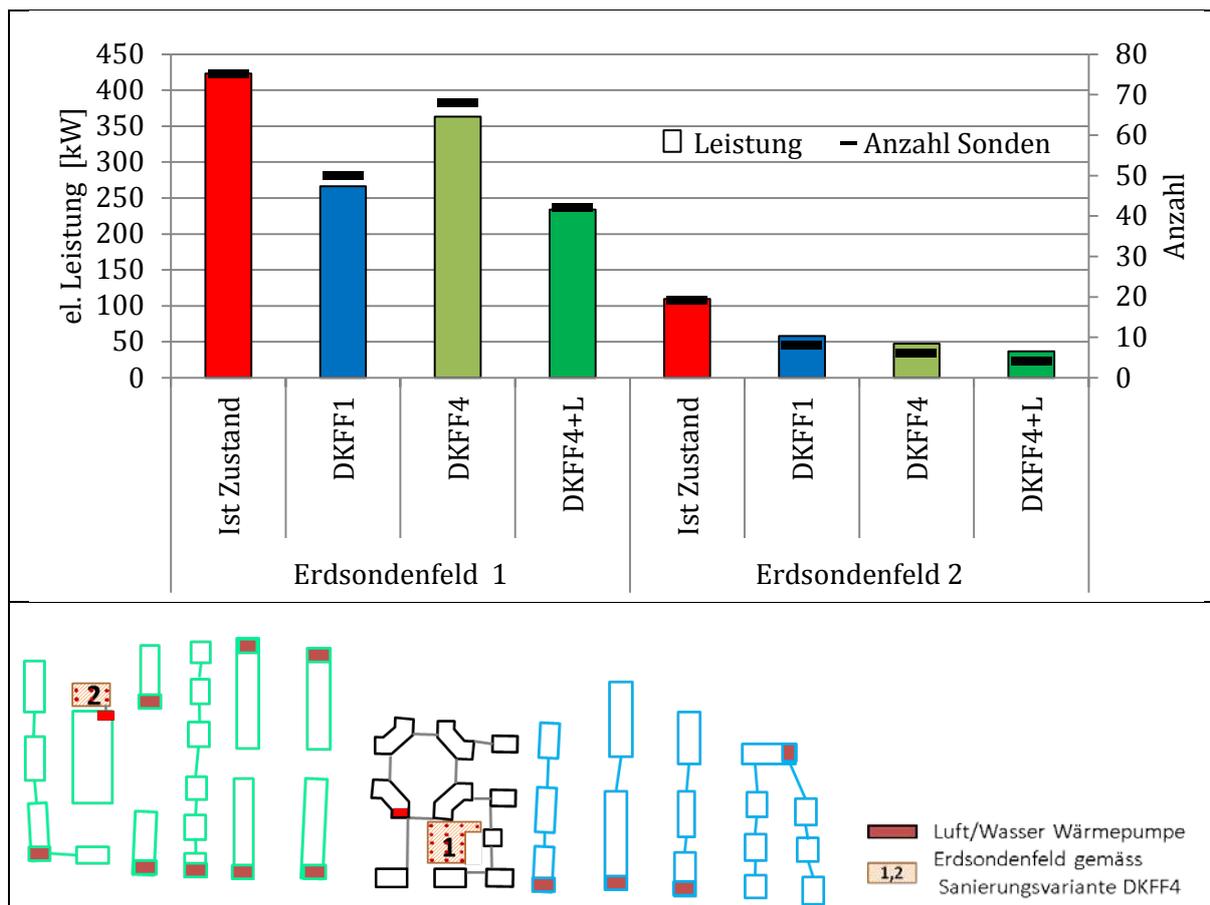


Abbildung 17 Benötigte Heizleistung Sole/Wasser-Wärmepumpe in Abhängigkeit von der gewählten Sanierungsvariante. Kennzeichnung der Erdsondenfelder.

6.3 LANGFRISTIGE ENERGIEVERSORGUNG

6.3.1 ÜBERSICHT

In der längerfristigen Planung wird eine Erweiterung der Siedlung gem. Abschnitt 2.3 berücksichtigt. Für die Bereitstellung von Heizenergie und Warmwasser werden drei Entwicklungspfade mit unterschiedlichen Technologien verfolgt (siehe Abbildung 13).

Die **erste Variante** (V1) sieht eine vollständige Heizenergieversorgung durch SWP vor. Zusätzlich werden die Erdsonden mithilfe von PVT-Kollektoren regeneriert (siehe A.1.4.4 und A.2.4.1).

In der **zweiten Variante** (V2) wird der Heizenergiebedarf (sowie der Warmwasserbedarf während der Heizperiode) durch ein zentrales Holzschnitzelkraftwerk gedeckt.

Die **dritte Variante** (V3) sieht einen Anschluss an das Fernwärmenetz der EWB vor.

Für die Varianten zwei und drei werden die Dachflächen der Neubauten zur Stromproduktion mithilfe von Photovoltaikanlagen genutzt (siehe A.1.4.4 und A.2.4.1). In allen drei Varianten werden Wärmepumpenboiler für die Bereitstellung von Warmwasser eingesetzt. Zur

Wärmeverteilung wird nach Abschätzungen ein Verteilnetz von 4.5 bis 5.5 km benötigt (siehe A.2.4.2). In Abschnitten 6.3.2 bis 6.3.5 wird die technische Machbarkeit der Varianten untersucht.

6.3.2 V1: SOLE/WASSER- WÄRMEPUMPEN

Für die Realisierung von SWP als Möglichkeit zur Bereitstellung von Heizenergie ist es empfehlenswert, mindestens die Sanierungsvariante DKFF4 umzusetzen. Die begrenzte verfügbare Fläche für die Verlegung von Erdsonden sowie die Einbussen in der Energieeffizienz führen zu diesem Ergebnis. In Abbildung 18 sind eine mögliche Umsetzung der Erdsondenfelder sowie die Wärmeverteilnetze skizziert. Hierbei wird der Heizenergiebedarf der bestehenden Siedlung Weissenstein (Sanierungsvariante DKFF4) inklusive der geplanten Neubauten am Nord- und Südrand (siehe A.2.1.1) berücksichtigt.

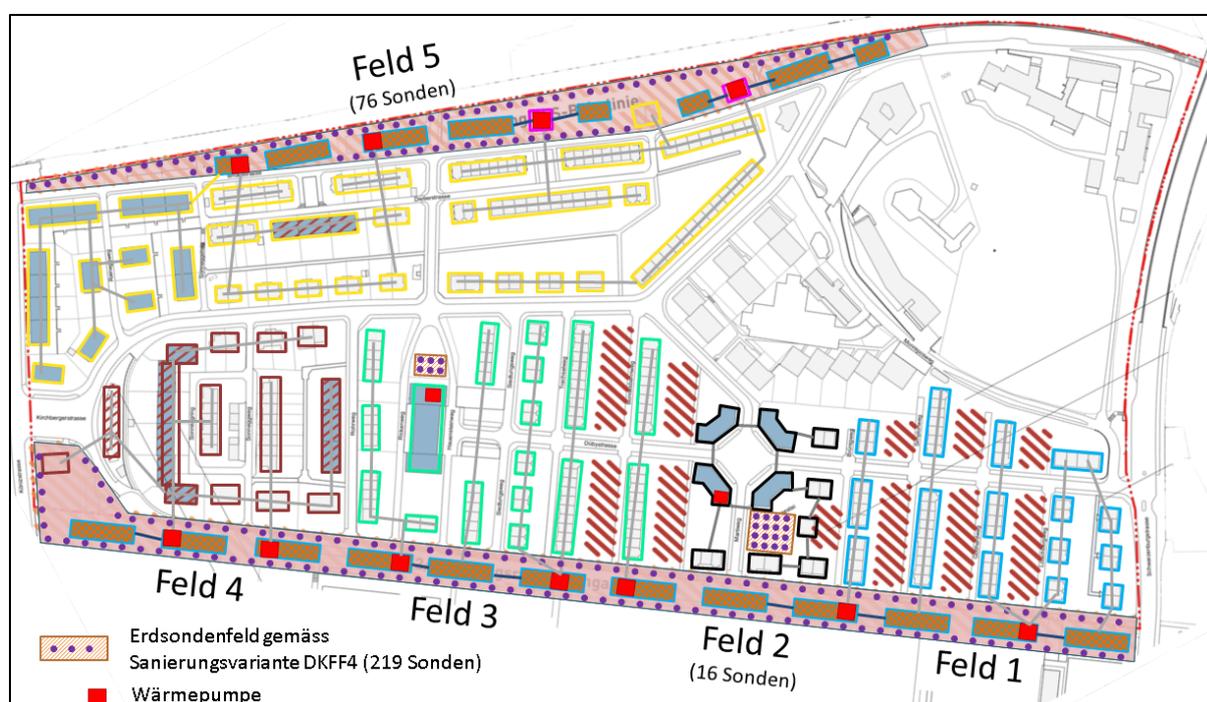


Abbildung 18 langfristiges Energieversorgungskonzept V1: Sole/Wasser-Wärmepumpe gem. Sanierung DKFF4.

Unter der Annahme von Sanierungsvariante DKFF4 und einer Bohrtiefe von 150 Metern müssen am nördlichen Rand der Siedlung 76 Erdsonden verlegt werden (siehe Abbildung 18). Mithilfe dieser Anzahl Sonden kann der Heizenergiebedarf der Felder fünf bis sieben einschliesslich der Neubauten gedeckt werden. Am südlichen Siedlungsrand sind 121 Sonden notwendig zur Deckung des Heizenergiebedarfs der Felder eins, drei (ohne Herrschaftsgebäude Typ M) und vier inklusive Neubauten. Die Wärmepumpe für das Herrschaftsgebäude hat ein eigenes Erdsondenfeld mit sechs Sonden. Weiterhin werden die vier MFH (Typ N (Martiweg 9-17) über eine Wärmepumpe mit eigenem Erdsondenfeld mit 16 Sonden versorgt.

Aus Abbildung 19 wird ersichtlich, dass ohne Sanierung mehr als die doppelte Anzahl Sonden verlegt werden müssen (528). Gemäss der Sanierungsvariante DKFF1 sind nahezu 100 zusätzliche Sonden zur Deckung der Heizenergie notwendig.

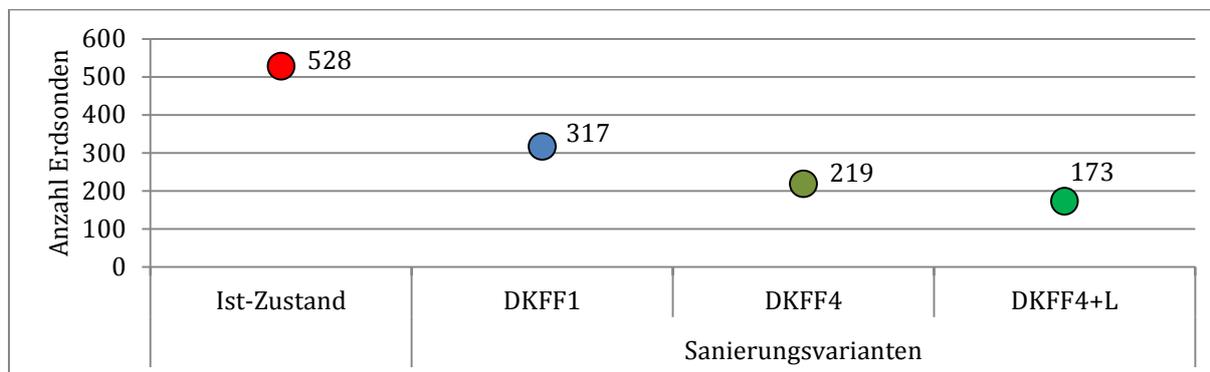


Abbildung 19 Anzahl Erdsonden gemäss Varianten der energetischen Erneuerung.

Die Energieeffizienz steigt mit der Sanierungsvariante DKFF4 um mehr als 25 % (siehe A.2.4.1) bei Sole/Wasser basierter Systeme gegenüber ohne Sanierung (Ist-Zustand). Wie zuvor in Abschnitt 5.3 behandelt, ist dies darauf zurückzuführen, dass nach der energetischen Sanierung eine reduzierte Vorlauftemperatur verwendet werden kann.

Es wird empfohlen, weitere Details zur hydrogeologischen Situation abzuklären. Geologische Erkundungen auf benachbarten Liegenschaften im Umkreis der Siedlung weisen eine problematische hydrogische Situation hin [15]. So erschweren kalzidische Wechsellagerungen mit hohen Anteilen an feinkörnig bis siltigen Sedimenten das Abteufen von Erdsonden. Erfahrungen der ewb -Energie Wasser Bern bei Erdsondenbohrungen am Standort Schwarzenburger Strasse 59 zeigten, dass die Standfestigkeit der Bohrlöcher nur mit hohem Zusatzaufwand zu erreichen waren. Auch bereitete die starke Wasserführung im Aquifer Probleme. Zusätzlich ist gemäss der Altlastenkarte des Kantons Bern auf dem in südlicher Richtung angrenzenden Grundstücken mit einer Grundwasserkontamination zu rechnen

Die saisonale Speicherung von solarer Überschusswärme während der Sommermonate im Erdsondenfeld erscheint unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Bedingungen, besonders der starken Wasserführung des Aquifers, als nicht sinnvoll. Obwohl etwa 12 % der jährlich erforderlichen Wärmeenergie als solarthermischer Überschuss vorhanden ist, muss angenommen werden, dass durch die hohe Grundwasserfliessgeschwindigkeit die im Sommer in den Auqifer gespeiste Wärme bis zur Entnahme im Winter "verdriftet" ist.

Die Nutzung niedrig temperierter Solarwärme zur Entlastung der Sondenfelder ist möglich, jedoch kann unter den gegebenen Bedingungen nur mit einer Reduktion der den Sondenfeldern entzogenen Wärmeenergie um etwa 10 % gerechnet werden.

6.3.3 V2: HOLZSCHNITZEL KRAFTWERK

Die Wärmeversorgung über ein zentrales Holzsnitzelkraftwerk ist generell unabhängig vom Sanierungsniveau der Siedlung Weissenstein technisch umsetzbar. Kritischer sind der Platzbedarf für die Lagerung der Holzsnitzel und der Standort des Kraftwerks zu beurteilen.

Die benötigte Leistung sowie der jährliche Energiebedarf für die Bereitstellung von Heizenergie und Warmwasser während der Heizperiode für die bestehende Siedlung zuzüglich Neubauten ist gemäss Sanierungsvarianten in Abbildung 20 ersichtlich. Das in der Abbildung hinterlegte Foto zeigt die Dimension einer zentralen Holzsznittelheizung ähnlicher Leistung wie für den Ist-Zustand notwendig wäre. Das gezeigte Biomassekraftwerk befindet sich in Werl (Nordrhein-Westfalen, D) und erzielt eine thermische Leistung von 4.5 MW [35].

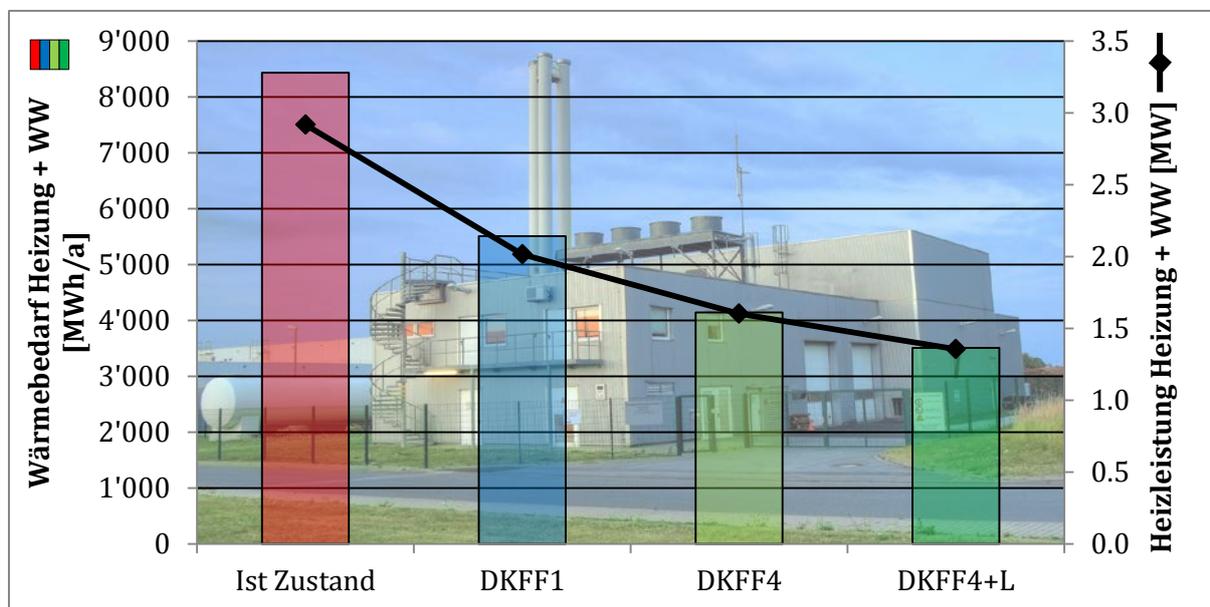


Abbildung 20 Heizleistung und Wärmebedarf V2 (inkl. Neubauten) gem. Sanierungsvarianten.

Der Lagerbedarf an Buchen-Holzsznittel wird aus Abbildung 21 ersichtlich. Bei einer Ladekapazität eines LKW's von 90 m³ Holzsznittel sind ohne Sanierung über hundert Lastwagenfahrten für die Versorgung notwendig. Das entspricht z.B. zwei Lastwagen alle zwei Tage während einer 7 monatigen Heizperiode. Der Platzbedarf für das Lager beträgt bei 10 Meter Raumhöhe 1'000 m².

Die Grafik zeigt zudem im Hintergrund das Lager (ca. 350 sm³) vom Holzsznittelkraftwerk in Châtel-St-Denis. Das Lager ist für maximal 5 Tage ausreichend dimensioniert und das Kraftwerk stellt jährlich ca. 7'000 MWh thermische Energie bereit [17]. In dieser Anlage sind zwei Heizkessel mit einer gemeinsamen Leistung von 2.5 MW installiert und der Bedarf an Holzsznittel beträgt jährlich 12'000 sm³ [27]. Bei einem ähnlichen Projekt aus Schliern (Kanton Bern) wurden ebenfalls zwei Heizkessel mit einer Gesamtleistung von 2.5 MW installiert [4]. Der Heizwärmebedarf wird bei diesem Fernwärmenetz auf 8'500 MWh/p.a. eingeschätzt und das Lager umfasst 350 m³ [4].

Der Energiebedarf für Heizung und Warmwasser sowie die benötigte Heizleistung der bestehenden Siedlung ohne Sanierung (Ist-Zustand) inklusiver Neubauten entsprechen den Dimensionen des Fernwärmenetzes in Châtel-St-Denis und der Anlage in Schliern (siehe Abbildung 20).

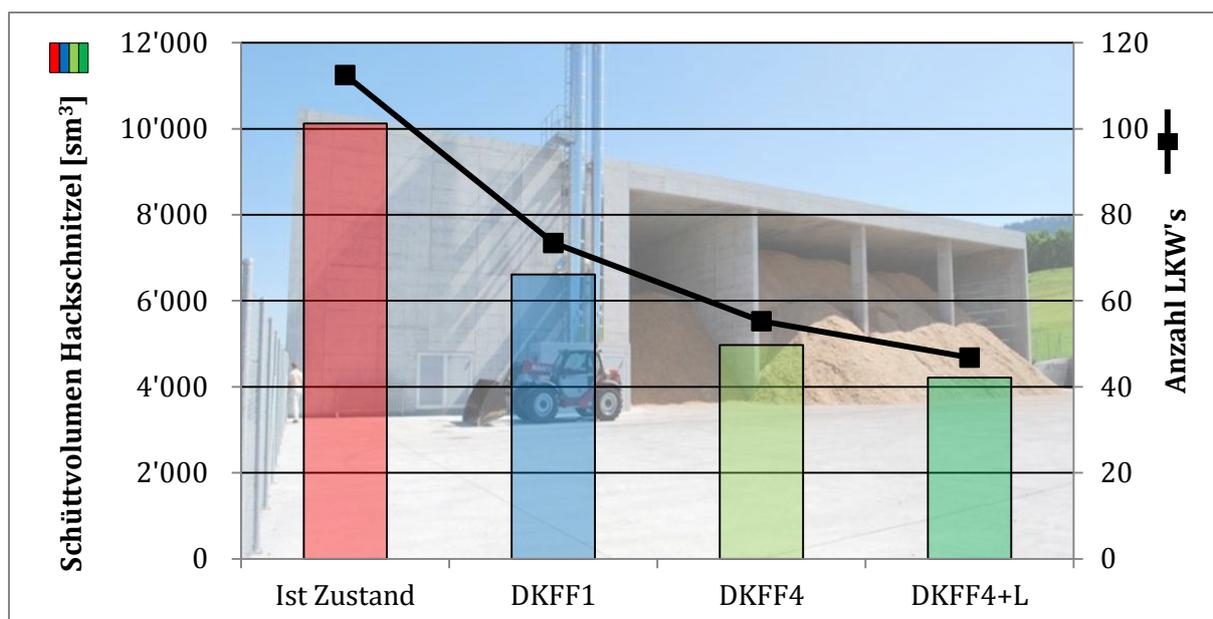


Abbildung 21 Lagerbedarf Buche-Holzschnitzel.

Aus den Abbildungen werden die Dimension und die Logistik ersichtlich, die mit einem Holzsnitzelkraftwerk zusammenhängen. Als möglicher Standort kommen daher lediglich der östliche- und westliche Rand der Siedlung mit direkter Anbindung an eine Hauptstrasse in Frage. Zudem ist eine Anlieferung via Eisenbahn im Norden der Siedlung eine prüfenswerte Option (siehe Abbildung 22).

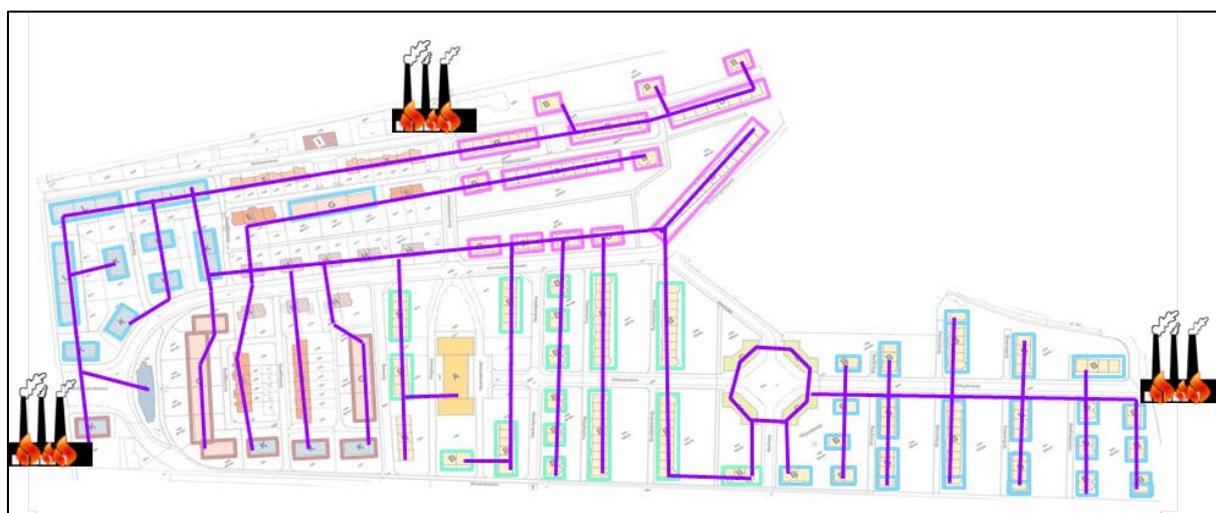


Abbildung 22 Standortfindung für ein Holzsnitzelkraftwerk, die Länge des Wärmeverteilnetzes beträgt etwa 4 km.

In Anbetracht der Dimensionierung und der damit zusammenhängenden Versorgungslogistik eines Holzsnitzelkraftwerks ist eine energetische Sanierung der Siedlung anzustreben. Damit könnte ein kleineres Lager und eine tiefere Frequenz von Lastwagenfahrten erreicht werden.

6.3.4 WÄRMENETZANSCHLUSS NAHELIEGENDER ENERGIEVERBRAUCHER

Der Anschluss weiterer Energieverbraucher an das Wärmenetz mit Holzfeuerung wird als nicht realistisch eingeschätzt. Naheliegende Verbraucher wie das Pestalozzi-Schulhaus oder die Sporthalle Weissenstein verfügen über relativ neue individuelle Energielösungen. Es ist daher mit einem geringen Interesse einer Anbindung in Form eines „Contracting“ an das Wärmenetz Weissenstein zu rechnen.

Das Schulhaus Pestalozzi befindet sich im Norden der Siedlung Weissenstein und besteht aus einem Bestandsgebäude und einem Neubau. Das Bestandsgebäude wird mit Erdgas beheizt, die Wärmezentrale wurde im 2005 erneuert. Der Wärmebedarf des Ergänzungsbaus wird mit einer Sole/Wasser-Wärmepumpe gedeckt. Die Heizzentrale des Ergänzungsbaus ist auf dessen Wärmebedarf dimensioniert. Da bei der Planung des Ergänzungsgebäudes keine Veränderungen an Heizzentrale des Bestandsbaus geprüft wurden, ist nicht mit der Bereitschaft zur Wärmeversorgung der Siedlung Weissenstein zu rechnen.

Die naheliegende Sporthalle Weissenstein im Süden der Siedlung wurde im Jahre 2014 fertiggestellt. Der Heizenergiebedarf und Brauchwarmwasser werden mithilfe einer Gasheizung gedeckt und durch 250 m² Solarkollektoren unterstützt. Die Wärmeversorgung der Sporthalle Weissenstein wird im „Contracting“ von der Energie Wasser Bern betrieben. Die Wärmeleistung und die Platzverhältnisse sind nach gegenwärtigem Stand nicht für Kapazitätserweiterungen geeignet.

Weder eine Einbindung des Schulhauses Pestalozzi noch der Sporthalle Weissenstein erscheint aus derzeitiger Sicht sinnvoll.

6.3.5 V3: BENACHBARTE WÄRMELIEFERANTEN

Es besteht ein anliegendes Fernwärmenetz, das nach Absprache mit der Energie Wasser Bern (EWB) möglicherweise auf die Siedlung Weissenstein ausgeweitet werden kann. In diesem Zusammenhang sind weitere Abklärungen mit der EWB notwendig.

Die EWB betreibt mit der Energiezentrale Forsthaus eine kombinierte Kehrrichtverbrennung / Holzheizzentrale zur Wärme- und Elektrizitätsversorgung der Stadt Bern. Der Energierichtplan 2035 der Stadt Bern sieht den Anschluss der Gebäude entlang der Könitzstrasse an das Wärmenetz der EWB vor (Abbildung 23). In diesem Zusammenhand wäre es möglich, die Erschliessung bis an die Siedlung Weissenstein weiterzuführen. Erste Vorabklärungen zeigen die prinzipielle Bereitschaft der EWB [13].

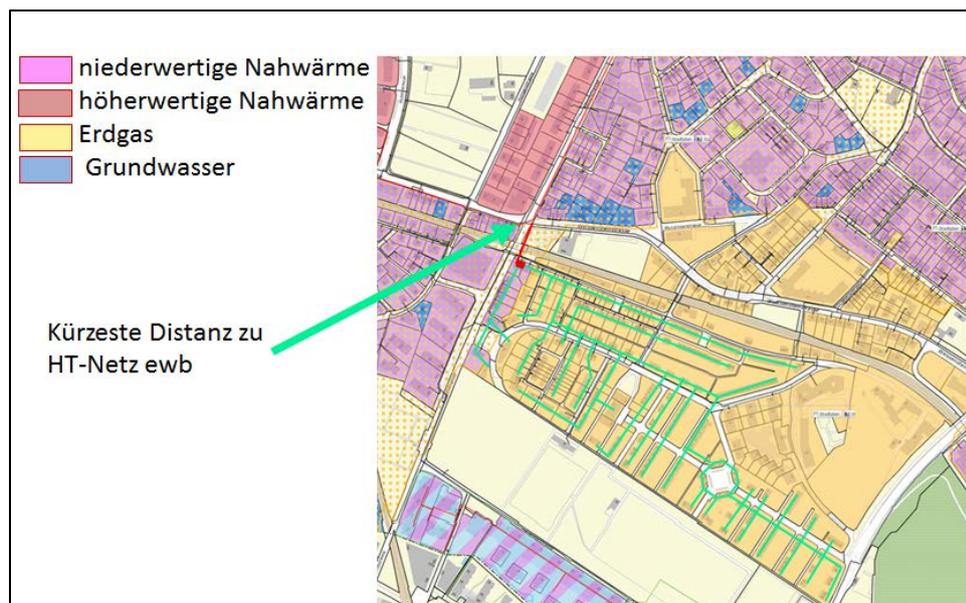


Abbildung 23 mögliche Anbindung der Siedlung an das Fernwärmenetz der ewb, Kartenauszug aus dem der Geoportal Stadt Bern

Die Erweiterung des bestehenden Nahwärmenetzes der Siedlung Hardegg wird als technisch unrealistisch eingeschätzt. Das Heizkraftwerk ist nicht ausreichend für eine Anbindung an die Siedlung Weissenstein dimensioniert.

Die BKW hat im Herbst 2015 eine neue Holzheizzentrale zur Versorgung des Wärmeverbundes Schliern, Könitz in Betrieb genommen. Die Heizzentrale verfügt über eine Wärmeleistung von 2.5 MW (Holzkessel) und 2 MW (Gaskessel für Spitzenlast). Sie versorgt etwa 800 Haushalte mit Heizenergie und Warmwasser [4]. Eine Erweiterung dieses Wärmeverbundes und der Anschluss der Siedlung Weissenstein erscheinen aus folgenden Gründen unrealistisch:

- limitiert Platzverhältnisse für Erweiterungsbauten am Standort der Heizzentrale
- 3.5 km direkte Entfernung zur Siedlung erfordert umfangreiche Leitungserschliessung
- zu erwartenden Widerstand der Anwohner bei Erweiterung der Heizzentrale
- die Ausweitung der Wärmeproduktion würde zum verstärkten Betrieb des Spitzenlastkessle führen.

6.3.6 PV-ANLAGEN

Zu allen Energieversorgungsvarianten wird die verfügbare Dachfläche (ca. 3'800 m²) von den Ergänzungsbauten für die Stromproduktion und in Variante 1 mithilfe von PVT-Modulen für die Erzeugung von thermischer Energie genutzt.

Die jährlich erzeugte Elektrizität der PV- und PVT Anlagen beträgt ca. 366-495 MWh (südliche Ausrichtung und 30° geneigte Module). Es besteht zusätzlich besteht die Möglichkeit verfügbare Flächen innerhalb des bestehenden Quartiers Weissenstein zu nutzen. In einer vorausgehenden Studie wird die nutzbare Fläche auf 4500 m² und der damit zu erzielende Ertrag auf jährliche 1'035 MWh eingeschätzt [11]. In dieser Arbeit wird aufgrund von Empfehlungen aus der

Begleitgruppe das Potential für PV-Anlagen innerhalb der Siedlung nicht weiter berücksichtigt (siehe 1.1).

6.4 BEWERTUNG UMWELTEINFLUSS

6.4.1 DIE BETRACHTUNG EINES TYPISCHEN OBJEKTS: TREIBHAUSGASEMISSIONEN UNTERSCHIEDLICHER ENERGIEBEREITSTELLUNGSVARIANTEN

Der Vergleich möglicher Heizenergie- und Warmwasserbereitungsmöglichkeiten wird mittels einer Variantenrechnung auf Basis des Wärmebedarfs eines Typ D EFH und den daraus resultierenden Energie- und Emissionskriterien durchgeführt. Als Beurteilungskriterien dienen der Heizölverbrauch, die Elektrizitätsmenge sowie die aus den Energiebezügen resultierenden CO₂-Ausstoss. Die berücksichtigten Varianten sind aus A.2.6 zu entnehmen.

Die Resultate der Variantenrechnung sind in Abbildung 24 dargestellt. Die jeweiligen Wärmeversorgungsvarianten werden den in Kapitel 3.2, Tabelle 3 vorgestellten Massnahmen an der Gebäudehülle gegenübergestellt. Die farblich hinterlegten Felder bezeichnen den aus der jeweiligen Wärmeerzeugungsvariante resultierenden CO₂-Ausstoss, die assoziierte Energiemenge ist in der darunterliegenden Zeile aufgeführt. In Klammern gesetzte Elektrizitätsmengen stehen für einen Produktionsüberschuss an Solarstrom.

Energieversorgung		Ist	DKFF1	DKFF4	DKFF4+L		
Ölheizung		CO ₂ [kg/a]	7'161	5'246	3'696	3'298	1 L Heizöl: 2,65 kg CO ₂ (BfE 2010)
		Heizöl [L]	2'702	1'980	1'395	1'245	
		CO ₂ [kg/a]	5'708	3'900	2'463	2'100	
		Heizöl [L]	2'154	1'472	929	792	
Ölheizung, 12 m ² Solarthermie, 900L Speicher		CO ₂ [kg/a]	5'126	3'449	2'150	1'815	
		Heizöl [L]	1'934	1'301	811	685	
Aussenluft-Wärmepumpe, 900 L Speicher		CO ₂ [kg/a]	1'262	913	638	567	1 kWh _{Strom} 122 g CO ₂ (Bafu 2012)
		Strom [kWh]	10'344	7'484	5'227	4'651	
Aussenluft-Wärmepumpe, 12 m ² Solarthermie, 900 L Speicher		CO ₂ [kg/a]	1'109	758	483	413	
		Strom [kWh]	9'087	6'214	3'958	3'382	
Aussenluft-Wärmepumpe, 24 m ² Solarthermie, 3000 L Speicher		CO ₂ [kg/a]	1'046	727	478	416	
		Strom [kWh]	8'577	5'960	3'921	3'410	
Aussenluft-Wärmepumpe, 4kW _p Photovoltaik 12 m ² Solarthermie, 900 L Speicher		CO ₂ [kg/a]	570	219	0	0	
		Strom [kWh]	4'672	1'800	0 (+460)	0 (+1'030)	
Aussenluft-Wärmepumpe, 4kW _p Photovoltaik 24 m ² Solarthermie, 3000 L Speicher		CO ₂ [kg/a]	508	189	0	0	
		Strom [kWh]	4'163	1'546	0 (+490)	0 (+1'000)	
150m Erdsonde, SW-Wärmepumpe, 900L Speicher		CO ₂ [kg/a]	1'166	839	609	532	
		Strom [kWh]	9'555	6'879	4'989	4'358	
150m Erdsonde, SW-Wärmepumpe, 12 m ² Solarthermie, 900L Speicher		CO ₂ [kg/a]	843	567	372	314	
		Strom [kWh]	6'909	4'650	3'050	2'877	
150m Erdsonde, SW-Wärmepumpe, 24 m ² Solarthermie, 3000L Speicher		CO ₂ [kg/a]	781	519	336	271	
		Strom [kWh]	6'400	4'256	2'756	2'223	
150m Erdsonde, SW-Wärmepumpe, 12 m ² Solarthermie, 900L Speicher, 4kW _p PV		CO ₂ [kg/a]	272	85	0	0	
		Strom [kWh]	2'228	697	0 (+530)	(+1'960)	
150m Erdsonde, SW-Wärmepumpe, 24 m ² Solarthermie, 3000L Speicher, 4kW _p PV		CO ₂ [kg/a]	242	0	0	0	
		Strom [kWh]	1'983	0 (+160)	0 (+1'660)	0 (+2'200)	

Abbildung 24 Typ D Gebäude: Emissionen gem. Energieversorgungs- und Sanierungsvarianten.

Die maximale Ertüchtigung der Gebäudehülle (Sanierungsvariante DKFF4+L) führt beim Beibehalten der Ölheizungen zu einer Reduktion des CO₂-Ausstosses um 55 %. Der zusätzliche

Einsatz solarthermischer Kollektoren und eines grossen Wärmespeichers senkt den CO₂-Ausstoss um 75 %.

Der Ersatz der Ölheizung durch eine Aussenluft- oder Sole-Wasser-Wärmepumpe senkt den CO₂-Ausstoss ohne Massnahmen an der Gebäudehülle um 82 % respektive um 84 %. Maximaler Wärmeschutz, die Nutzung von Solarwärme und deren Speicherung verringern den CO₂-Ausstoss um 92 % bzw. 94 %. Durch die Nutzung photovoltaisch erzeugter Elektrizität zum Betrieb der Wärmepumpen kann der CO₂-Ausstoss zur Wärmeversorgung des Beispielgebäudes vollständig vermieden werden („Nullwärmeenergie-Gebäude“).

Besonders herausfordernd ist der Anspruch, das äussere Erscheinungsbild der Gebäude der Siedlung möglichst wenig zu verändern. Die Folge ist ein sehr enger gestalterischer Spielraum bei der äusseren Ansicht ("Ballenbergeritis").

Die Orientierung (OSO) und Strukturierung der Dachflächen (Gauben, Dachflächenfenster) ist nicht optimal für die Belegung mit PV-Anlagen. Der Einsatz von Solarthermie am Einzelgebäude bedeutet einen hohen zusätzlicher Installationsaufwand (Leitungen, Pumpe, Wärmtauscher etc.) bei geringer nutzbarer Wärmemenge.

Zur Ausarbeitung weiterer kurz-, mittel- und langfristiger Möglichkeiten zur Wärmeversorgung wird daher auf den Einsatz solarthermischer Absorber und Photovoltaik auf den Bestandsgebäuden der Siedlung verzichtet.

6.4.2 DIE BETRACHTUNG DER GESAMTHAFTEN SIEDLUNG

Basierend auf den realisierbaren Energieversorgungsvarianten ist es längerfristig möglich, die Umweltbelastung für die Wärmeenergie von durchschnittlichen energieeffizienten Gebäuden zu unterschreiten.

Die nicht erneuerbare Primärenergie kann mithilfe der technisch machbaren Massnahmen zur Energieversorgung (siehe Abbildung 13) und mindestens der Sanierungsvariante DKFF4 bereits in der mittleren Frist mehr als halbiert werden (siehe Abbildung 25).

Langfristig kann mithilfe von Energieversorgungs- und Sanierungsvarianten die nicht erneuerbare Primärenergie für die Wärmeenergie im Vergleich zur Situation Heute markant reduziert werden (dafür werden ausschliesslich die Sanierungsvarianten betrachtet, die im Zusammenhang mit der Energieversorgungsvariante als energietechnisch sinnvoll erscheinen). Die Werte der SWP-Variante (V1) und der Holzschnitzel Kraftwerk- Variante (V2) unterschreiten die durchschnittliche Primärenergie nicht erneuerbar heutiger MINERGIE-A Gebäude. Es ist anzumerken, dass die erzeugte elektrische Energie aus der PV- Anlage und die nutzbare Energie aus der PVT-Anlage zu 100% angerechnet wird (siehe Abschnitt A.1.4.4),

Die Bereitstellung von Heizenergie mithilfe von Erdsonden oder die Bereitstellung von Brauchwarmwasser durch Wärmepumpenboiler spielen in der langfristigen Variante eins und drei anteilmässig am gesamten Wert der Primärenergie nicht erneuerbar eine grössere Rolle (Abbildung 25). Dies ist auf den relativ grossen Anteil nicht erneuerbarer Primärenergie von Elektrizität ab Steckdose (Schweizer Verbrauchermix) zurückzuführen. Mit der Entscheidung für zertifizierte Stromprodukte kann dieser Wert um ca. 99 % reduziert werden (siehe [22] ID-

Nummer: 45.022). Auch ist damit zu rechnen, dass langfristig der Anteil Primärenergie nicht erneuerbar im Schweizer Verbrauchermix zurückgeht. In V2 ist der Wert für die Bereitstellung von Brauchwarmwasser relativ gering. Dies ist auf die Energiequelle Holz während der Heizperiode zurückzuführen.

Aus Abbildung 25 wird ersichtlich, dass mit dem Einsatz von einem Holzschnitzelkraftwerk die Primärenergie nicht erneuerbar für die Heizenergie vernachlässigbar klein wird. Dies ist auf die tiefe Primärenergie aus nicht erneuerbaren Energiequellen von Holz zurückzuführen (siehe [22]).

Die Umweltbelastung der Fernwärme übertrifft die Werte aus den Varianten eins und zwei. Dies ist auf den relativ hohen Gas-Anteil (52 %) des Fernwärmenetzes der Energiezentrale Forsthaus zurückzuführen (siehe Tabelle 20 in A.2.6).

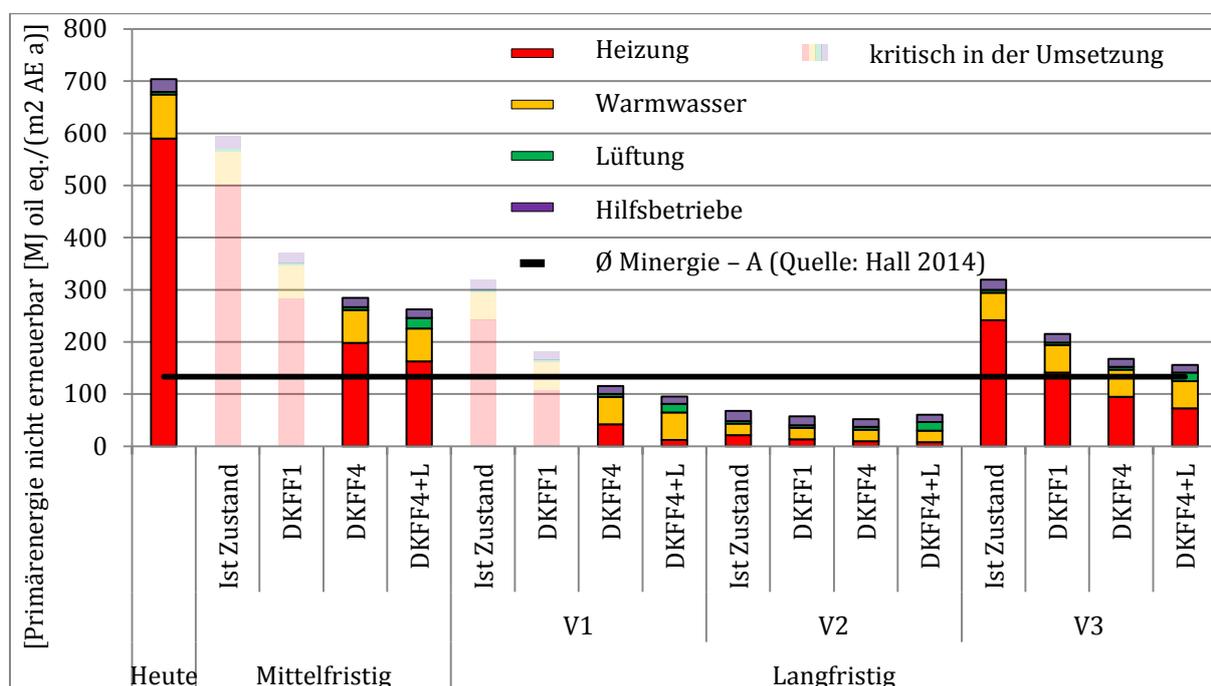


Abbildung 25 Primärenergie nicht erneuerbar: Mittel- und Langfristige Entwicklungspfade gem. Sanierungsvarianten.

In Abbildung 26 sind die verschiedenen Szenarien auf der Grundlage von Umweltbelastungspunkten einander gegenübergestellt. Bei der Betrachtung von Umweltbelastungspunkten (UBP) erzielt die Energieversorgungsvariante eins im Vergleich zu den Varianten V2 und V3 in den Sanierungsfällen DKFF4 und DKFF4+L einen tieferen Wert. Die Bewertung durch UBPs berücksichtigt neben der Primärenergie 10 weitere Kriterien und gewichtet diese mit den Schweizer Umweltzielen [1]. Es ist somit naheliegend, dass die Verbrennung von Holz Umweltbelastungen mit sich bringt, die im Vergleich zum Schweizer Verbrauchermix von Elektrizität höher ausfallen. Mögliche Kriterien sind in diesem Zusammenhang der Verlust an Biodiversität, die Möglichkeit einer Erschöpfung dieser Ressource sowie ein krebserzeugendes Potential. Zudem wird ersichtlich, dass sich eine Reduktion des Energiebedarfs resultierend aus den Sanierungsvarianten stärker positiv auf die UBPs-Bewertung auswirkt. Ein Vergleich zur jährlichen Umweltbelastung aus dem privaten

Konsum einer durchschnittlichen Person (siehe [21]) veranschaulicht dieses Ergebnis. Somit ist durch die Sanierungsvariante DKFF4+L und Energieversorgungsvariante 1 eine jährliche Reduktion der Umweltbelastung zu erwarten, die dem jährlichen privaten Konsum von 87 Personen entspricht (und dies obwohl in V 1 der Energiebedarf aus Ergänzungsbauten im Umfang von 22'015 m² A_E berücksichtigt wird).

Es wird ersichtlich, dass das Festlegen auf die Energiequelle Holz weitere Risiken mit sich bringt, die bei der V1 (Erdsonden) tiefer einzuschätzen sind. Zudem können Risiken einer Umweltbelastung mit der Reduktion des Energieverbrauchs vermindert werden.

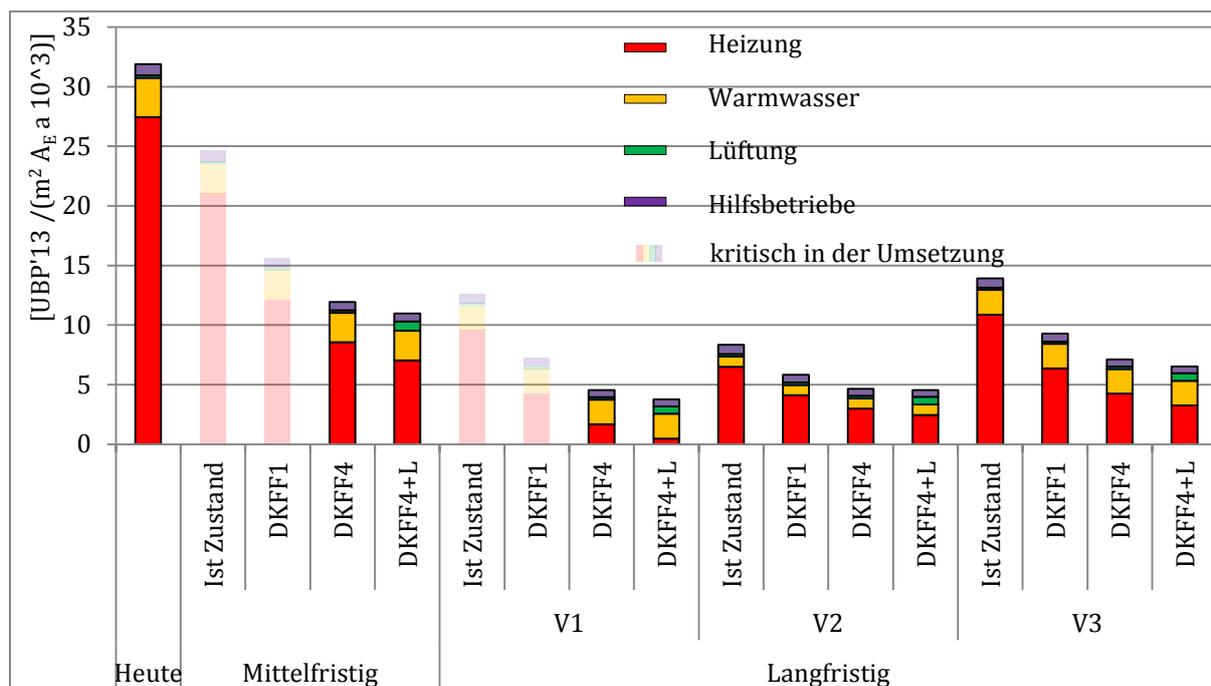


Abbildung 26 Umweltbelastungspunkte (UBP): Mittel- und Langfristige Entwicklungspfade gem. Sanierungsvarianten.

6.5 ABSCHÄTZUNG INITIALE INVESTITIONEN

In Abbildung 27 ist die Auswertung der Analyse der für die einzelnen langfristigen Varianten notwendigen Investitionen zusammengefasst. Für die Sanierung der gesamthaften Siedlung fallen Kosten zwischen 26 und 50 Millionen CHF in Abhängigkeit von der Sanierungsvariante an. Die Einschätzung zu den Investitionskosten zeigt lediglich geringe Unterschiede zwischen V1 und V2. Zudem wird ersichtlich, dass die Differenz der Kosten zu den Sanierungsvarianten pro Objekt relativ gering ausfallen (siehe Abbildung 28). Der positive Effekt aus den Energieeinsparungen während des Betriebs wird bei dieser Berechnung nicht berücksichtigt. Zudem sind für eine abgeklärte Entscheidung die Energiegestehungskosten zu berechnen. Diese müssten mithilfe einer dynamischen Rechnung hergeleitet werden und umschliessen neben der Grundinvestition auch die Betriebskosten während der gesamten Lebensdauer der Technologie. Die entsprechende Betrachtung war im Rahmen des beauftragten Projektes nicht möglich.

Nahezu die Hälfte der Investitionskosten sind auf Massnahmen zurückzuführen, die unabhängig von der Energieversorgungsvariante durchzuführen sind. Zudem unterscheiden sich die Investitionskosten der Energieversorgungsvarianten V1 und V2 nur geringfügig, wobei die Kosten für Erdsonden etwas tiefer einzuschätzen sind. Bei der V3 sind in der Energiebereitstellung für die Siedlung Weissenstein keine Energiekosten zu erwarten (die Investitionskosten gehen zu Lasten des Energieversorgers (z.B. EWB) und sind im Energiepreis enthalten). Zudem wird ersichtlich, dass mithilfe von Sanierungsmassnahmen die Investitionskosten für die Energieversorgung gesenkt werden können (V1: -15 % bei Sanierung DKFF4+L anstatt DKFF4, V2: -51 % Sanierungsvariante DKFF4+L anstatt keine Massnahmen).

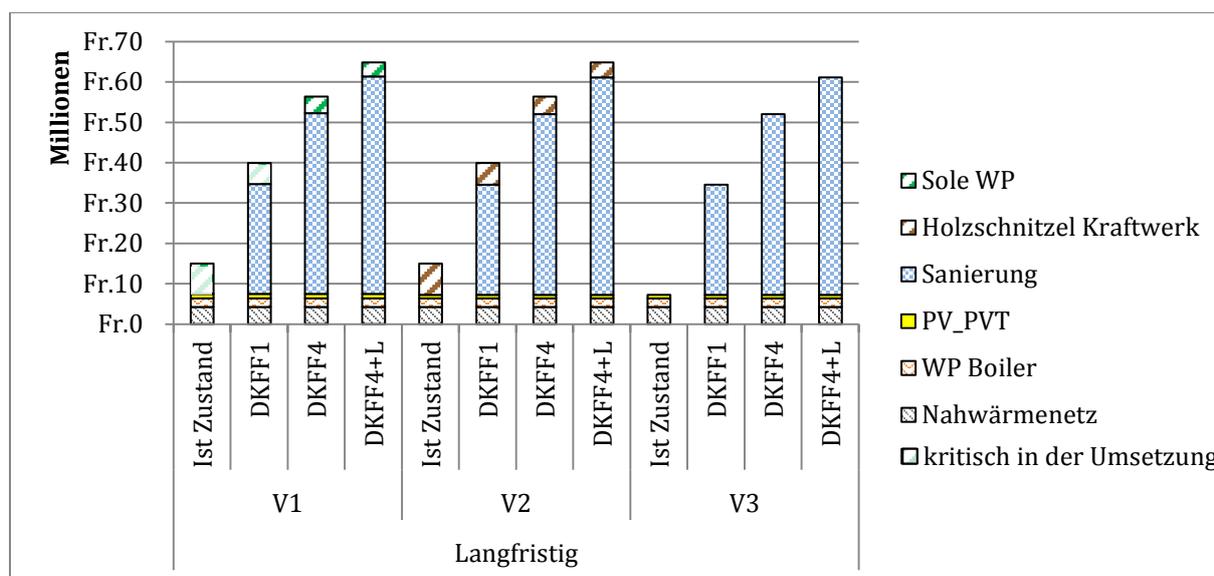


Abbildung 27 Investitionskosten langfristige Energieversorgungsvarianten inkl. Sanierungsvarianten.

Die Kosten zu den Sanierungsvarianten unterscheiden sich zwischen den EFH-Typen nur leicht und liegen zwischen 80'000 CHF und 150'000 CHF pro Gebäude (siehe Abbildung 28). Bei den MFH-Gebäuden beträgt die Schätzung zwischen 337'000 CHF und 640'000 CHF pro Gebäude. In Abschnitt A.1.6 und A.2.5 wird die Vorgehensweise und die Datengrundlage dieser Rechnung näher erläutert. Es ist zu bemerken, dass z. B. bei der Sanierungsvariante DKFF4+L weitere Kosten zur notwendigen Abdichtung der Gebäudehülle nicht berücksichtigt werden (die Luftdichtheit ist Voraussetzung für eine Komfortlüftung). Zudem können bei der gesamthaften Sanierung der Siedlung die Kosten aufgrund von Skaleneffekten gesenkt werden. Dieser Effekt bleibt in der Rechnung ebenfalls unberücksichtigt.

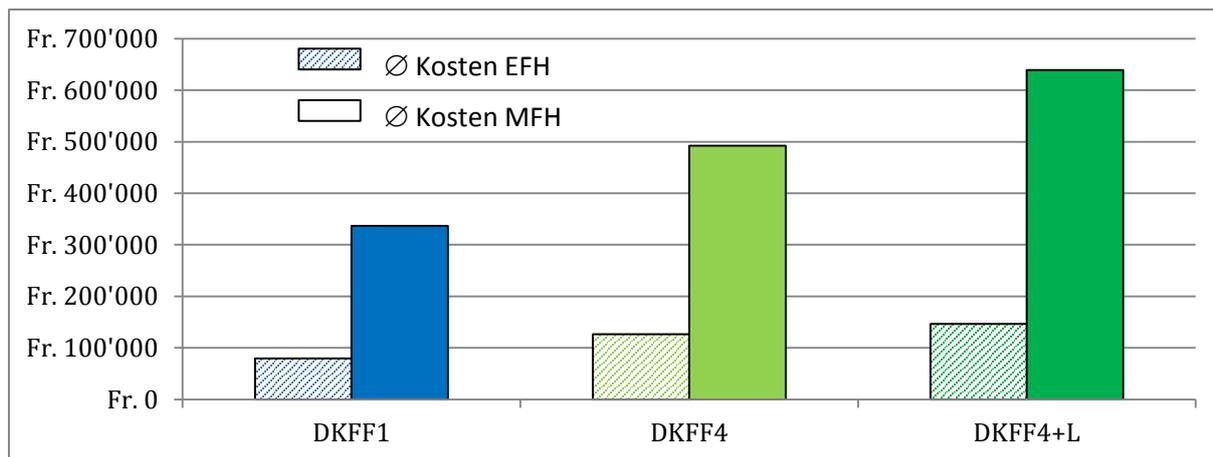


Abbildung 28 Kosteneinschätzung zu den Sanierungsvarianten DKFF1, DKFF4, DKFF4+L bei EFH und MFH.

7 KONKLUSION

Die Siedlung Weissenstein in Bern soll nachhaltig und denkmalgerecht saniert werden. Dazu werden in dieser Studie Sanierungs- und Energieversorgungsvarianten in einer kurz-/mittelfristigen sowie in einer langfristigen Perspektive erarbeitet und hinsichtlich energie- und umwelttechnischen sowie ökonomischen Kriterien bewertet. Die Ergebnisse schaffen für die Eisenbahner-Baugenossenschaft Bern (EBG Bern) und die Baugenossenschaft Brünnen-Eichholz (BBE) eine Entscheidungsgrundlage zur Wahl der Sanierungs- und Energieversorgungsstrategie.

Der energetische Ist-Zustand der Siedlung wird anhand von 10 Gebäudeenergieausweisen der Kantone (GEAK) für verschiedene Gebäudetypen analysiert. Aus den Resultaten wird ersichtlich, dass der energetische Zustand der Gebäudehülle, obwohl einige Sanierungsmassnahmen durchgeführt wurden, nicht zeitgemäss ist. Der Energiebedarf beträgt zurzeit zwischen 2- bis 3-mal mehr als der heutige Grenzwert für Neubauten (1.6- bis 2.4- mal höher als der Grenzwert bei Erneuerungen). Basierend auf Einschätzungen der GEAK-ExpertInnen sowie einer Analyse historischer Daten entsteht aus dem jährlichen Energieverbrauch (für Heizung, Warmwasser, Lüftung, Klima und Gerätestrom) eine relevante Umweltbelastung (ca. 2.6 Milliarden UBP bzw. ca. 2'800 Tonnen CO₂ Äquivalente Treibhausgasemissionen). Die Gründe für dieses Ergebnis sind, neben der mangelnden Energieeffizienz, die fossilen Energiequellen Öl und Gas, die zur Erzeugung des überwiegenden Teils von Heizwärme und Warmwasser eingesetzt werden.

Für eine nachhaltige Sanierung der Siedlung werden drei Massnahmenpakete erarbeitet. Neben Massnahmen, die den Denkmalschutz nicht tangieren (Dämmung von Dach und Kellerdecke sowie der Fensterersatz) werden Aerogel-Dämmmaterialien in zwei Dicken (1 cm Variante (DKFF1) und 4 cm Variante (DKFF4)) für die Fassaden vorgeschlagen. Diese Fassadendämmung stellt einen äusserst stark auf den Denkmalschutz eingehenden Kompromiss dar. Der Gebäudecharakter geht auch durch eine 4 cm Fassaden-Dämmung nicht verloren. Nachteilig an dem Kompromiss sind die hohen Kosten. Für eine zukunftsgerechte Sanierung wird zudem eine Variante mit Komfortlüftung inklusive Wärmerückgewinnung berücksichtigt (DKFF4+L).

In einer kurz- und mittelfristigen Perspektive der Energieversorgung werden Einfamilienhäuser (EFH)-Reihen zu Energienetzen zusammengefasst und Ölheizungen, die am Ende ihres Lebenszyklus angelangt sind, mit Luft/Wasser-Wärmepumpen (LWP) ersetzt. Für die unsanierten Mehrfamilienhäuser der EBG Bern (am Martiweg 9-17 und Hauensteinweg 12) kommen Sole/Wasser-Wärmepumpen (SWP) zum Einsatz. Das Erdsondenfeld beim Martiweg versorgt zu dem MFH auch umliegende EFH mit Heizwärme.

Die genannten Massnahmen zur kurz- und mittelfristigen Energieversorgung sind mit drei längerfristigen Varianten vereinbar. Hierbei werden eine vollständige Heizenergieversorgung durch Sole/Wasser-Wärmepumpen (SWP) (Variante 1), ein Holzschnitzelkraftwerk (Variante 2) oder durch den Anschluss an ein Nahwärmenetz (Variante 3) betrachtet. In der längerfristigen Perspektive werden zudem der Energiebedarf und die für Solarkollektoren bzw. PV verfügbare Dachfläche von Neubauten am Nord und Südrand der Siedlung in Betracht gezogen. Neben den oben genannten Technologien werden Wärmepumpenboiler zur Warmwasser Versorgung und eine PVT (bei Variante 1 zur Quellenunterstützung und zur Regeneration des Erdsondenfeldes) resp. PV (bei Varianten 2 und 3) – Anlage berücksichtigt. Für die PV-/ PVT-Anlagen werden ausschliesslich verfügbare Dachflächen der Neubauten vorgesehen.

Die Entwicklung geht bei allen Energieversorgungsvarianten hin von einer dezentralen Energieversorgung zu einem einzelnen (V2 und V3) oder zu mehreren (V1) Energienetzen. Der Energiemix verschiebt sich von zurzeit Öl- und Gas als primären Energiequellen zu ausschliesslich Elektrizität (V1), Grossteils Holz (V2) oder Energieträger des Fernwärmenetzes (V3).

Die Einschätzung zur technischen Machbarkeit bekräftigt die Sinnhaftigkeit einer möglichst weitgehenden energetischen Erneuerung der bestehenden Gebäude der Siedlung. Mit Variante DKFF4 (und DKFF4+L) wird die Umweltwärme effizient genutzt und die Lärmemissionen von LWP sind deutlich tiefer. Ausgehend von diesem Sanierungsniveau ist in Variante 1 der Siedlungsrand als Fläche für die benötigten Erdsonden ausreichend und die Bewohner werden nur mit relativ geringfügigen Einschränkungen konfrontiert. Auch für die Variante 2 kann das Heizkraftwerk (-45 % DKFF4 resp. -53 % bei DKFF4+L) sowie das Holzschnitzellager kleiner (-51 % DKFF4 resp. -59 % bei DKFF4+L) dimensioniert werden. Dadurch entschärft sich die Problematik des Verkehrsaufkommens zur Lagerbewirtschaftung.

Die Ergebnisse zeigen, dass die jährliche Umweltbelastung aus dem Energieverbrauch mit der Umsetzung von Varianten 1-3 mehr als halbiert werden kann. Die niedrigste Umweltbelastung ist bei der SWP-Variante 1 zu erwarten. Darauf folgt das Holzschnitzelkraftwerk aus Variante 2 und umwelttechnisch am schlechtesten schneidet das Fernwärmenetz (V3) ab.

Die benötigten Investitionen zwischen Variante 1 und 2 sind vergleichbar. Grösster Kostenpunkt sind die Massnahmen zur energetischen Erneuerung. Die initialen Investitionen bei Variante 3 sind für die Mehrheitseigentümer (EBG Bern sowie BBE) am geringsten, da diese im Preis beim Energiebezug aus dem Fernwärmenetz enthalten sind und somit erst im Betrieb eine Rolle spielen. Es wird zudem ersichtlich, dass mit der energetischen Erneuerung Investitionen in die Energieversorgungstechnologien eingespart werden.

Für eine abgeklärte Entscheidung sind weitere Untersuchungen notwendig. Insbesondere sind die Energieversorgungsvarianten ökonomisch unter Berücksichtigung der Betriebskosten zu vergleichen. Auch in der technischen Analyse werden Fragestellungen aussen vor gelassen, die sich während einem Betrieb stellen werden. Beispiele dafür sind die Energiespeicherung (z. B. elektrischer oder thermischer Quartierspeicher), die Steuerung von Lasten und der daraus resultierende Eigenverbrauch. Für die Bewertung anhand von ökologischen Kriterien ist neben dem bisherigen Untersuchungsrahmen (Heizung, Warmwasser und Lüftung) auch die Graue Energie der PV/ PVT- Anlage oder aus den verwendeten Dämmmaterialien bei der Sanierung zu berücksichtigen.

Die Untersuchung zeigt für die Siedlung Weissenstein, dass ein nachhaltiges Energiekonzept nicht ohne umfangreiche energetische Erneuerung zu erreichen ist. Für eine nachhaltige Energieversorgung überzeugt die Variante 1 zur Nutzung der Umweltwärme durch eine geringe Umweltbelastung, die zu vertretbaren Investitionen erreicht werden kann. Zudem sind bei diesem auf Strom basierten System Risiken zu umgehen, die beim Energieträger Holz (Verfügbarkeit oder soziale Akzeptanz eines Kraftwerks) oder beim Fernwärmenetz (Preisentwicklung) bestehen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] BAFU (2013): Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit - Bundesamt für Umwelt BAFU, <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01750/index.html?lang=de>, (06.01.2016).
- [2] BE (2015): Bevölkerungsstatistik im Kanton Bern - die wichtigsten Zahlen, <http://www.fin.be.ch/fin/de/index/finanzen/finanzen/statistik/bevoelk.html>, (13.10.2015).
- [3] BFS (2015): Bevölkerungsstand und -struktur, <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/01/02.html>, (13.10.2015).
- [4] BKW (2015): Wärmeverbund Schliern, Köniz - Informationsveranstaltung Baubeginn. . Bern.
- [5] BVE (2015): Förderprogramm 2015. Bau-, Verkehrs, und Energiedirektion Bern. Bern.
- [6] DIN EN 14511 (2013): Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumbeheizung und -kühlung.
- [7] Dreher, M. (2014): Holzenergie: Voll im Trend für Sanierung und Neubau. Bauen & Modernisieren. , Zürich.
- [8] Eicher, H. u. a. (2014): Erneuerbare Energien. . Zürich.
- [9] Energieschweiz (2002): Erneuerbare Energien Im Wald wächst Wärme. . Bern.
- [10] Energiestadt (2016): Zwei Zielgrössen: Primärenergie und Treibhausgasemissionen. Energiestädte.
- [11] Erzer, A. (2015): Grobkonzept Wärmeversorgung und energetische Sanierungsmöglichkeit Siedlung Weissenstein. Fachhochschule Nordwestschweiz. Brugg.
- [12] EWB (2011): Energie Wasser Bern; Energiezentrale Forsthaus, http://www.ewb.ch/de/uploads/media/Brosch_Energiezentrale.pdf.

- [13] ewb (2015): Gespräch vor Ort bei der ewb mit Martin Jutzeler (StV Abteilung Netze Wärme).
- [14] Gebäudeprogramm (2015): Das Gebäudeprogramm; Was wird gefördert? Gebäudeprogramm Schweiz.
- [15] GIS-Bern (2010): Bohrprofile aus Erdsondenbohrungen, Büro für Ingenieurgeologie AG, Aufgenommen an der Liegenschaft Schwarzenburger Strasse 65-71, Teufe bis 200 m. . Bern.
- [16] Hall, M. (2015): Netto Null-und Plusenergiegebäude-Hintergründe und Erfahrungen aus internationalen Projekten.
- [17] hieristenergie (2011): Hier ist Energie Holzwärmenetz Châtel-St-Denis liefert jährlich 7 Mio. kWh. . Chatel-St-Denis.
- [18] Hoppmann, J., Volland, J., Schmidt, T.S., Hoffmann, V.H. (2014): The economic viability of battery storage for residential solar photovoltaic systems – A review and a simulation model. *Renew. Sustain. Energy Rev.* Vol. 39, Nr. 0, S. 1101–1118.
- [19] Huber, A. (2006): Rechenmethode WPesti: Modellbeschreibung, https://www.minergie.ch/tl_files/download/WPesti_Modellbeschreibung.pdf.
- [20] INFRABLOW (2010): REFH Siedlungsweg 25 Blower-Door-Messung mit Leckagensuche. . Bern.
- [21] Jungbluth, N., Itten, R., Stucki, M. (2012): Umweltbelastungen des privaten Konsums und Reduktionspotenziale. ESU-Services. Uster.
- [22] KBOB (2014): Ökobilanzdaten im Baubereich. Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren. Bern.
- [23] Keel, A. (2013): Standortevaluation Holz-WKK. . Zürich.
- [24] Ralf, D., Thomas, A. (2014): Stadtverträgliche Luft/Wasser Wärmepumpen als Hauptwärmeerzeuger. Institut Energie am Bau. Zürich.
- [25] Röthlisberger, R. (2015): Faktenblatt C=2-Emissionsfaktoren des Treibhausgasinventars der Schweiz. Bundesamt für Umwelt (BAFU). Bern.
- [26] Schmid, C. (2013): Heizung, Lüftung, Elektrizität: Energietechnik im Gebäude. vdf Hochschulverlag AG.
- [27] SGV (2014): Die Energiezukunft in Gemeinden. SGV Schweizerischer Gemeindeverband. Bern.
- [28] SIA (2008): 2028 Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik.
- [29] SIA (2005): Heizungsanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast.
- [30] SIA (2008): Merkblatt 2023: Lüftung in Wohnbauten.
- [31] SIA (2008): Merkblatt 2023: Lüftung in Wohnbauten.
- [32] SIA (2014): SIA 384.501 Radiatoren und Konvektoren - Teil 1: Technische Spezifikationen und Anforderungen.
- [33] SIA (2009): Thermische Energie im Hochbau. SIA. Zürich.
- [34] Stadt Bern (2014): Diverse Angaben zu ausgesuchten Kleinquartieren der Stadt Bern, Ende 2014. Polizeiinspektorat Stadt Bern, Eidg. Departement für auswärtige Angelegenheiten. Bern.
- [35] STEAG (2014): Biomasse-Heizkraftwerk Werl, https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Biomasse-Heizkraftwerk_Werl&oldid=128011704.
- [36] Stocker, M. (2013): Lärmtechnische Beurteilung von Luft/Wasser-Wärmepumpen. FWS-Tagung. , Solothurn.
- [37] topten (2012): Boiler auswechseln – und aus Luft wird stromsparend Warmwasser, <http://www.topten.ch/uploads/File/38-39-HG-0312-Waermepumpen-LOW.pdf>.
- [38] Vaillant (2015): Systembroschüre Vaillant Geotherm WP, <http://www.vaillant.ch/downloads/prospekte-und-broschueren/deutsch-5/vaillant-systembroschuere-geotherm-wp-d-264250.pdf>.
- [39] W2H (2015): Arbeitsbesprechung 2 am 25.05.2015 in Bern bei den W2h Architekten.

- [40] W2H (2015): Projektabsprache FHNW und W2H am 28.08.2015 in Bern. W2H Architekten AG. Bern.
- [41] Zehnder (2015): Produktdatenblatt: Zehnder excelsior, https://www.zehnder-systems.ch/download/90672/de_ch-15812.pdf.

ANHANG

A1 Methodisches Vorgehen

A.1.1 Bilanzierungsrahmen

Für diese Untersuchung liegt die Systemgrenze in der Regel auf der Heiz- und Wärmeenergie (siehe Markierung in Abbildung 29). Der Bilanzierungsrahmen folgt der Logik gemäss Hall [16].

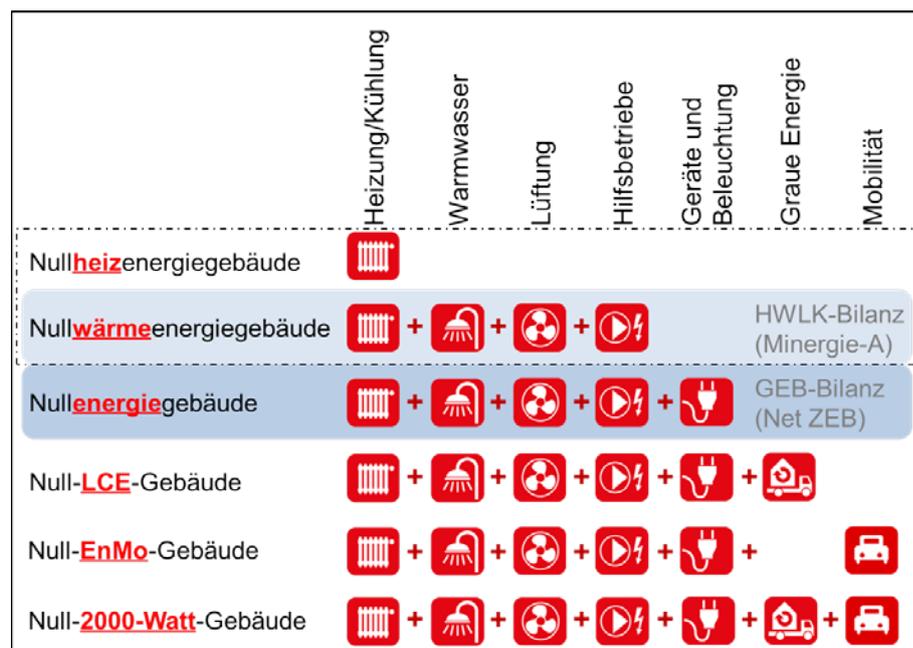


Abbildung 29 Bilanzierungsrahmen Siedlung Weissenstein in Anlehnung an [16].

A.1.2 Heizleistung

Die Kenntnis der benötigten Wärmezufuhr zur Einhaltung einer spezifischen Innentemperatur erlaubt es, Wärmeerzeuger und Wärmeabgabesysteme zu dimensionieren. Basierend auf der benötigten Wärmeleistung (Heizleistung) kann bei festgelegtem Wärmeabgabesystem die minimale Vorlauftemperatur abgeleitet werden, die zur Einhaltung der vordefinierten Innentemperatur des Gebäudes notwendig ist. Aufgrund der Vorlauftemperatur kann die Eignung verschiedener Wärmeerzeuger beurteilt werden. Die Berechnung der Heizleistung ist somit für die Bewertung von Energiekonzepten von Relevanz. Im folgenden Abschnitt wird die Methodik zur Ermittlung der Heizleistung beschrieben.

Basierend auf der SIA Norm 384.201 ist die Norm-Heizlast eines Gebäudes wie folgt zu berechnen [29]:

$$\Phi_{HL} = \sum \Phi_{T,i} + \sum \Phi_{V,i} + \sum \Phi_{RH,i} \quad [W] \quad (1)$$

Φ_{T} umfassen die Transmissionswärmeverluste aller beheizten Räume i , Φ_{V} zeigt die Lüftungswärmeverluste aller beheizten Räume. Der Unterbruch einer Beheizung benötigt eine zusätzliche Heizleistung. Diese ist unter Φ_{RH} zusammengefasst.

In der Heizlast-Berechnung für die Siedlung Weissenstein wird nicht davon ausgegangen, dass die Raumtemperatur aufgrund von einem unterbrochenen Heizbetriebs abgesenkt wird. Aus diesem Grund wird der Koeffizient ($\Phi_{RH,i}$) nicht weiter berücksichtigt. Die Annahme orientiert sich an der Norm zur Heizlast [29].

Alternativ kann die benötigte Heizleistung wie folgt eingeschätzt werden [26]:

$$\Phi_h = \frac{(Q_T + Q_V) \cdot A_E}{t} \cdot \frac{\theta_{int} - \theta_e}{\theta_{int} - \theta_{me}} \quad [\text{W}] \quad (2)$$

In dieser vereinfachten Berechnung werden die jährlichen Transmissionswärmeverluste Q_T und Lüftungswärmeverluste Q_V in kJ/m^2 aufsummiert, mit der A_E multipliziert und durch die Dauer eines Jahres in Sekunden (t) dividiert. Das Ergebnis wird mit der Differenz der Innen- (θ_{int}) und Aussentemperatur (θ_e) im Verhältnis zur Differenz der Innen- und dem Jahresmittel der Aussentemperatur (θ_{me}) multipliziert. In diesem Bericht wird die Heizleistung aufgrund des Mittels aus Formel (1) und (2) berechnet.

A.1.2.1 Transmissionswärmeverluste

Die Transmissionswärmeverluste setzen sich zusammen aus den Transmissionswärmeverlusten in Watt pro Kelvin eines beheizten Raumes i an die äussere Umgebung e ($H_{T,ie}$), an die äussere Umgebung durch einen unbeheizten Raum u ($H_{T,iue}$), an das Erdreich g ($H_{T,ig}$) und an einen benachbarten beheizten Raum j ($H_{T,ij}$). Diese Wärmeverluste werden mit der Differenz zwischen der Norm-Innen- ($\theta_{int,i}$) und der Norm-Aussentemperatur (θ_e) multipliziert [29](siehe Formel (3)).

$$\Phi_{T,i} = (H_{T,ie} + H_{T,iue} + H_{T,ig} + H_{T,ij}) \cdot (\theta_{int,i} - \theta_e) \quad [\text{W}] \quad (3)$$

Die Berechnung der Transmissionswärmeverluste wird dahingehend vereinfacht, dass das gesamte Gebäude betrachtet wird und nicht alle einzelnen Räume.

A.1.2.2 Lüftungswärmeverluste

Mithilfe des Norm- Lüftungswärmeverlust-Koeffizienten ($H_{V,i}$) und der Differenz der Innen- und der Aussentemperatur werden die Lüftungswärmeverluste für Raum i berechnet.

$$\Phi_{V,i} = H_{V,i} \cdot (\theta_{int,i} - \theta_e) \quad [\text{W}] \quad (4)$$

Der Lüftungskoeffizient ($H_{V,i}$) wird durch das Produkt aus dem Luftvolumenstrom des beheizten Raumes i (\dot{V}_i) der Dichte (ρ) bei der Innentemperatur ($\theta_{int,i}$) und der spezifischen Wärmekapazität der Luft (c_p) berechnet (siehe Formel (4)).

$$H_{V,i} = \dot{V}_i \cdot \rho \cdot c_p \quad [\text{W/K}] \quad (5)$$

Der Norm-Luftvolumenstrom ohne Komfortlüftung wird aus der Summe der Infiltration von angeströmter Luft durch die Gebäudehülle ($\dot{V}_{inf,i}$) berechnet, wobei der Mindestluftwechsel je Stunde von $\dot{V}_{min,i}$ mindestens eingehalten wird.

$$\sum \dot{V}_i = \max\left(\sum \dot{V}_{inf,i}, \sum \dot{V}_{min,i}\right) \quad [m^3/h] \quad (6)$$

Der Luftvolumenstrom aufgrund von Infiltration ($\dot{V}_{inf,i}$) kann ohne mechanischer Lüftung wie folgt berechnet werden:

$$\dot{V}_{inf,i} = V_i \cdot n_{50} \cdot e_i \cdot \varepsilon_i \quad [m^3/h] \quad (7)$$

(V_i) zeigt hierbei das Raumvolumen, (n_{50}) die Luftwechselrate pro Stunde bei einer Druckdifferenz von 50 Pa zwischen dem Inneren und Äusseren des Gebäudes unter Berücksichtigung von Lufteinlässen. Zudem gehen hierbei der Korrekturfaktoren (e_i) für die Abschirmung und der Höhenkorrekturfaktor (ε_i) in die Berechnung ein.

Der hygienische Mindest-Luftvolumenstrom durch das Produkt des Mindestluftwechsels und das Raumvolumen berechnet (8).

$$\dot{V}_{min,i} = n_{min} \cdot V_i \quad [m^3/h] \quad (8)$$

Bei Berücksichtigung einer Komfortlüftung wird der Luftvolumenstrom für das gesamte Gebäude wie folgt berechnet:

$$\sum \dot{V}_i = 0.5 \cdot \sum \dot{V}_{inf,i} + (1 - \eta_v) \cdot \sum \dot{V}_{su,i} + \sum \dot{V}_{mech,inf,i} \quad [m^3/h] \quad (9)$$

Neben der Infiltration durch die Gebäudehülle wird der (thermisch wirksame) Luftvolumenstrom aus der Zuluft ($\dot{V}_{su,i}$) durch den Wirkungsgrad der der Wärmerückgewinnungsanlage (η_v) reduziert. Hinzu kommt die Summe der überschüssigen Abluft ($\dot{V}_{mech,inf,i}$), die durch Aussenluft ersetzt wird. Der Luftvolumenstrom muss dem Mindestluftvolumenstrom entsprechen [29]. Aufgrund fehlender Angaben zur Komfortlüftung wird von einem Luftvolumenstrom analog zur natürlichen Lüftung ausgegangen [29].

A.1.2.3 Leistungszuschlag für Warmwasser

Die Wärmeleistung für die Bereitstellung von Warmwasser wird gemäss Formel (10) berechnet (siehe [19]).

$$\dot{Q}_{WW} = \frac{Q_{WW} \cdot A_E \cdot \eta_{vert} \cdot 1000kJ/MJ}{8760 h \cdot 3600 s/h} \quad [kW] \quad (10)$$

Für die Berechnung wird der Warmwasserbedarf Q_{WW} gemäss Standardnutzung [33] in MJ/m² A_E verwendet. Es wird somit ein durchschnittlicher Warmwasserbezug berücksichtigt. Die Speicher- und Verteilverluste η_{vert} werden in vorliegender Arbeit vernachlässigt.

A.1.3 Wärmeabgabeleistung

Die Wärmeleistung eines Radiatorenelements kann wie folgt berechnet werden [32]:

$$\Phi = KM \cdot \Delta T^n \quad [\text{W}] \quad (11)$$

KM stellt in diesem Modell eine Konstante dar. Delta T wird aus der Differenz des Mittels der Vor- (t_1) und Rücklauftemperaturen (t_2) und der Raumtemperatur (t_r) berechnet.

$$\Delta T = \frac{t_1 + t_2}{2} - t_r \quad [^\circ \text{C}] \quad (12)$$

Generell wird die Wärmeleistung von Radiatoren durch die Hersteller kommuniziert, wobei der Berechnung eine Norm-Übertemperatur von 50 Kelvin zugrunde liegt. Die Wärmeleistung anderer Übertemperaturen kann mithilfe obestehender Formel ermittelt werden.

A.1.4 Technologien der Energiebereitstellung

A.1.4.1 Luft/Wasser-Wärmepumpe

Der Strombedarf von LWP wird mithilfe des Programms Polysun berechnet und basiert auf den GEAK plus für die EFH-Typen. Die Simulation wird für ein durchschnittliches EFH der EBG Bern durchgeführt, wobei die Vorlauftemperatur und der Heizenergiebedarf entsprechend angepasst werden. Die Jahresarbeitszahl wird aus dem Bedarf an elektrischer Energie und der abgegebenen Wärmemenge während eines Jahres gemäss Formel (13) berechnet.

$$JAZ = \frac{\text{Abgabe th. Energie p. a. [kWh]}}{\text{Zugeführte el. Energie p. a. [kWh]}} \quad [-] \quad (13)$$

Die Berechnung zum Schalleistungspegel ist in Formel (14) abgebildet und basiert auf [24]. Die Variable P_{Heiz} zeigt die Heizleistung in kW dar.

$$L_{W,A,SdT} = 56 + (P_{\text{Heiz}} - 10) * 0.5 \quad [\text{dBA}] \quad (14)$$

A.1.4.2 Sole/Wasser- Wärmepumpe

Die Bedarfsrechnung der elektrischen Energie von SWP-Systemen entspricht jener von LWP (siehe Abschnitt A.1.4.1). Mithilfe der Gebäudesimulation eines beispielhaften EFH der EBG Bern wird die Jahresarbeitszahl von SWP analog zur Berechnung für Luft/Wasser-Wärmepumpe ermittelt (siehe A.1.4.1 und Formel (13)).

Die Sondenlänge der Sole/Wasser- Wärmepumpe wird gemäss Formel (15) berechnet.

$$\text{Sondenlänge} = \frac{\text{Heizwärmebedarf p. a. [kWh]}}{\text{Entzugsleistung} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}} \right] * \text{Volllaststunden p. a. [h]}} \quad [\text{km}] \quad (15)$$

Basierend auf der Annahme zur Bohrtiefe wird die Anzahl Sonden berechnet (Formel(16)).

$$\text{Anzahl_Sonden} = \frac{\text{Sondenlänge [km]}}{\text{Bohrtiefe [km]}} \quad [\text{Anzahl}] \quad (16)$$

Die Möglichkeit einer thermischen Regeneration der Erdsondenfelder sowie die Entlastung der Erdsondenfelder durch die Nutzung von Solarwärme werden mit Hilfe der nachfolgenden Entscheidungsbäume geprüft und quantifiziert. Die folgenden Annahmen und Werte werden für die Entscheidung zu Grunde gelegt:

Q_h : Heizwärmebedarf aller gemäss Sanierungsvariante DKFF4 ertüchtigter Bestandsbauten zuzüglich des Heizwärmebedarfs der Ergänzungsbauten der Siedlung (siehe Kapitel 5.2 und Anhang A.2.1.1), Ein-Stundenwert

$Q_{\text{therm PVT}}$: solarer Wärmeertrag des PVT-Kollektors, Ein-Stundenwert, berechnet mittels Polysun

T_{PVT} : Austrittstemperatur des PVT-Kollektors, Ein-Stundenwert, , berechnet mittels Polysun

T_{Erdsonde} : Austrittstemperatur der Erdsonde, Ein-Stundenwert

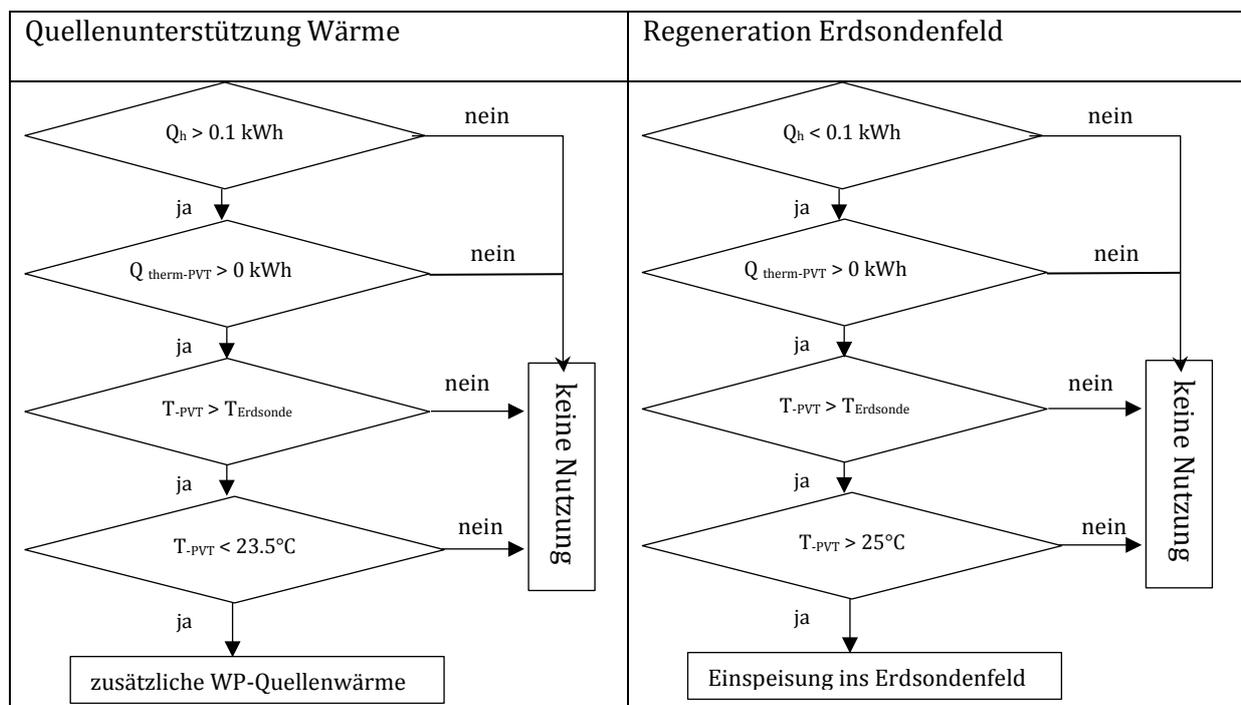


Abbildung 30 Entscheidungsschema Nutzung Solarthermie.

A.1.4.3 Holzsnitzelheizung

Die durch das Holzsnitzelkraftwerk bereitgestellte Heizenergie deckt während der Heizperiode auch den Bedarf an Warmwasser der Siedlung Weissenstein. Der Heizenergiebedarf sowie der Energiebedarf für Warmwasser werden mithilfe der GEAK plus ermittelt.

A.1.4.4 Photovoltaik und thermische Sonnenkollektoren

Ohne Berücksichtigung gestalterischer Grenzen der Ergänzungsbauten am Siedlungsrand ist es möglich auf deren Dächern etwa 3'800 m² Photovoltaik oder PVT Module zu installieren. Diese Fläche entspricht etwa 60 % der zur Verfügung stehenden Dachfläche

Wie in A.1.4.2 beschrieben, kann ein Teil der thermischen Energie aus den PVT-Modulen zur Unterstützung der WP und zur Regenerierung des Sondenfeldes genutzt werden. Der thermische Ertrag wird mithilfe der Simulationssoftware Polysun berechnet (siehe A.2.4). Die Vorgehensweise zur Berechnung der verfügbaren Energie für die Quellenunterstützung und der Regenerierung des Sondenfeldes sind im Abschnitt A.1.4.2 dargelegt.

Es wird angenommen, dass 100 % der elektrischen Energie aus der PVT (V1)- oder der herkömmlichen PV-Anlage (V2 und V3) innerhalb der Siedlung genutzt werden kann. Die elektrische Endenergie wird daher um die jährlich erzeugte Elektrizität reduziert.

A.1.5 Wärmeverteilung

In den längerfristigen Wärmekonzepten werden Verluste aus dem Wärmeverteilnetz berücksichtigt. Die Verluste [kW/(m K)] stehen in Abhängigkeit von der Übertemperatur [Kelvin], der Volllaststunden sowie der Verteilnetzlänge [m] und werden zum Heizenergiebedarf addiert (siehe (17)).

$$Q_{h \text{ inkl. Verluste}} = Q_h * (1 + \text{Netz}_{[m]} * \text{Volllast}_{[h]} * \text{Übertemp}_{[K]} * \text{Verluste}) \quad [\text{kWh}] \quad (17)$$

A.1.6 Kostenrechnung

Die Abschätzung der Investitionskosten für die Heizenergiebereitstellung basiert auf einem Durchschnittspreis pro kW Heizleistung je betrachteter Technologie. Analog dazu werden die Investitionskosten der PV- und PVT-Module berechnet. Für die Bereitstellung von Warmwasser sind langfristig Wärmepumpenboiler vorgesehen. Die damit zusammenhängenden Investitionskosten inkl. Installation werden durch einen Fixpreis pro Objekt berücksichtigt. Für die Gebäudesanierung werden Gesamtkosten pro m² A_E und Gebäudekategorie mithilfe des GEAK plus berechnet.

A2 Datengrundlage

A.2.1 Energiebedarfsrechnung

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse zur Energiebedarfsrechnung pro Gebäudetyp aufgeführt.

Tabelle 4 Übersicht Heizwärmebedarf und Heizleistung inkl. Warmwasser nach Gebäudetyp.

Gebäude		Heizwärmebedarf + Warmwasser [kWh]				Heizleistung + Warmwasser [kW]				
		Ist Zustand	Sanierungsvariante			Ist Zustand	Sanierungsvariante			
Typ	AE [m ²]		DKFF1	DKFF4	DKFF4+L		DKFF1	DKFF4	DKFF4+L	
A	3'864	490'513	316'097	230'337	194'703	182	124	98	83	
B	15'837	2'010'859	1'356'263	1'074'716	899'630	704	502	417	354	
C	8'376	1'092'370	706'376	503'956	422'290	369	250	189	158	
D	1'598	195'933	139'914	99'431	81'942	69	51	39	33	
E	3'150	399'963	269'763	213'763	178'938	140	100	83	70	
F	1'800	228'550	154'150	122'150	102'250	80	57	47	40	
G	5'911	806'299	466'770	335'588	282'229	285	183	142	120	
H	2'400	304'733	205'533	162'867	136'333	107	76	63	54	
I	374	51'031	29'542	21'239	17'862	18	12	9	8	
J	706	92'251	55'598	38'830	32'515	32	21	16	13	
K	6'553	856'290	516'068	360'428	301'813	301	199	149	125	
L	4'114	444'198	281'238	200'558	164'331	161	112	86	71	
M	2'805	316'108	162'456	129'108	104'408	116	65	54	44	
mL	2'834	268'915	169'725	128'475	103'520	95	65	52	41	
N	4'224	535'744	335'808	209'909	172'245	187	127	85	69	
		64'546	8'093'756	5'165'299	3'831'356	3'195'010	2'847	1'945	1'530	1'283

A.2.1.1 Energiebedarf für Heizung und Warmwasser

Zu den Gebäudekategorien J, I, E, F und H wurden keine GEAK-Plus ausgestellt. Für die Abschätzung des gesamthaften Heizenergiebedarfs der bestehenden Siedlung Weissenstein wurden daher Annahmen getroffen (Tabelle 4).

Tabelle 5 Annahmen zum kumulierten Heizenergiebedarf.

Gebäudekategorie	ähnliche Gebäudekategorie
J	K
I	G
E	B
F	B
H	B

Tabelle 6 GEAK plus zertifizierte Gebäude.

Gebäudekategorie	Strasse Nr.
A	Dietlerstrasse 34
B	Siedlungsweg 15

C	Hauensteinweg 31
D	Martiweg 21
G	Dietlerstrasse 10
K	Raineggweg 3
L	Bridelstrasse 2
mL	Könizstrasse 81
M	Hauensteinweg 12-16
N	Martiweg 9 und 11

Der Wärmebedarf für die Bereitstellung von Warmwasser wurde aus der Norm [33] entnommen (Tabelle 5).

Tabelle 7 Wärmebedarf Warmwasser p.a. gemäss SIA 380/1:2009.

Gebäudetyp	Wärmebedarf (MJ/m ² A _E)
Wohnen MFH	75
Wohnen EFH	50
Schulen	25

Der Heizenergiebedarf von den geplanten Erweiterungsbauten am Süd- und Nordrand der Siedlung wurde entsprechend der Richtlinien vom Gebäudezertifikat Minergie-P angenommen. Das Gebäudezertifikat Minergie-P schreibt eine Unterschreitung des Grenzwertes für den Heizenergiebedarf gemäss SIA 380/1 Heizenergie von 40 % vor (entspricht dem Zielwert gemäss SIA 380/1 [33]). Wird die Temperaturkorrektur für die Region Bern berücksichtigt, ergibt sich damit ein Heizenergiebedarf von ca. 69 MJ p.a./m² A_E (siehe Tabelle 6). Der Energiebedarf bei den Neubauten für die Bereitstellung von Warmwasser wird entsprechend den Werten aus Tabelle 5 übernommen.

Tabelle 8 Heizenergiebedarf geplanter Neubauten (Zielwert gemäss SIA 380/1:2009).

Heizenergiebedarf Neubauten	Quelle
69 MJ p.a. /m ² A _E	[33]

A.2.1.2 *Energieverbrauch*

Für die Berechnung des aktuellen Verbrauchs an Heizöl und Erdgas werden Heizgradtage bereinigte Verbrauchsdaten einzelner Gebäude verwendet. Im Falle nicht verfügbarer Verbrauchsdaten, wird auf die Datengrundlage ähnlicher Gebäudekategorien zurückgegriffen (siehe Tabelle 4).

A.2.2 Leistungsberechnung

A.2.2.1 *Heizleistung*

Die Transmissionswärmeverluste werden basierend auf der Wärmedurchlässigkeit aller Bauteile gemäss GEAK-Berechnung inklusiver Wärmebrücken ermittelt. Der Reduktionsfaktor

für Bauteile, die gegen unbeheizt oder an das Erdreich grenzen, beträgt 0.8 [29]. In der Berechnung gemäss Formel (2) werden die Transmissionswärmeverluste und die Lüftungsverluste aus der GEAK-Berechnung berücksichtigt.

Aus Tabelle 7 sind die Parameter zur Heizlastberechnung sowie zum Leistungszuschlag für Warmwasser zu entnehmen. Die Werte beziehen sich auf die Ausgangssituation. Zwischen den baulichen Massnahmen können diese variieren. Die Luftwechselrate bezieht sich auf eine Blower-Door-Messung, die im Jahre 2010 in einem Gebäude der Kategorie B durchgeführt wurde. Es wurde der tiefere Wert aus der Messung bei geschlossener Estrichluke verwendet.

Tabelle 9 Parameter zur Heizlast in der Ausgangssituation.

Parameter	Beschreibung	Wert	Quelle
$\rho \cdot c_p$	Produkt aus Dichte und Wärmekapazität der Luft	0.34 [kJ]/(m ³ K)]	[29]
n_{50}	Luftwechselrate in EFH	7.6 h ⁻¹	[20]
n_{50}	Luftwechselrate in MFH	4 h ⁻¹	[29]
e_i	Abschirmungskoeffizient gem. Vorstadtgebiet	0.03	[29]
ε_i	Höhenkorrekturfaktor	1	[29]
$\dot{V}_{min,i}$	Hygienischer Mindest-Luftvolumenstrom für Raum i ohne Lüftungsanlage	0.3 h ⁻¹	[29]
η_v	Wirkungsgrad Wärmerückgewinnung	0.7	-
$\dot{V}_{su,i}$	Zuluftvolumenstrom	(0.7* A _E)[m ³ /h]	[33]
A _E	Energiebezugsfläche	[m ²]	Gebäudepläne
Q _{WW}	Jährlicher Wärmebedarf Warmwasser	[MJ]/m ² A _E]	[33]

A.2.2.2 Wärmeabgabeleistung

Die Anzahl Radiatoren und damit die Anzahl Heizelemente werden auf Grundlage der Gebäudepläne ermittelt (siehe Tabelle 8). Die Wärmeleistung wird anhand des Zehnder excelsior Heizkörpers berechnet [41].

Tabelle 10 Anzahl Radiatoren gemäss Gebäudetyp

Gebäudetyp	Anzahl Radiatoren	Abgabefläche [m ²]
A	9	9.698
B	11	15.805
C	12	15.4915
D	16	19.518

A.2.2.3 Gegenüberstellung Abgabeleistung und benötigte Heizleistung: JAZ Berechnung

Für die Berechnung der JAZ werden folgende Luft/Wasser- und SWP berücksichtigt [38]:

Tabelle 11 verwendete L/W WP, S/W WP für die JAZ Berechnung.

geoTHERM und geoTHERM plus	Einheit	VWS 141/3	VWL102/3S
Heizleistung (A2W35 ΔT_{5K} n. EN 14511)	kW	14	9,6
Leistungsaufnahme	kW	3	2,5
Leistungszahl		4,7	3,9
Heizleistung (A2W45 ΔT_{5K} n. EN 14511)	kW	13,1	9,1
Leistungsaufnahme	kW	4,3	3
Leistungszahl		3,1	3,1

A.2.2.4 Klima

Für die Berechnungen werden die Klimadaten aus Tabelle 10 verwendet.

Tabelle 12 Klimadaten

Parameter	Beschreibung	Wert	Quelle
θ_{int}	Innenraumtemperatur	20 °C	[29]
θ_e	Norm-Aussentemperatur (Station: Bern Liebefeld)	- 7 °C	[28]
θ_{me}	Jahresmittel Aussentemperatur (Station: Bern Liebefeld)	9.1 °C	[28]

A.2.3 Sanierungsvarianten

A.2.3.1 Physikalische Eigenschaften der Bauteile

In Tabelle 11 sind die eingangs charakterisierten Sanierungsvarianten inklusive Werte zur Wärmeleitfähigkeit aufgeführt.

Tabelle 13 Eigenschaften der Bauteile gem. Sanierungsvarianten.

Bauteil	Beschreibung	U-Wert [W/(m ² K)]	Wärme- leitfähigkeit [W/(m K)]	Sanierungs Variante
Fenster	<ul style="list-style-type: none"> • Holzmetallrahmen • 3x Verglasung • ψ-Wert: ≥ 0.04 	U _f 1.2 U _g 0.5		DKFF1, DKFF4, DKFF4+L
Aerogel Vliesmatte	AeroCalce IB 980 von Röfix		0.014	DKFF1
Aerogel Dämmplatte	MultiTherm AERO WDVS Dämmplatte von AGITEC		0.017	DKFF4, DKFF4+L
Aerogel Dämmplatten	Aevero von STO für das Fenstergewände		0.016	DKFF4, DKFF4+L
Holzfaserdämmplatten	Von der Firma Saglan		0.05	DKFF4, DKFF4+L

Die Luftdichtigkeit der Gebäude variiert in Abhängigkeit von der Sanierungsvariante. Für die Varianten DKFF1 und DKFF4 wird von einer geringfügigen Verbesserung der Dichtigkeit der Gebäudehülle ausgegangen. Die Werte entsprechen einer guten Abdichtung bei unsanierten

Altbauten. In der Variante DKFF4+L wird aufgrund eines kontrollierten Luftaustauschs die Gebäudehülle zusätzlich abgedichtet. Der n_{50} -Wert entspricht dem Zielwert bei Umbauten/Erneuerungen [31].

Tabelle 14 Annahmen zur Luftwechselrate bei 50 Pa Druckdifferenz bei den Sanierungsvarianten

Variante	Gebäudetyp	n_{50} [h ⁻¹]	Quelle
A	EFH	4	[29]
B	EFH	4	
C	EFH	1	[31]
A	MFH	2	[29]
B	MFH	2	
C	MFH	1	[31]

A.2.3.2 Kostenschätzung

Die Kostenschätzung beruht auf Daten, die im Rahmen der GEAK-Zertifizierung erhoben worden sind. Ein Auszug dieser Daten sind in Tabelle 13 zusammengestellt.

Tabelle 15 Kostenschätzung zu den Sanierungsvarianten.

Bauteil	Produkt	Preis pro m ²	Preis pro Stk.
Fenster	-	Fr. 850	
Fassade	AeroCalce IB 980 von Röfix	Fr. 250	
Fassade	MultiTherm AERO WDVS Dämmplatte von AGITEC	Fr. 450	
Dach	Saglan Holzfaserdämmung	Fr. 325	
Decke geg. unb.		Fr. 150	
Wärmebrücken			Fr. 19'740
Komfortlüftung			Fr. 20'000

Die Preiskalkulation zum Produkt AeroCalce aus der Variante DKFF1 ist der Abbildung 31 zu entnehmen.

AeroCalce +10 / Preiskalkulation Schweiz							
Pos.	Arbeitsschritte				Fläche	Untersichten	Leibungen
1	Vorarbeiten	Produkte					Breite bis 0,3m
1.1	Hochdruckreinigung			Richtpreis	SFr. 4	SFr. 5	SFr. 2
1.2	Abtragen alt Putz			Richtpreis	SFr. 38	SFr. 48	SFr. 23
1.3	Ausgleichsspachtelung	IA 780		Richtpreis	SFr. 22	SFr. 28	SFr. 13
1.4	Stopfen von Fugen			Richtpreis	SFr. 26	SFr. 33	SFr. 16
2	Verklebung AeroGel						
2.1	1. Lage AeroGel	IB 980	10 mm	PL 2014	SFr. 81	SFr. 81	SFr. 27
2.2	1. Lage AeroColl (5,56 Kg)	IA 780		PL 2014	SFr. 12	SFr. 11	SFr. 4
2.3	1. Lage Verklebung			Richtpreis	SFr. 14	SFr. 18	SFr. 8
2.4	2. Lage AeroGel	IB 980	keine	PL 2014	SFr. 0	SFr. 0	SFr. 0
2.5	2. Lage AeroColl (2,08 Kg)	IA 780		PL 2014	SFr. 4	SFr. 4	SFr. 1
2.6	2. Lage Verklebung			Richtpreis	SFr. 8	SFr. 10	SFr. 5
3	Dübelung / Gewebeeinbettung						
3.1	Spez. Dübel (Material) 6.25 Stk / m2	IF 980		PL 2014	SFr. 20	SFr. 20	SFr. 6
3.2	Dübelung setzen 6 Stk / m2			Richtpreis	SFr. 12	SFr. 15	SFr. 7
3.3	Stützgewebe (1,1 m2)	IG 996		PL 2014	SFr. 10	SFr. 10	SFr. 3
3.4	AeroPlus (9,8 Kg/ 7mm)	IA 784 Plus		PL 2014	SFr. 14	SFr. 14	SFr. 4
	AeroPlus verputzen			Richtpreis	SFr. 12	SFr. 18	SFr. 8
3.5	Stützgewebe montieren			Richtpreis	SFr. 8	SFr. 10	SFr. 5
3.6	Gewebe (1,1 m2)	P50		PL 2014	SFr. 3	SFr. 3	SFr. 1
3.7	AeroPlus (4,2 Kg/ 3mm)	IA 784 Plus		PL 2014	SFr. 6	SFr. 6	SFr. 2
3.8	Gewebeamierung			Richtpreis	SFr. 10	SFr. 13	SFr. 6
4	Deckputz / Anstrich						
4.1	AeroPlus (2,8 Kg)	IA 784 Plus		PL 2014	SFr. 4	SFr. 4	SFr. 1
4.2	Kellenwurf			Richtpreis	SFr. 34	SFr. 43	SFr. 20
4.3	Voranstrich (200 g)/ Ausführung	PG Premium		PL 2014	SFr. 4	SFr. 4	SFr. 1
4.4	Deckputz / Ausführung	715		Richtpreis	SFr. 16	SFr. 20	SFr. 10
4.5	Deckanstrich (2x) / Ausführung	1K Reno		Richtpreis	SFr. 15	SFr. 19	SFr. 9
Preise m2 / m1:					SFr. 252	SFr. 278	SFr. 109

Abbildung 31 Preiskalkulation AeroCalce Wärmedämmsystem (10 mm).

A.2.3.3 Fördergelder

In Tabelle 14 ist das zurzeit gültige kantonale und nationale Fördersystem aufgeführt. Diese Daten stellen die Grundlage für die Bewertung der Sanierungsmassnahmen dar.

Tabelle 16 Fördersysteme in Bern und auf Bundesebene.

	Bedingung	Betrag [CHF]	Förder- ebene	Quell e
Plusenergie Gebäude	100-250 m ² A _E	25'000.-	Kanton Bern	[5]
	Ab 250 m ² A _E	100.-/m ² A _E		
GEAK (B/A) Sanierung	100-250 m ² A _E	20'000.-	Kanton Bern	[5]
	Ab 250 m ² A _E	80.-/m ² A _E		
Verbesserung in der GEAK Klassierung	2 Effizienzklassen	50.-/m ² A _E	Kanton Bern	[5]
	3 Effizienzklassen	70.-/m ² A _E		
	4 Effizienzklassen	80.-/m ² A _E		
	5 Effizienzklassen	90.-/m ² A _E		
	6 Effizienzklassen	100.-/m ² A _E		
Effizienzbonus	Plusenergie	30.-/m ² A _E	Kanton Bern	[5]
	GEAK A/A	20.-/m ² A _E		
	GEAK B/B	10.-/m ² A _E		

Th. Solaranlagen	Aperturfläche bis 10 m ²	2'300.-		
	Aperturfläche ab 10 m ²	300.- + 200/m ²		
Wärmenetze Holz	Leistung ≥ 70 kW	50.-/MWh p.a.		
Wärmenetz Erneuerbare		50.-/MWh p.a.		
Ersatz Elektroheizung	Holzheizung, Fernwärme, Wärmepumpe	2'500.-		
	Hydraulische Heizwärmeverteilung	7'000.-		
Fensterersatz	U-Wert ≤ 0.7 W/(m ² K)	30.-/m ² A _E	Bund (Gebäude - programm)	[14]
Wand, Dach, Boden (geg. Aussenklima)	U-Wert ≤ 0.2 W/(m ² K)	30.-/m ² A _E		
Wand Decke, Boden (geg. unbeheizt)	U-Wert ≤ 0.25 W/(m ² K)	10.-/m ² A _E		

A.2.4 Gebäudetechnik

A.2.4.1 Energiebereitstellung

Tabelle 17 JAZ und Übertemperatur gem. Sanierungsvariante und Tech. zur Bereitstellung von Wärme.

	Ist-Zustand	Sanierungsvarianten			Quelle
		DKFF1	DKFF4	DKFF4+L	
JAZ Luft/Wasser WP	2.6	2.7	3.2	3.3	Polysun, GEAK plus
JAZ Sole/Wasser WP	2.7	2.9	3.4	3.8	Polysun, GEAK plus
JAZ Wärmepumpen Boiler	3.3	3.3	3.3	3.3	[6]
Übertemperatur [K]	50	50	30	30	-

Tabelle 18 Datengrundlage zur Gebäudetechnik.

Bereich	Parameter	Wert	Einheit	Quelle
Erdsonde	Entzugsleistung	0.05	kW/(m K)	-
	Volllaststunden p.a.	1850	h	-
	Bohrtiefe	0.15	Km	Gem. Bohrprofil
Holzschnitzel Kraftwerk	Lagerbedarf Buche	0.0012	Sm ³ /kWh	[8]
	Heizwert Buchenhackschnitzel (Wassergehalt: 25 %, Holzfeuchtigkeit 35%)	3.75	kWh/kg	
PVT	Elektrizitätsertrag AC	366'108	[kWh]	Polysun
	Erzeugung th. Wärme	500	[MWh]	Polysun
	Quellenseitige Unterstützung der Wärmepumpe	80	[MWh]	Polysun
	Bruttofläche	3'800	[m ²]	Polysun

	PV-Anlagenleistung	593	[kW _p]	Polysun
Photovoltaik	Anzahl Module	2'715	-	Polysun
	Ertragsdaten p.a. PV AC	495'468	[kWh]	Polysun
	Bruttofläche	3'801	[m ²]	Polysun
	Ausrichtung	Süden	-	Polysun
	Neigung	30	[°]	Polysun
	PV-Anlagenleistung	488.7	[kW _p]	Polysun

A.2.4.2 Wärmeverteilnetz

4.5 bis 5.5 km beträgt die benötigte Verteilnetzlänge gemäss Abschätzungen.

A.2.5 Investitionskosten

Tabelle 19 Datengrundlage Investitionskosten Holzschnitzelanlage.

Projekt	Wärmeleistung [kW]	Investitionskosten [CHF]	Kosten [CHF/kW]	Quelle
ORC-Anlage Thurgau	7200	15'000'000	2'083	[7]
Schulhaus Faido	650	1'000'000	1'538	[9]
Schulhaus Hettlingen	1100	1'500'000	1'363	
ORC Nesslau	4200	11'000'000	2'619	[23]
Gossau Grossbäckerei Coop	600	3'100'000	5'166	[8]
Mittelwert			2'554	

Tabelle 20 Investition Wärmepumpenboiler.

Marke	Speichermenge [l]	Listenpreis inkl. MWSt [CHF]	Quelle
Kibernetik	300	3'289	[37]
Cipag/Domotec	250	4'320	
Viessmann	285	4'578	
Mittelwert		4'062	
Installationskosten		3'000	
Total Kosten pro Gebäude		7'062	

Tabelle 21 Investition Photovoltaik.

Parameter	Preis inkl. MWSt [CHF]	Quelle
Preis/Leistung [CHF/kW _p]	825	[18]

Wechselrichter [CHF/kWp]	187
Balance of System (BOS) [CHF/kWp]	704
Engineering, procurement and construction (EPC)	8%
Betriebs und Wartungskosten	1.50%
TOTAL Preis/Leistung [CHF/kWp]	1716

A.2.6 Umweltauswirkung

Die Berechnung der Primärenergie nicht erneuerbar, Treibhausgasemissionen sowie der Umweltbelastungspunkte für die gesamthafte Siedlung Weissenstein liegt der KBOB Liste zugrunde [22] (siehe Tabelle 20).

Das Fernwärmenetz beruht auf Daten der Energiezentrale Forsthaus in Bern. Die Umweltbelastung wird hierzu entsprechend der Energieträgeranteile an der el. Gesamtleistung aufgeteilt [12].

Tabelle 22 Datengrundlage Umweltbewertung.

Energieträger	KBOB Rubrik	ID-Nummer
Erdöl	Heizöl EL	41.001
Erdgas	Heizung Gas	41.002
Elektrizität	CH-Verbrauchermix	45.020
Fernwärme	Heizkraftwerk Holz	42.004
Holz schnitzel	Heizung und Warmwasser	41.007
18 % Heizkraftwerk Holz, 30 % Heizzentrale Holz, 52 % Heizzentrale Gas	Forsthaus-Mix	-

Mit Fokus auf den Heizenergiebedarf eines typischen Gebäudes der Siedlung Weissenstein werden Energieversorgungsvarianten gemäss Tabelle 21 betrachtet. Für die Quantifizierung der Umweltauswirkung wird davon ausgegangen, dass pro 1L verbranntes Heizöl 2.65 kg CO₂ und für je 1 kWh bezogener Elektrizität 0.122 kg CO₂ entstehen [25].

Tabelle 23 Energieversorgungsvarianten eines Typ D Gebäudes für die Berechnung der Treibhausgasemissionen.

Wärmeerzeuger	Volumen Wärmespeicher [l]	Fläche Solarthermie [m ²]	Peakleistung Photovoltaik [kW _p]
Ölheizung	300		
	900	12	
	3000	24	
Aussenluft-Wärmepumpe	900		
	900	12	
	900	12	4
	3000	24	
	3000	24	4
Sole-/Wasser-Wärmepumpe,	900		
	900	12	

150 m Erdsonde	900	12	4
	3000	24	
	3000	24	4