

Mit



Dr. Günter Wind

Ingenieurbüro für Physik

Marktstraße 3
A-7000 Eisenstadt

T 059010 3780 | 0680 2326415
E office@ibwind.at | www.ibwind.at



Mitglied des Fachverbandes

Konzept für ein Nullwärmehauses hinsichtlich Wärme- und Kühlenergieabdeckung

Autor: G. Wind

Status: freigegeben

Auftraggeber:

TOB – Technologieoffensive Burgenland



Eisenstadt, 18.10.2014

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
1.1	Problemstellung und Zielsetzung.....	3
2	Eckdaten des betrachteten Einfamilienhauses.....	4
2.1	Architektonische Darstellung und Daten zum Gebäude.....	4
2.2	Dachorientierung:.....	5
2.3	Nebenbauten, Fassaden:.....	5
2.4	Kompakte Geometrie – verringert Baukosten und Energieverlust.....	5
2.5	Bauphysikalisches Konzept.....	5
3	Energetisches Konzept.....	8
3.1	Grundlagen zur Simulationsrechnung.....	8
3.2	Energiekonzept.....	8
3.3	Aspekte zur Optimierung des Energiekonzepts.....	9
3.4	Ergebnisse für den Wärmebedarf.....	10
3.4.1	Einfluss der Lüftung mit Wärmerückgewinnung in einem Nullwärmehaus mit Niedrigenergie-Standard.....	10
3.4.2	Einfluss der Dämmstandard und Luftdichtheit auf die Größe der Solaranlage des Nullwärmehauses.....	12
3.4.3	Einfluss Bauteilaktivierung in einem Nullwärmehaus.....	13
3.4.4	Einfluss der Neigung der Solarkollektoren.....	16
3.5	Ergebnisse für den Kältebedarf.....	17
3.5.1	Einfluss der Lüftung mit Wärmerückgewinnung in einem Nullwärmehaus (Niedrigenergie-Standard).....	17
3.5.2	Einfluss der Dämmstärke und Luftdichtheit in einem Nullwärmehaus.....	17
3.5.3	Einfluss Bauteilaktivierung in einem Nullwärmehaus (vollsolar).....	18
3.5.4	Vergleich Leichtbau bzw. Beurteilung des SUN-Obergeschoßes.....	19
3.5.5	Einfluss Querlüftung.....	20
3.5.6	Einfluss Sonnenschutz (Jalousien).....	21
4	Mehrkosten und ökologische Amortisation.....	23
4.1	„SUN“ Niedrigenergiehaus ohne Lüftung mit Heizungssystem Luft-Wärmepumpe.....	23
4.2	Vollsolares „SUN“ Nullwärmehaus versus Niedrigenergiehaus-Standard ohne Lüftung..	24
4.3	Vollsolares „SUN“ Nullwärmehaus versus Passivhaus-Standard.....	27
4.4	Vollsolares „SUN“ Nullwärmehaus versus Passivhaus-Standard und Bauteilaktivierung	29
5	Handlungsempfehlungen.....	32
6	Unterlagen.....	34

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Der Trend im Hausbau ging in den letzten Jahren in Richtung Minimierung des Wärmeverlustes durch Einsatz besser gedämmter Bauteile und einer kompakteren Gebäudegeometrie. Das Ergebnis dieses Trends ist das Passivhaus, das nur mehr einen minimalen Energieeinsatz zur Deckung des Raumwärmebedarfs benötigt. Die alleinige Passivhausstrategie kann jedoch keine Beiträge für den sonstigen Energiebedarf für den Lebensunterhalt (Warmwasser, Strom, Mobilität) in diesem Gebäude bieten. Vielfach wurden Passivhäuser in Form eines Quaders mit leicht nach Norden geneigtem Pultdach und einer großzügig verglaste Südfassade errichtet. Mit dieser Gebäudeform werden die Hauseigentümer um die aktive Solarenergienutzung beschnitten, weil Solarmodule kaum in günstiger Orientierung ästhetisch untergebracht werden können.

Wenn wir heute ein Haus bauen, sollten wir bedenken, dass dieses Jahrzehnte lang genützt werden soll. Wir handeln dann vorausschauend und nachhaltig, wenn es auch in einigen Jahrzehnten noch fundamentale Anforderungen erfüllt. Man braucht kein Prophet zu sein, um zu erkennen, dass wir zunehmend in eine Zeit mit Energierohstoffverknappung und steigenden Energiepreisen hineinwachsen. Daher stehen wir vor der Herausforderung, das Gebäude nicht nur zum Wohn und für den Lebensalltag, sondern auch gleichzeitig zur Energieproduktion zu nützen.

Im bereits vorliegenden Leitfaden zur Optimierung der Solarenergienutzung [6] wurde gezeigt, dass eine Kombination aus Photovoltaikanlage und Wärmepumpe einer solarthermischen Zusatzheizung in ökonomischer Hinsicht vorteilhafter und in ökologischer Hinsicht etwas gleichwertig ist. Jedoch kann mit diesem Konzept keine ganzjährige Wärme- und Stromversorgung geleistet werden.

Die vorliegende Arbeit zielt auf die Erstellung eines Konzeptes für ein Nullwärmehaus ab, welches als Einfamilienhaus ausgeführt werden kann. Diese stellt eine Weiterführung bzw. Ergänzung zum oben genannten Leitfaden dar.

Die Definition Nullwärme bezieht sich dabei auf den Heizwärmebedarf, Warmwasserbedarf und den Kühlbedarf des Hauses. Der Strombedarf ist von der Betrachtung als Nullwärmehaus ausgenommen. Das Konzept soll so gestaltet werden, dass das Nullwärmehaus hinsichtlich Heizwärme und Kühlenergie 365 Tage im Jahr autark betrieben werden kann. Um dies zu erreichen sollen Speichersysteme untersucht werden die geeignet sind diese Anforderungen zu erfüllen. Speziell soll dabei auch die Speicherung in Beton (Betonkernaktivierung) untersucht werden.

Der Warmwasserbedarf stellt aufgrund seines höheren Temperaturniveaus (mind. 40°C Auslauf-Warmwassertemperatur) gegenüber 28°C für eine großzügig dimensionierte Fußbodenheizung höhere Anforderung an die vollsolare Energieversorgung als die alleinige Raumwärmeversorgung. Im vorliegenden Passivhaus sind Raumwärmebedarf und Warmwasserbedarf ungefähr gleich groß. Eine vollsolare Heizung ohne Deckung des Warmwasserbedarfs wäre daher nur eine halbe Sache, sodass in der vorliegenden Studie der Warmwasserbedarf in die Berechnungen stets eingeschlossen wurde.

2 Eckdaten des betrachteten Einfamilienhauses

2.1 Architektonische Darstellung und Daten zum Gebäude

Als betrachtetes Gebäude dient der „SUN“¹-Gebäudeentwurf [1], der als Massivfertihaus eines Bauunternehmens angeboten wird. Das Gebäude stellt ein Einfamilienhaus für 4 Personen dar.

Die Ansichten des Gebäudes sind in Abbildung 1 und Abbildung 2 ersichtlich, um eine Vorstellung von der Architektur des Hauses zu vermitteln.



Abbildung 1: Ansichten des „SUN“-Gebäudeentwurfes aus NO (links) und SW (rechts)[1]

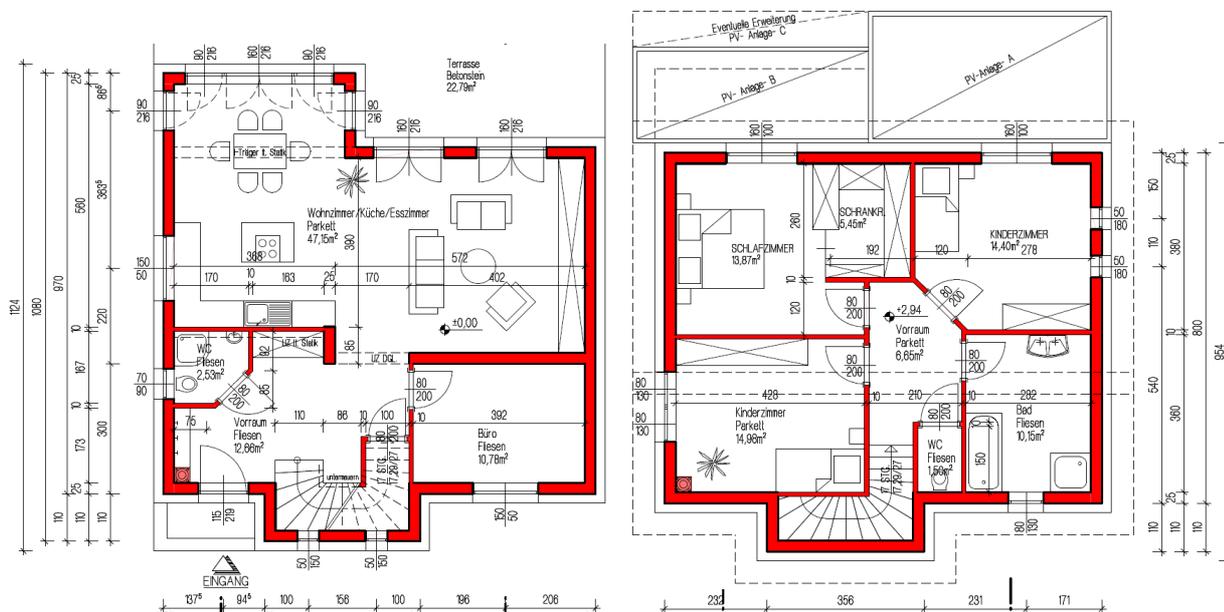


Abbildung 2: Erdgeschoss (links) und Obergeschoss (rechts) des „SUN“-Gebäudes[1]

Die Gebäudegeometrie hat den in zweierlei Hinsicht großen Einfluss auf die Energiebilanz des Gebäudes – und das auf Lebenszeit:

1. Große Dachflächen nach Süden (genauer von Ost bis West) bestimmen maßgeblich das Solarenergiepotenzial.
2. Je kompakter die Gebäudegeometrie, je kleiner die Oberfläche im Verhältnis zur Nutzfläche ist, umso kostengünstiger werden die Errichtungskosten – insbesondere die Dämmkosten zur Minimierung des Wärmeverbrauchs

¹ „SUN“ steht für sowohl für „Sonne“, der Energiespenderin, als auch für „sustainable net“ (= „nachhaltige Vernetzung“). Ziel des optimierten Entwurfes ist, dass Gebäudegeometrie, Funktionalität, Energiegewinnung, Haustechnik in einer funktionierenden „nachhaltigen Vernetzung“ optimal abgestimmt werden.

2.2 Dachorientierung:

Bei der Photovoltaik ist die Südausrichtung weniger kritisch als bei den thermischen Solaranlagen. Selbst Dächer, die nach Osten oder Westen gerichtet sind bringen noch 80% (bei 38° Neigung) bis 85% (bei 15° Neigung) des maximal möglichen Ertrags. Bei solarthermischen Anlagen, die als Zusatzheizung dienen („teilsolare Heizung“) sollen die Kollektoren mindestens 35° Neigung aufweisen (Optimum bei 50°) und nicht mehr als 30° (bei kleinen Deckungsgraden 45°) aus der Südrichtung abweichen um gerade in den sonnenschwachen Monate das Optimum ehereauszuholen. Bei einer vollsolaren Heizung ist die Orientierung wieder weniger kritisch, da der Saisonspeicher auch die Sommererträge nutzbar macht.



Abbildung 3: Das versetzte Pultdach des „SUN“-Gebäudes hat eine größere Süddachfläche als ein herkömmliches Satteldach. Gemeinsam mit den Pultdachflächen über dem Wohnzimmer und der Terrasse ergibt einen jährliches Solarenergiepotenzial, das größer ist als der Bedarf von Heizung, Warmwasserbereitung Haushaltsstrom und zukünftige Elektrofahrzeuge zusammen. [1]



Rund 115m² Dachfläche (vgl. bebauter Fläche: 121m²) sind beim „SUN“-Gebäude mit einem Neigungswinkel von 25° nach Süden orientiert und somit optimal für die Solarenergieerzeugung geeignet.

2.3 Nebenbauten, Fassaden:

Es wird empfohlen, in die Planung nicht nur das unmittelbar beheizte Gebäude hinsichtlich Solarpotential zu betrachten, sondern auch alle weiteren angeschlossenen Bauten wie Garagen, Terrassenüberdachung, Pergola, Carport. Auch hier können verbaute Flächen kostengünstig gleichzeitig auch zur Solarenergieerzeugung verwertet werden.

Als zweite Wahl bietet sich die Nutzung von Süd-Fassaden an, die jedoch 30% bis 35% weniger Einstrahlung als optimale Süddächer erhalten. Zu berücksichtigen ist auch, dass die Verschattung durch benachbarte Objekte häufiger ist als bei Dachflächen.

2.4 Kompakte Geometrie – verringert Baukosten und Energieverlust

Je weniger Oberfläche das Gebäude bei vorgegebener Nutzfläche hat, umso leichter kann der Wärmeverlust durch Dämmung verringert werden und umso weniger Bausubstanz wird benötigt, sodass gleichzeitig auch die Kosten verringert werden. Physikalisch hätte ein kreisförmiger Grundriss mit mehrgeschossiger Ausführung die geringste Oberfläche, jedoch kann die Rundung schlecht genützt werden. In der Praxis ideal ist ein quadratischer Grundriss ohne Vor-/Rücksprünge. Die „SUN“-Architektur ist ein Kompromiss von Oberflächenminimierung und Gefälligkeit.

2.5 Bauphysikalisches Konzept

Eine Übersicht über Wandaufbauten, Dämmungen und der Zusammensetzung der Dächer kann Abbildung 4 entnommen werden. Für die Fenster wurde eine Dreifach-Verglasung der Fa. Internorm berücksichtigt. In Tabelle 1 und Tabelle 2 sind die bautechnischen Eckdaten des Gebäudes aufgelistet. Grundsätzlich wird zwischen zwei unterschiedlichen Gebäudetypen unterschieden. Einerseits wird eine Variante betrachtet, die den Anforderungen eines

Niedrigenergiehauses entspricht (siehe Tabelle 1) und andererseits eine zweite Variante, die dem Passivhaus-Standard erfüllt (siehe Tabelle 2).

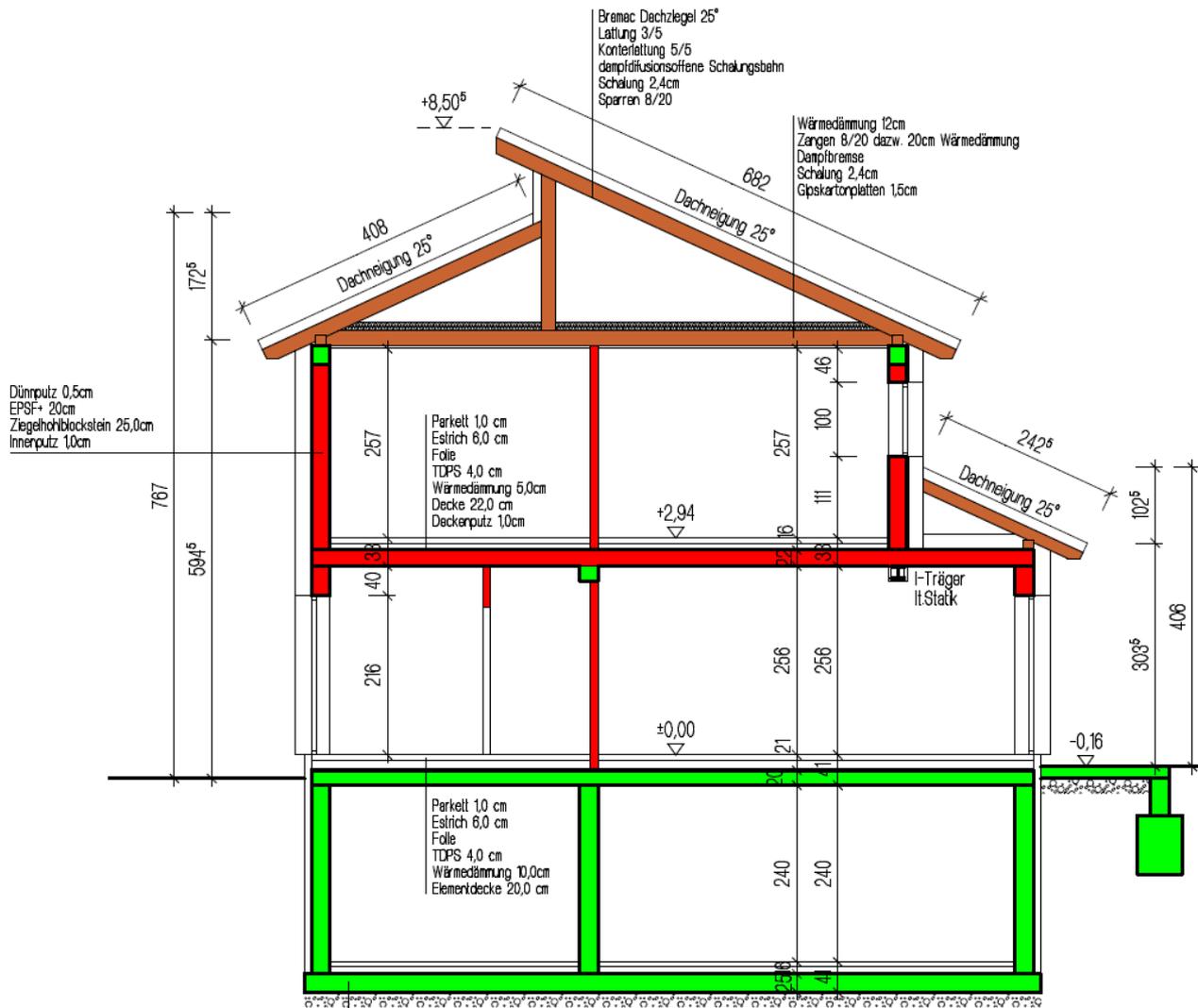


Abbildung 4: Schnitt und Bauteilbeschreibung (Basisvariante) des „SUN“-Gebäudes[1]

Tabelle 1: Bauphysikalische Eckdaten des „SUN“-Niedrigenergiehaus

Beheizte Nutzfläche (EG und OG)	140m ²
Beheizte Bruttogeschossfläche	192m ²
Bebaute Fläche	100m ² + 21m ² Terrasse
Dachfläche nach Süd, 25° Neigung	Süddach über OG: 80m ² Dach über Wohnzimmer: 14m ² über Terrasse: 21m ² Summe: 115m ²
Dämmstärken: Außenwand	25cm POROTHERM 25-38 M.i Plan (natureplus) + 20cm EPS F Plus
Kellerdecke	10cm EPS W20 unter Estrich + 4cm EPS Trittschalldämmplatte
Dachschräge	20cm Sparren-Dämmfilz (Mineralwolle) + 12cm

Decke zu Spitzboden Tram: Decke zu Spitzboden massiv	Klemmfilz Lattung 20cm Sparren-Dämmfilz (Mineralwolle) + 12cm 12cm EPS W 15 + 9cm Mineralwolle
U-Werte: Außenwand / obere Decke & Dachschräge / Kellerdecke	0,12 / 0,13 / 0,21 W/m ² /K Kellerwände mit 10cm XPS gedämmt
Lüftungsrelevantes Volumen	398m ³
Wärmerückgewinnung Lüftungsanlage (Energiewirkungsgrad)	78%
Dichtheit des Gebäudes	n50 = 1,5/h*
Heizlast lt. Gebäudesimulation	4.788 W (wenn interne Wärmegewinne = 2,1 W/m ²)
Jahreswärmebedarf lt. Gebäudesimulation	5.422 kWh/a (wenn interne Wärmegewinne = 2,1 W/m ²)
Energiekennzahl lt. Gebäudesimulation	28,3 kWh/m ² /a (wenn interne Wärmegewinne = 2,1 W/m ²)
Warmwasserbedarf für 4 Personen	180 l pro Tag bei 45°C, 88% Verteilwirkungsgrad 3.032 kWh/a

Tabelle 2: Dämmwerte und Wärmebedarf des „SUN“-Passivhauses

Wärmerückgewinnung Lüftungsanlage (Energiewirkungsgrad)	88%
Dichtheit des Gebäudes	n50 = 0,6/h
Dämmstärken:	
Außenwand	30cm POROTHERM 25-38 M.i Plan (natureplus) + 30cm EPS F Plus
Kellerdecke	15cm EPS W20-plus unter Estrich + 4cm EPS-plus Trittschalldämmplatte
Dachschräge	30cm Sparren-Dämmfilz (Mineralwolle) + 12cm Klemmfilz Lattung
Decke zu Spitzboden Tram: Decke zu Spitzboden massiv	30cm Sparren-Dämmfilz (Mineralwolle) + 12cm 20cm EPS W 15 + 9cm Mineralwolle
U-Werte: Außenwand / obere Decke & Dachschräge / Kellerdecke	0,09 / 0,10 / 0,14 W/m ² /K Kellerwände mit 10cm XPS gedämmt
Heizlast lt. Gebäudesimulation	2.777 W (wenn interne Wärmegewinne = 2,1 W/m ²)
Jahreswärmebedarf lt. Gebäudesimulation	3.057 kWh/a (wenn interne Wärmegewinne = 2,1 W/m ²)
Energiekennzahl lt. Gebäudesimulation	16 kWh/m ² /a (wenn interne Wärmegewinne = 2,1 W/m ²)

3 Energetisches Konzept

3.1 Grundlagen zur Simulationsrechnung

Zur Simulation wird ein vom Autor entwickeltes Gebäudesimulationsprogramm mit folgenden Features verwendet:

- Zeitauflösung in Stundenwerten
- Wärmebedarfs, Kühlbedarf und wirksame Speichermassen des Gebäudes in Anlehnung an ÖNORM 8110 ([2], [3])
- Verwendung eines Referenzwetterdatensatzes mit für den Standort charakteristischen Witterungsschwankungen mit Stundenwerten [7]
- Solthermieanlagen: Reine Brauchwasseranlage, teilsolare Heizungsunterstützung, Saisonspeichermodellierung (ohne Speicherschichtung). Validiert mit dem marktgängigen Programm T*SOL [8]
- Modellierung von Luftundichtigkeiten (Infiltration), Lüftungswärmeverluste mit/ohne automatische Lüftung und Wärmerückgewinnung. Optional kann die Wärmerückgewinnung mit/ohne sommerlichen Bypass simuliert werden.
- Wärmepumpen (Luft, Erdreich/Wasser) werden mit dynamischer Berechnung des COP (abhängig von Witterung, Quelltemperatur, Abgabetemperatur) simuliert
- Ertrag von PV-Anlagen

Als Standort wird Eisenstadt (Bgld.) gewählt. Für die Wetterdaten wurden Referenzdatensätze für den gewählten Standort verwendet.

3.2 Energiekonzept

Das grundlegende Energiekonzept umfasst sowohl für das „SUN“-Niedrigenergie-Haus als auch für das -Passivhaus eine Solarthermie-Anlage, die auf vollsolaren Betrieb ausgelegt ist (365 Tage Energieautarkie). Im Speziellen handelt es sich beim solarthermischen System um einen Hochtemperatur-Kollektor (Ökotech HT). Dieser ist doppelt verglast und hat somit einen deutlich geringeren U-Wert (2,58 gegenüber 3,6 W/m²/K). Damit kann der Saisonspeicher mit Temperaturen bis 100°C geladen werden. Die Frage ob ein HT-Kollektor oder ein herkömmlicher Flachkollektor verwendet werden soll, fällt sehr eindeutig aus: Bei einem vollsolaren Passivhaus reichen zur Beladung des 80 m³ großen Speichers 26 m² HT-Kollektor zur 100%igen Wärmeversorgung für Raumwärme und Warmwasser aus. Mit einem normalen Flachkollektor würden für das gleiche Ergebnis 45m² Kollektorfläche benötigt werden – also 73% mehr. Der Mehrpreis für den HT-Kollektor beträgt lediglich 25%. Aufgrund dieser eindeutigen Vorteile des HT-Kollektors wurden sämtliche Simulationen mit dem HT-Kollektor gerechnet. (Bemerkung: Ein Vakuumröhrenkollektor würde sich technisch noch besser für hohe Temperaturen eignen, jedoch ist die Haltbarkeit des Vakuums über ein Jahrzehnt hinaus aufgrund der Erfahrungen des Autors anzuzweifeln.) Der Neigungswinkel der Kollektoren beträgt - wenn nicht anders angeführt - 25°.

Als Speicher werden gewöhnliche sensible Wasser-Speicher vorgesehen. Die Dämmung dieses Speichers hängt in weiterer Folge davon, ob von einem Saison-Speicher oder einem Tages- bzw. Wochen-Speicher ausgegangen wird. Bei einem Saisonspeicher wird von einem mittleren U-Wert von 0,1 W/m²/K ausgegangen. Dies entspricht dem U-Wert einer in der Praxis gängigen Vakuumdämmung inkl. Zuschläge für Anschlüsse und Armaturen. Aufgrund der Größe eines Saisonspeichers ist eine gute Dämmung unerlässlich, um die Wärmeverluste gering zu halten. Für einen Mehrtagespeicher, wie sie für teilsolare Systeme verwendet werden, wird ein U-Wert von 0,4 W/m²/K gewählt. Dieser kann als typischer Praxiswert angesehen werden. Das Wärmeabgabesystem stellt, wenn nicht anders beschrieben, eine Fußbodenheizung dar. Die Größe des Saisonspeichers fällt umso kleiner aus, je höher die maximale Temperatur des Speichers und je besser dessen Dämmung ist. Daher wurden die maximale Beladungstemperatur auf 100°C und der mittlere U-Wert des Speichers auf 0,1 W/m²/K festgelegt. Dies kann mit einer speziellen temperaturbeständigen Vakuumdämmung (in 2 Lagen) oder mehr als 30cm dicker PU-Dämmung erreicht werden. (Achtung, bei höheren Temperaturen verschlechtert sich der Dämmwert jedes herkömmlichen Dämmstoffes) Bei einem höheren U-Wert werden die

Speicherverluste höher als die benötigte Nutzenergie und das erforderliche Speichervolumen und die notwendige Kollektorfläche würden stark ansteigen.

Die Warmwasserbereitung erfolgt über einen Plattenwärmetauscher, indem das Frischwasser mit dem Heizungswasser aus dem Pufferspeicher im Gegenstrom erwärmt wird („Frischwassersystem“). Aufgrund der langen Speicherzeiten (mehrere Monate) kann eine Temperaturschichtung im Speicher nicht zielführend ausgenutzt werden. In der Simulation wird der Speicher als gleichmäßig durchmischte gerechnet, um die Ergebnisse auf die „sichere Seite“ zu bringen. In Abbildung 5 ist hierzu die hydraulische Schaltung des Systems ersichtlich.

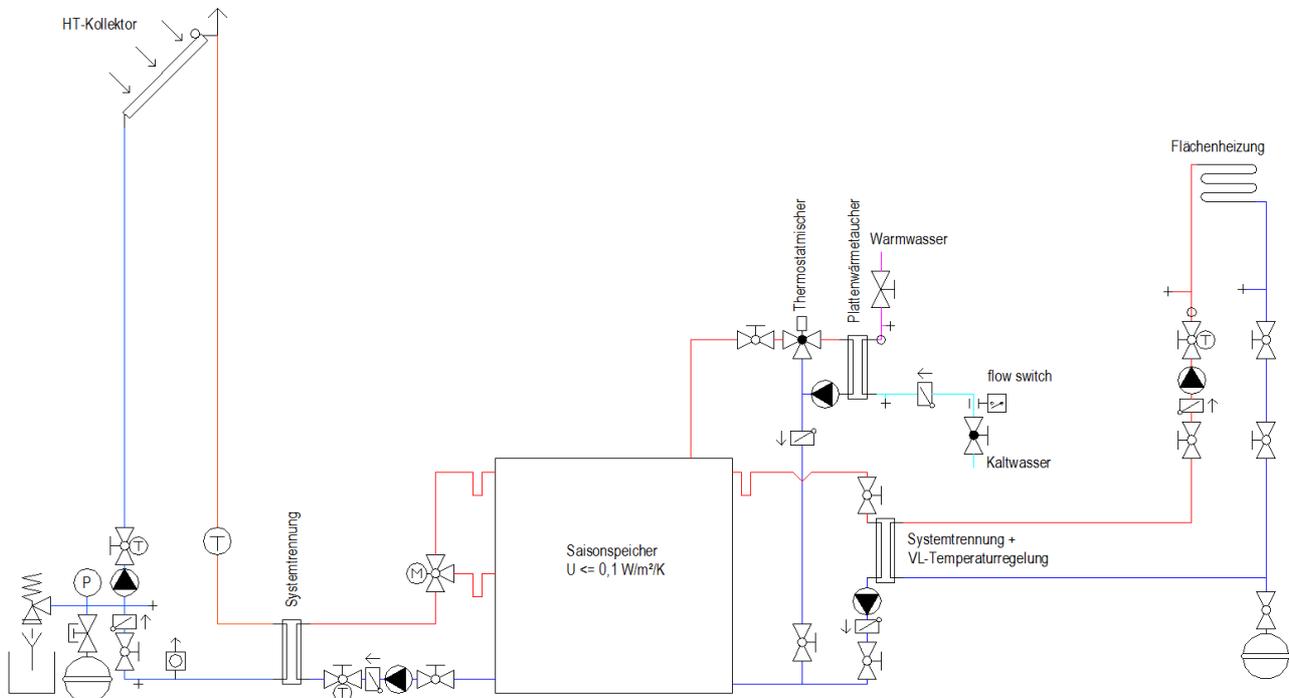


Abbildung 5: Hydraulische Schaltung Solarthermie-System mit Saisonspeicher

Im Zuge der Auslegung der vollsolaren Wärmeversorgung wurde ein um 1°C kälterer Jahresverlauf gegenüber dem Referenzjahr berücksichtigt, um auch bei „strengeren“ Wintern die Wärmeversorgung gewährleisten zu können. Dieser Fall wird folglich „Auslegungsfall“ genannt, im Unterschied zum Referenzjahr-bezogenen „Basisfall“. Die im Auslegungsfall berücksichtigte Solarthermie-Anlage (in Form von Kollektorfläche und Speichergröße) stellt damit trotz geringerer Jahrestemperaturen sicher, dass die im solaren Speicher vorherrschende Temperatur die 44°C -Marke nicht unterschreitet. Damit kann selbst bei einer für den Wärmetauscher vorhandenen Temperaturspreizung von 4°C noch immer ca. 40°C warmes Wasser sichergestellt werden, was für die Warmwasserbereitstellung essentiell ist. Aufgrund dieser zusätzlichen Absicherung kann für den Basisfall davon ausgegangen werden, dass die festgelegte Größe des solarthermischen Systems inklusive Speicher groß genug ausgelegt wurde, um selbst bei überdurchschnittlich kalten Wintern die Wärmeversorgung aufrecht zu erhalten. Diese Absicherung wurde für alle Berechnungen sowohl für die Niedrigenergie- als auch für die Passivhaus-Variante vorgenommen.

Darüber hinaus wird an dieser Stelle erwähnt, dass für die Berechnungen durchgehend von internen Wärmegewinnen in der Größenordnung von $2,1 \text{ W/m}^2$ ausgegangen wird (siehe auch Tabelle 1 und Tabelle 2). Dies entspricht dem Normwert für Passivhäuser, wird jedoch auch für das Niedrigenergiehauskonzept herangezogen, da der übliche Wert von $3,75 \text{ W/m}^2$ als nicht realistisch für ein auf Energieeffizienz ausgerichtetes Haus erachtet wird (effiziente Elektrogeräte haben weniger Abwärme)

3.3 Aspekte zur Optimierung des Energiekonzepts

Mit der Gebäudegeometrie werden die Weichen zur Minimierung des Wärmeverlustes des Gebäudes gestellt. Der Wärmebedarf hingegen kann durch die folgenden Parameter positiv beeinflusst werden:

- Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung
- Luftdichtheit
- Dämmstärke
- Speichermasse

In den nachfolgenden Analysen soll deshalb überprüft werden, welchen Einfluss die Veränderung dieser Parameter auf das „SUN“-Gebäudekonzept hinsichtlich des Wärme- als auch Kühlbedarfs haben kann. Hierzu wird nicht nur der vollsolare Basisfall herangezogen, sondern bei Bedarf auch Varianten mit teilsolaren Energiekonzepten. Anhand der Ergebnisse sollen Handlungsempfehlungen für den Bau zukünftiger Gebäude mit Solarthermie-Einbindung ausgegeben werden können. Dabei sollen auch die wirtschaftlichen Mehrkosten der Varianten gegenüber den Standards der Burgenländischen Wohnbauförderung aufgezeigt werden.

3.4 Ergebnisse für den Wärmebedarf

3.4.1 *Einfluss der Lüftung mit Wärmerückgewinnung in einem Nullwärmehaus mit Niedrigenergie-Standard*

Im Zuge dieses Kapitels soll vordergründig gezeigt werden, welche Unterschiede sich durch die Integration einer Lüftung hinsichtlich der resultierenden solarthermischen Kollektorgröße und des Speichers ergeben. Als betrachtetes Gebäude dient das „SUN“-Niedrigenergiehaus im Basisfall. Neben der Kollektorfläche und dem Speicherinhalt werden auch noch die Heizlast, der jährliche Wärme- und der Warmwasserwärmebedarf als Vergleichs-Indikatoren herangezogen (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Einfluss des Lüftungsgerätes mit Wärmerückgewinnung auf Kollektorfläche und Speichervolumen um eine vollsolare Wärmeversorgung zu gewährleisten

	Niedrigenergiehaus ohne Lüftung	Niedrigenergiehaus mit Lüftung
Kollektorfläche	41 m ²	35 m ²
Speichergröße	139,4 m ³	112 m ³
Heizlast	4.849 W	4.788 W
Jahreswärmebedarf	7.490 kWh/a	5.422 kWh/a
Warmwasserwärmebedarf	3.032 kWh/a	3.032 kWh/a

Wie zu erkennen ist, kann die Kollektorfläche um rund 15% und der Solarspeicher um rund 20% reduziert werden, wenn eine Lüftung mit Wärmerückgewinnung (Wirkungsgrad 78%) eingebaut wird. Während die Heizlast kaum gesenkt werden kann, wirkt sich die Maßnahme beim Jahreswärmebedarf mit minus 28% hingegen wieder deutlicher aus. Auf den Warmwasserwärmebedarf hat der Einbau der Lüftung keine Auswirkung.

In Abbildung 6 ist darüber hinaus der Jahresverlauf essentieller Parameter einer Solarthermie-Anlage sowie der Wärmebedarf für das „SUN“-Niedrigenergiehaus mit Lüftung abgebildet. Es kommt darin zum Ausdruck, dass der gesamte Solarertrag den Wärmebedarf zu jedem Zeitpunkt im Jahr abdeckt, was an der Überlappung der orangen und rot strichlierten Linie zu erkennen ist. Damit kann ein vollsolarer Betrieb nachgewiesen werden.

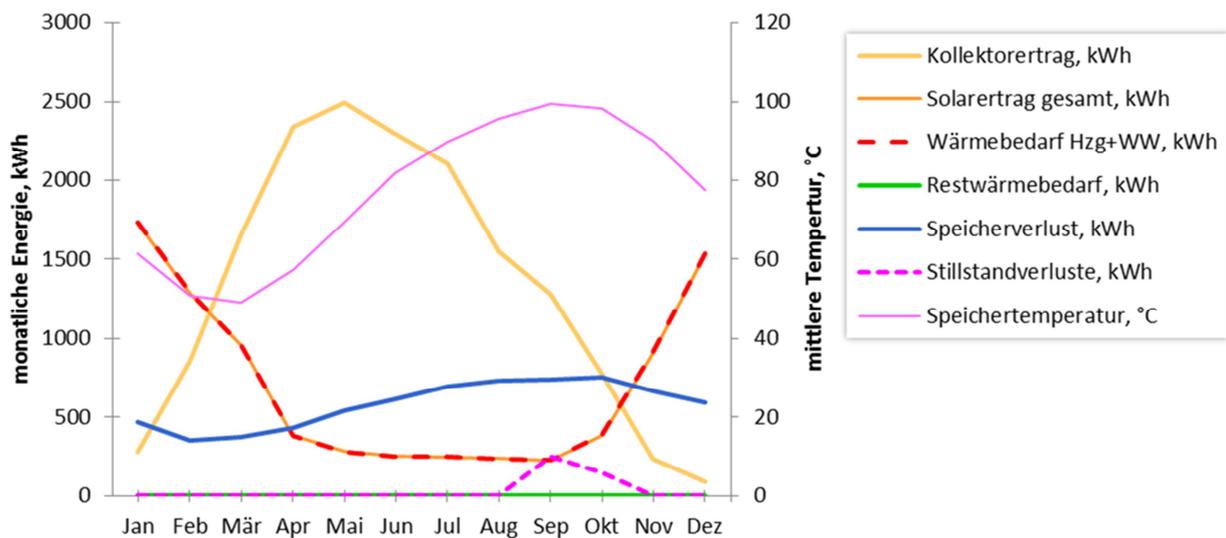


Abbildung 6: Jahresverlauf Solarthermie-Anlage in einem Nullwärmehaus mit Niedrigenergie-Standard und Lüftung

Ferner treten bei Solarthermie-Anlagen Speicherverluste auf, die in der Abbildung blau markiert sind. Diese resultieren infolge der Temperaturunterscheide zwischen Speicherinnentemperaturen und der Umgebungstemperatur. Durch eine entsprechend bessere Dämmung des Speichers können die Speicherverluste reduziert werden. Dennoch ist die berücksichtigte Dämmung bereits mit einem sehr guten U-Wert von $0,1 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ausgestattet, eine weitere Reduktion kann daher nur mit erheblichen Zusatzkosten realisiert werden.

Weiters sind in Abbildung 6 noch die Stillstandsverluste abgebildet. Diese treten auf, sobald der Speicher seine Maximaltemperatur von 100°C erreicht hat und keine zusätzliche Wärme eingespeichert werden kann. Diese zusätzlich theoretisch nutzbare Sonnenenergie wird als Stillstandsverlust angegeben. Wie zu erkennen ist, treten diese naturgemäß Ende des Sommers, Anfang des Herbstes auf, wenn die Speichertemperatur ihr Maximum erreicht (pinke Linie). Eine geringe Menge an Stillstandsverlusten in einem klimatisch durchschnittlichen Jahr ist ein Zeichen einer angemessenen Auslegung des Solarthermie-Systems. Einerseits soll der Speicher eine ausreichende Größe haben, um auch für einen kälteren Winter ausreichend Wärme speichern zu können und bei unterdurchschnittlicher Einstrahlung soll er auch noch vollgeladen werden können. Eine Vergrößerung des Speichers würde wegen der größeren Oberfläche auch die Verluste vergrößern.

In Abbildung 7 ist zudem der jährliche Verlauf des Wärmebedarfs (gesamt), des Raumwärmebedarfs, des Warmwasserwärmebedarfs und des Kühlbedarfs ersichtlich. Dabei ist ersichtlich, dass der Warmwasserbedarf über das Jahr naturgemäß sehr konstant ist, während der Raumwärmebedarf in den Winter- und Übergangsmonaten die größten Mengen an Energie benötigt.

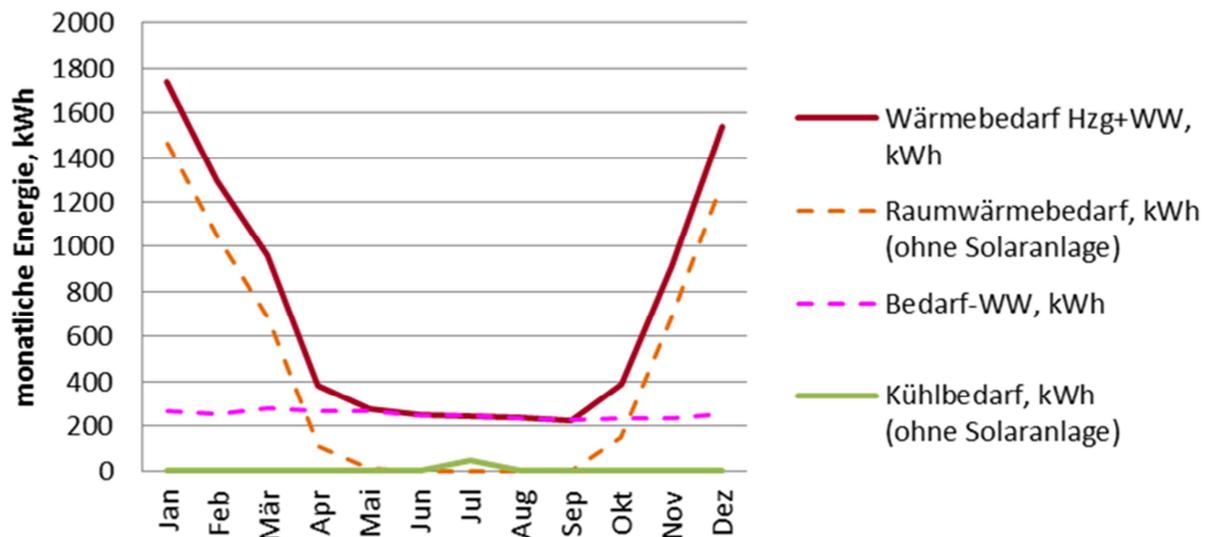


Abbildung 7: Energiebedarfsverläufe eines Nullwärmehauses mit Niedrigenergie-Standard und Lüftung

3.4.2 Einfluss der Dämmstandard und Luftdichtheit auf die Größe der Solaranlage des Nullwärmehauses

In diesem Kapitel werden die spezifischen Unterschiede zwischen dem „SUN“-Niedrigenergiehaus und dem „SUN“-Passivhaus im Basisfall jeweils mit Lüftung hervorgekehrt. Im Vergleich zur Niedrigenergievariante weist das Passivhaus einen um 60% niedrigeren n50-Wert, einen besseren Wirkungsgrad der Lüftung (88%) und eine bessere Dämmung auf. Darüber hinaus kann aufgrund der energiesparenden Bauweise auch die Heizungswassertemperatur² auf 28°C reduziert werden (zum Vergleich: Niedrigenergiehaus 35°C).

Als Indikatoren werden Kollektorfläche, Speichergröße, Heizlast, Jahreswärmebedarf, Jahreswarmwasserwärmebedarf und die Energiekennzahl verwendet (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Einfluss von Dämmstärke und Luftdichtheit auf die solare Kollektor- und Speichergröße um eine vollsolare Wärmeversorgung zu gewährleisten

	Niedrigenergiehaus mit Lüftung	Passivhaus
Kollektorfläche	35 m ²	26 m ²
Speichergröße	112 m ³	80 m ³
Heizlast	4.788 W	2.777 W
Jahreswärmebedarf	5.422 kWh/a	3.057 kWh/a
Warmwasserwärmebedarf	3.032 kWh/a	3.032 kWh/a
Energiekennzahl	28,3 kWh/m ² /a	16 kWh/m ² /a

Wie aus der Tabelle entnommen werden kann, kann durch eine bessere Dämmung und eine dichtere Bauweise die Kollektorfläche nochmals deutlich reduziert werden (ca. -25%). Ebenso kann der Speicher um rund 30 % kleiner ausgelegt werden. Wie bereits bekannt verringern sich durch die Passivhaus-Bauweise die Heizlast (-42%), der Jahreswärmebedarf sowie die Energiekennzahl (beide -44%) drastisch.

Weiters soll geklärt werden, welchen Einfluss allein die Verbesserung der Dichtheit auf die Größe der Solarthermie-Anlage sowie auf den Wärmebedarf hat. Hierzu wird das Niedrigenergiehaus als

² Die Heizungswassertemperatur wird auf die maximal zu erwartende Außentemperatur von -15°C ausgelegt.

Betrachtungsgebäude herangezogen und dessen n50-Wert von 1,5 /h auf 0,6 /h reduziert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 ersichtlich.

Tabelle 5: Einfluss von Luftdichtheit und besser gedämmten solaren Speicher auf solare Kollektor- und Speichergröße eines Nullwärmehaus mit Niedrigenergie-Standard

	Niedrigenergiehaus mit Lüftung (n50=1,5 /h)	Niedrigenergiehaus mit Lüftung und mit besserer Dichtheit (n50=0,6 /h)	Niedrigenergiehaus mit Lüftung und mit besser gedämmten Speicher
Kollektorfläche	35 m ²	32 m ²	26 m ²
Speichergröße	112 m ³	102,4 m ³	100 m ³
Heizlast	4.788 W	3.515 W	4.788 W
Jahreswärmebedarf	5.422 kWh/a	4.681 kWh/a	5.422 kWh/a
Warmwasserwärmebedarf	3.032 kWh/a	3.032 kWh/a	3.032 kWh/a
Energiekennzahl	28,3 kWh/m ² /a	24,4 kWh/m ² /a	28,3 kWh/m ² /a
Speicherverluste	6.972 kWh/a	6.551 kWh/a	3.227 kWh/a

Anhand der Ergebnisse ist erkennbar, dass die Reduktion des n50-Wertes sowohl auf die Größe der solarthermischen Anlage als auch auf Wärme- und Kältebedarf deutlichen Einfluss nimmt. Die solarthermische Anlage (Kollektor und Speicher) kann durch ein besser gedichtetes Haus um ca. 10% kleiner ausfallen. Noch drastischer kann die Heizlast (ca. -25%) sowie Energiekennzahl und Jahreswärmebedarf (beide ca. -14%) gesenkt werden. Der Warmwasserwärmebedarf bleibt abermals konstant.

Ein weiterer Ansatzpunkt könnte sein, die Dämmung des berücksichtigten Saisonspeichers weiter zu verbessern. Wie bereits in Kapitel 3.4.1 erwähnt, wird für den solaren Speicher von einem U-Wert von 0,1 W/m²/K ausgegangen. Es soll nun überprüft werden, welchen Einfluss die Herabsetzung des U-Wertes auf 0,05 W/m²/K (Verdoppelung der Dämmstärke – dies ist eine Kostenfrage!) hat. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 ersichtlich und beziehen sich auf das Niedrigenergiehaus. Wie zu sehen ist, bewirkt eine bessere Dämmung eine weitere Reduktion der Speichergröße und der Kollektorfläche im Vergleich zum Ausgangsfall. Bemerkenswert wäre zudem die Senkung der Speicherverluste um mehr als 50%.

Vor allem kann die Kollektorfläche nochmals um rund 25% gesenkt werden. Die Speichergröße nimmt immerhin in einer Größenordnung von ca. 10% ab. Dies rechtfertigt jedoch nicht den stark vergrößerten Aufwand bei der Dämmstärke.

3.4.3 Einfluss Bauteilaktivierung in einem Nullwärmehaus

3.4.3.1 Einfluss Bauteilaktivierung im vollsolaren Betrieb

Im Rahmen dieses Kapitels wird der Einfluss von Speichermassen auf die Integration von Solarthermie sowie auf den Wärmebedarf herausgearbeitet. Als ersten Schritt wird aufgezeigt welche Speichermasse im Niedrigenergiehaus laut Tabelle 1 und im Passivhaus laut Tabelle 2 vorhanden ist (siehe Tabelle 6). Darüber hinaus wird in Tabelle 6 angeführt welche zusätzliche Speichermasse durch zusätzlichen Beton mit Bauteilaktivierung zur Verfügung stehen kann. Für die Betonkernaktivierung werden folgende Bauteile mit 25cm Beton ausgeführt

- Geschoßdecke
- Decke zu Spitzboden (gesamt)
- Dachschräge

Durch die Annahme, dass Beton eine Dichte von 2.400 kg/m³ und eine spezifische Wärmekapazität von 1.116 J/kg/K aufweist, kann auf eine zusätzliche Speichermasse von 95.733 kJ/K geschlossen werden, wenn die genannten Bauteile um 25cm Beton erweitert werden. Wie in

Tabelle 6 zu erkennen ist, weicht die wirksame Speicherkapazität der beiden Gebäudetypen nur marginal voneinander ab.

Tabelle 6: Ausgestaltung der Betonkernaktivierung

	Speicherkapazität ohne Bauteilaktivierung [4]	Speicherkapazität mit Bauteilaktivierung	Differenz Speicherkapazität
Niedrigenergiehaus	65.905 kJ/K	161.687 kJ/K	95.733 kJ/K
Passivhaus	67.259 kJ/K	162.992 kJ/K	95.733 kJ/K

Durch den Einsatz der Betonkernaktivierung kann auch die minimale Heizungswassertemperatur selbst im Niedrigenergiehaus auf 28°C begrenzt werden, da die Wärmeabgabe nun über große Niedertemperatur-Flächen erfolgen kann.

Tabelle 7: Einfluss Bauteilaktivierung für ein vollsolarbetriebenes Nullwärmehaus mit Niedrigenergiehaus- und Passivhaus-Standard

	Niedrigenergiehaus mit Lüftung		Passivhaus	
	Ohne Bauteilaktivierung	Mit Bauteilaktivierung	Ohne Bauteilaktivierung	Mit Bauteilaktivierung
Kollektorfläche	35 m ²	35 m ²	26 m ²	26 m ²
Speichergröße	112 m ³	112 m ³	80 m ³	78 m ³
Heizlast	4.788 W	4.788 W	2.777 W	2.777 W
Jahreswärmebedarf	5.422 kWh/a	5.327 kWh/a	3.057 kWh/a	2.957 kWh/a
Warmwasserwärmebedarf	3.032 kWh/a	3.032 kWh/a	3.032 kWh/a	3.032 kWh/a
Energiekennzahl	28,3 kWh/m ² /a	27,8 kWh/m ² /a	16,0 kWh/m ² /a	15,4 kWh/m ² /a

Wie anhand Tabelle 7 zu erkennen ist, beeinflusst eine Betonkernaktivierung die Größe der Solarthermie-Anlage nur in äußerst geringem Ausmaß. Lediglich der solare Speicher kann im Falle des Passivhauses um ca. 2 m³ kleiner ausfallen, um eine 100%-ige Wärmebedarfsdeckung zu erzielen.

Die Kollektorfläche verändert sich in beiden Hausvarianten nicht. Demgemäß kann davon ausgegangen werden, dass das Ergebnis nicht nur für einen spezifischen Haustyp repräsentativ ist. Auch der jährliche Wärmebedarf, Heizlast und Energiekennzahl verändern sich nur unwesentlich.

3.4.3.2 Einfluss Bauteilaktivierung im teilsolaren Betrieb

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln ersichtlich wurde, dass ein vollsolarer Betrieb enorme Aufwände (v.a. große Speicher) erfordert, soll im Zuge dieses Kapitels auch der teilsolare Betrieb in Kombination mit Bauteilaktivierung untersucht werden. Das Charakteristikum des teilsolaren Betriebs ist es, dass nicht der gesamte Wärmebedarf durch Solarthermie abgedeckt werden kann. Demnach entsteht ein Restwärmebedarf, der durch eine weitere Energiequelle gedeckt werden muss (Wärmepumpe, Biomassekessel, fossile Energien, ...).

Der grundsätzliche Vorteil von teilsolaren Anlagen liegt in der kleineren Bauweise des Systems und der besseren Wirtschaftlichkeit. Für die Auslegung des Speichers kann überschlagsmäßig mit Werten von 70 bis 100 l/m² Kollektorfläche gerechnet werden. Für die Dämmung des Speichers wird ein U-Wert von 0,4 W/m²/K festgelegt. Dieser Wert kann als typisch für herkömmliche solare Speicher angesehen werden. Der spezifische Kollektorsertrag liegt üblicherweise in einem Bereich von ca. 200 kWh/m²/a. In den folgenden Varianten ist er in Größenordnungen von 160-170 kWh/m²/a zu finden.

Zum Vergleich werden in Tabelle 8 die Ergebnisse eines teilsolaren Systems in Kombination mit Betonkernaktivierung jenen Ergebnissen ohne Betonkernaktivierung gegenüber gestellt. Bei gleicher Solaranlage (Speichervolumen und Kollektorfläche bleiben konstant) wird der gesamte Deckungsgrad des Wärmebedarfs berechnet. Die relativen Verbesserungen der Betonkernaktivierung beziehen sich grundsätzlich nur auf das Niedrigenergiehaus, können aber wie bereits beschrieben, auch auf das Passivhaus übertragen werden.

Tabelle 8: Einfluss Bauteilaktivierung für ein teilsolarbetriebenes Gebäude mit Niedrigenergiehaus-Standard

	Niedrigenergiehaus mit Lüftung		
	Ohne Bauteilaktivierung (max. VL-Temp.=35°C)	Mit Bauteilaktivierung (max. VL-Temp.= 28°C)	Ohne Bauteilaktivierung , mehr Flächenheizung (max. VL-Temp.= 28°C)
Kollektorfläche	35 m ²	35 m ²	35 m ²
SpeichergroÙe	2,52 m ³	2,52 m ³	2,52 m ³
Gesamtdeckungsgrad Wärme	62 %	65%	63%

Wie zu erkennen ist, trägt eine Betonkernaktivierung im teilsolaren Betrieb zu Verbesserung des solaren Deckungsgrades um rund 3% bei.

Weiters ist in Abbildung 8 der Jahresverlauf der teilsolaren Anlage ersichtlich. Naturgemäß unterscheidet er sich drastisch von vollsolaren Anlagen. Speziell die Stillstandsverluste sind im teilsolaren Betrieb sehr groß. Dies ist auf den im Vergleich zur vollsolaren Lösung kleineren Speicher zurück zu führen, der außerhalb der Heizperiode meist voll beladen ist. Aufgrund der kleineren Ausführung kann die Wärme nicht über Wochen für einen Heizbetrieb und Brauchwasser aufrechterhalten werden. Deshalb ist im teilsolaren Betrieb v.a. in den Wintermonaten eine zusätzliche Heizquelle erforderlich, um den in der Abbildung grün gekennzeichneten Restwärmebedarf abzudecken.

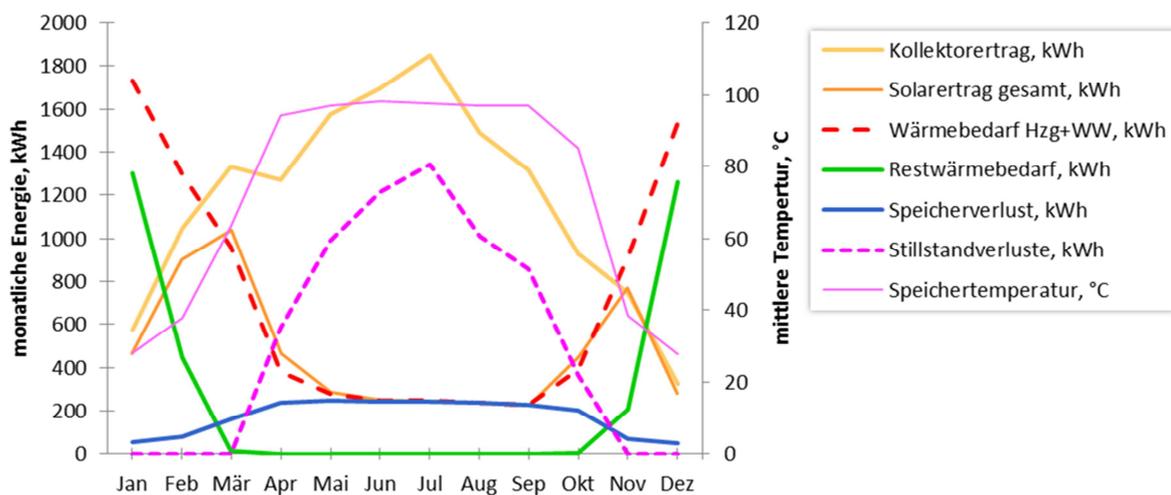


Abbildung 8: Jahresverläufe von Energien für eine teilsolare Heizung im Niedrigenergie mit Lüftung (ohne Bauteilaktivierung).

Um eine Alternative zur Betonkernaktivierung zu beleuchten, wird eine weitere Variante berücksichtigt, welche davon ausgeht, dass das gesamte Heizungssystem als Flächenheizung (Wandheizung) vorliegt. In diesem Fall kann der Wert für die Heizungswassertemperatur selbst im Niedrigenergiehaus auf 28°C reduziert werden. Als Resultat folgt eine bessere Ausnutzung der Solarthermie-Anlage. Wie in Tabelle 8 zu sehen ist, kann der Gesamtdeckungsgrad dadurch um ca. 1% verbessert werden.

3.4.4 Einfluss der Neigung der Solarkollektoren

In diesem Kapitel soll der Frage nachgegangen werden, ob mit Hilfe des Neigungswinkels der Solarthermie-Anlage die Größe des Kollektors und des Speichers verkleinert bzw. der Deckungsgrad im teilsolaren Betrieb vergrößert werden kann. Hierzu wird der Neigungswinkel von 25° auf 50°, 60°, 75° und 90° verändert und die Effekte analysiert. Als Betrachtungsgebäude wird das **Passivhaus ohne Bauteilaktivierung** sowohl im vollsolaren als auch im teilsolaren Betrieb herangezogen.

Im vollsolaren Betrieb ist es wichtig ein Optimum des Neigungswinkels zu finden, welches das kleinste Gesamtsystem (Kollektor und Speicher) nach sich zieht. Wie in Abbildung 9 zu erkennen ist, liegt dieses Optimum für den Standort Eisenstadt im Bereich von 50°-60°. Unter 50° Neigung muss der Saisonspeicher vergrößert werden. Über 60° Neigung beginnt der Speichergröße ebenfalls wieder anzusteigen, jedoch nimmt auch die Kollektorgröße zu.

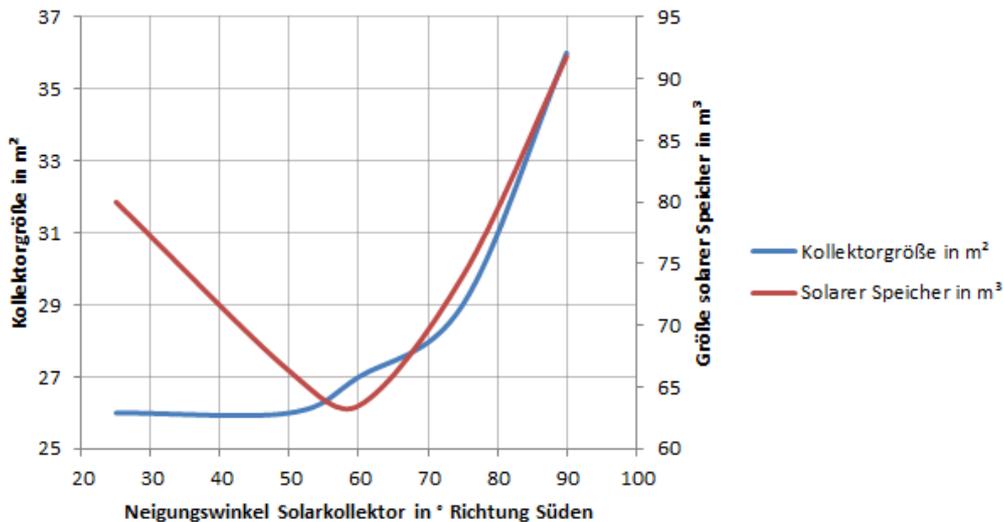


Abbildung 9: Einfluss des Neigungswinkels einer Solarthermie-Anlage auf die Größe des Solarkollektors und des solaren Speichers im vollsolaren Betrieb (Passivhaus)

Reduktion der Speichergröße durch Anheben der Kollektorneigung:

Lässt man eine Anhebung der Kollektorneigung auf 50° (Dachneigung ist 25°) zu, kann bei gleicher Kollektorgröße 26m³ das Speichervolumen von 80m³ (siehe Tabelle 7) auf 66m³ reduziert werden.

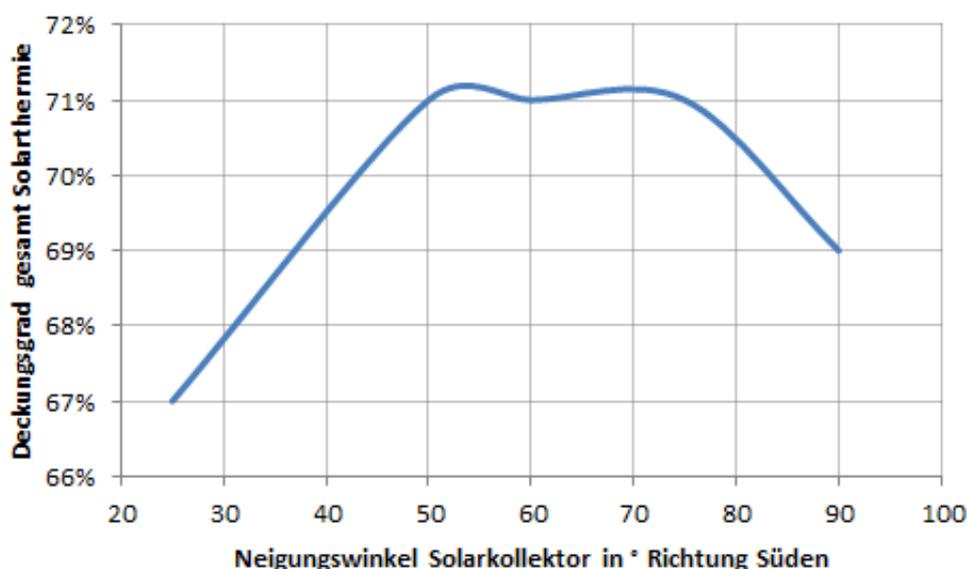


Abbildung 10: Einfluss des Neigungswinkels einer Solarthermie-Anlage auf den Gesamt-Deckungsgrad im teilsolaren Betrieb (Bemerkung: Der Höcker zwischen 50° und 60° wird durch die Interpolation verursacht und hat keine technische Relevanz)

Im teilsolaren Betrieb steht häufig der gesamte Deckungsgrad über ein Jahr im Vordergrund der Betrachtung. Aus diesem Grund ist in Abbildung 10 die Abhängigkeit dieses Deckungsgrades zum Neigungswinkel dargestellt. Es kann ein Optimum zwischen 50° und 70° gefunden werden, wobei es bereits bei Neigungswinkeln ab 30° zu guten Deckungsgraden kommt.

3.5 Ergebnisse für den Kältebedarf

In diesem Kapitel soll explizit auf die Auswirkungen diverser Maßnahmen auf den Kältebedarf eingegangen werden. Dabei soll auch der Klimawandelproblematik (Stichwort steigende Temperaturen) Rechnung getragen werden. Aus diesem Grund werden für alle Varianten auch die Ergebnisse aufgelistet, die von einer Steigerung der Temperaturen um 2°C bezogen auf die 3 Jahrzehnte zurückreichenden Referenzwerte ausgehen. Diese Steigerungen konnten in den vergangenen Jahren tatsächlich verzeichnet werden. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass diese Temperaturen für die Abbildung bereit jetzt häufig und in der Zukunft stets real sind.

3.5.1 *Einfluss der Lüftung mit Wärmerückgewinnung in einem Nullwärmehaus (Niedrigenergie-Standard)*

Wie auch schon beim Wärmebedarf, reduziert eine Lüftungsanlage auch den Kältebedarf. Im Falle der Kühllast beträgt die Einsparung ca. 7%. Die Reduktion des Jahreskühlbedarfs fällt mit minus 14% für das Referenz-Wetter sogar noch deutlicher aus. Die maximal auftretende Temperatur kann jedoch auch mit der Lüftung nicht wirksam bekämpft werden und liegt in beiden Fällen knapp über 27°C.

Drastisch wirkt sich, wie in Tabelle 9 zu sehen ist, eine Erhöhung des Referenz-Wetterdatensatzes aus, v.a. auf den Jahreskühlbedarf. Dieser nimmt um bis zu 400% zu und steigt im Falle des Gebäudes ohne Lüftung auf bis zu 272 kWh/a an. Die maximal auftretenden Temperaturen können bei ca. 29°C unabhängig von der Lüftung angenommen werden. Die Kühllast steigt hingegen nicht so drastisch an.

Tabelle 9: Einfluss von Lüftungen mit Wärmerückgewinnung auf Kältebedarfskennzahlen eines Nullwärmehauses mit Niedrigenergie-Standard bei unterschiedlichen Wetterentwicklungen

	Referenz-Wetterdatensatz		Referenz- Wetterdatensatz +2°C	
	NEH ohne Lüftung	NEH mit Lüftung	NEH ohne Lüftung	NEH mit Lüftung
Kühllast	3.214 W	2.989 W	3.526 W	3.247 W
Jahreskühlbedarf	58 kWh/a	50 kWh/a	272 kWh/a	252 kWh/a
Maximale Raumtemperatur ohne Kühlgerät	27,5 °C	27,2 °C	29,1 °C	29,0 °C
NEH... Niedrigenergiehaus				

3.5.2 *Einfluss der Dämmstärke und Luftdichtheit in einem Nullwärmehaus*

Wie bereits in Kapitel 3.4.2 werden auch hier die Unterschiede zwischen Passivhaus und Niedrigenergiehaus deutlich gemacht, jedoch in diesem Fall hinsichtlich des Kältebedarfs. Wie zu erkennen ist, steigt der Kühlbedarf naturgemäß im dichteren, besser gedämmten Haus an (+64%), jedoch hält er sich in absoluten Zahlen noch immer in einer sehr kleinen Größenordnung auf. Ferner wird auch die maximal zu erwartende Temperatur aufgelistet, die auftritt, wenn keine Klimaanlage installiert werden würde. Der Unterschied ist zwischen den Häusertypen jedoch sehr klein und beträgt maximal 27,8°C.

Sollten die Jahrestemperaturen weiter ansteigen, so nimmt der Kältebedarf beim Niedrigenergiehaus um ca. 400% und beim Passivhaus um ca. 335% zu. Im Falle des Passivhauses ist dabei mit Maximal-Temperaturen von knapp unter 30°C zu rechnen, wenn keine Kühlgeräte installiert werden (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10: Einfluss von Bauweise des SUN-Hauses auf Kühllast und Kühlenergiebedarf bei einem Referenzklima und bei einem um 2°C wärmerem Klima.

	Referenz- Wetterdatensatz		Referenz- Wetterdatensatz +2°C	
	NEH mit Lüftung	Passivhaus	NEH mit Lüftung	Passivhaus
Kühllast	2.989 W	2.888 W	3.247 W	3.078 W
Jahreskühlbedarf	50 kWh/a	82 kWh/a	252 kWh/a	356 kWh/a
Maximale Raumtemperatur ohne Kühlgerät	27,2 °C	27,6°C	29,0 °C	29,6 °C
NEH... Niedrigenergiehaus				

3.5.3 Einfluss Bauteilaktivierung in einem Nullwärmehaus (vollsolar)

In diesem Kapitel soll abermals der Einfluss der Bauteilaktivierung überprüft werden. Als Indikatoren gelten jedoch diesmal die Kühllast, der Jahreskühlbedarf sowie die maximal zu erwartende Raumtemperatur ohne Kühlgerät. Wie anhand Tabelle 11 zu erkennen ist, wird auch hier den zukünftigen Klimaveränderungen Rechnung getragen. Ebenso wird sowohl das Niedrigenergiehaus als auch das Passivhaus betrachtet.

Aus Tabelle 11 geht deutlich hervor, dass die Bauteilaktivierung einen signifikanten Einfluss auf den Kältebedarf aufweist. In allen Varianten kann dieser deutlich reduziert werden.

Beim Niedrigenergiehaus unter Referenzbedingungen kann die Kühllast um ca. 40% und der Jahreskühlbedarf um 88% gesenkt werden. Ein wenig anders sieht die Situation unter einer Steigerung der Temperatur aus. Hier bleibt die Kühllast trotz der Bauteilaktivierung unverändert. Ebenso kann auch der Jahreskühlbedarf nur mehr um ca. 37% gesenkt werden. Dennoch wirkt sich eine Bauteilaktivierung auch hier erheblich aus.

Tabelle 11: Einfluss der Bauteilaktivierung im SUN-Hauses auf Kühllast und Kühlenergiebedarf bei einem Referenzklima und bei einem um 2°C wärmerem Klima.

	Referenz- Wetterdatensatz				
	NEH mit Lüftung		Passivhaus		
	Ohne Bauteilaktivierung	Mit Bauteilaktivierung	Ohne Bauteilaktivierung	Mit Bauteilaktivierung	
Kühllast	2.989 W	1.747 W	2.888 W	2.534 W	
Jahreskühlbedarf	50 kWh/a	6 kWh/a	82 kWh/a	29 kWh/a	
Maximale Raumtemperatur ohne Kühlgerät	27,2 °C	26,1 °C	27,6°C	26,5 °C	
	Referenz- Wetterdatensatz +2°C				
	Kühllast	3.247 W	3.247 W	3.078 W	3.078 W
	Jahreskühlbedarf	252 kWh/a	158 kWh/a	356 kWh/a	237 kWh/a
	Maximale Raumtemperatur ohne Kühlgerät	29,0 °C	27,8 °C	29,6 °C	28,4 °C
NEH... Niedrigenergiehaus					

Ein ähnliches Bild ergibt sich auch beim Passivhaus. Auch hier kann die Kühllast unter Referenz-Wetterdatensätze reduziert werden, der Jahreskühlbedarf sogar um ca. 65% auf 29 kWh. Bei

Temperaturzunahmen kann der Jahreskühlbedarf um immerhin rund 35% auf 237 kWh abgemildert werden. Die Kühllast bleibt abermals unverändert.

Die maximal auftretende Temperatur kann in allen Varianten durch die Bauteilaktivierung um ca. 1,1° bis 1,2°C reduziert werden. Die Maximal-Werte liegen dadurch bei 27,8°C im Niedrigenergiehaus und 28,4°C im Passivhaus.

In Abbildung 11 sind darüber hinaus monatlichen Werte für den Kühlenergiebedarf der Passivhausvarianten ersichtlich. Wie bereits erläutert worden ist, macht die Betonkernaktivierung einen signifikanten Unterschied aus. Ebenso macht die Abweichung von den Referenz-Wetterdatensätzen einen erheblichen Einfluss aus (Vgl. blaue Linie mit grüner Linie). Im Falle der Reduktion des Kühlbedarfs erweist sich die Betonkernaktivierung unter Außerbetrachtung ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte als effektiv.

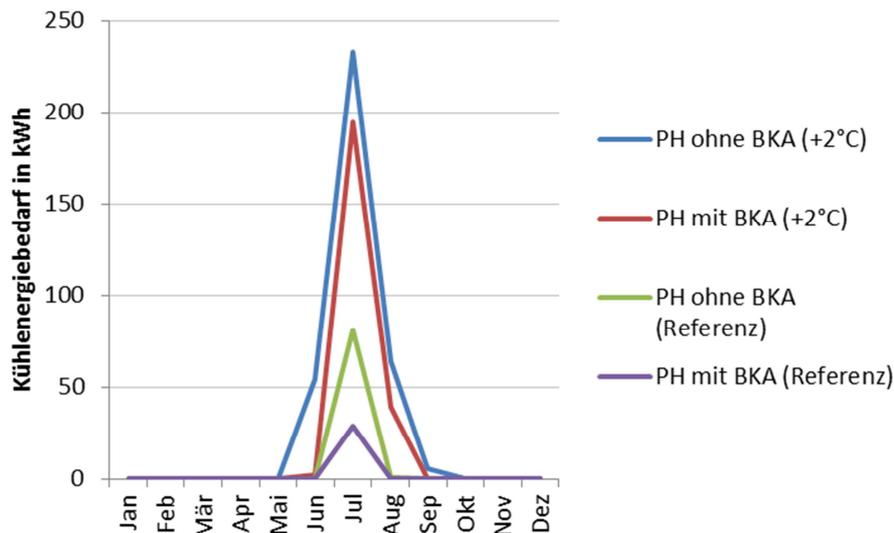


Abbildung 11: Monatlicher Kühlenergiebedarf des „SUN“-Passivhauses mit und ohne Bauteilaktivierung unter verschiedenen Wetterdatensätzen

3.5.4 Vergleich Leichtbau bzw. Beurteilung des SUN-Obergeschoßes

Im Zuge dieses Kapitels soll dem Effekt Rechnung getragen werden, dass die bisherige Simulation mit einem einzigen Innenraum für die Praxis den Nachteil aufweist, dass im Sommer die aufsteigende Luft im Gebäude nicht korrekt berücksichtigt wird. Hintergrund ist jener, dass sich die durch geöffnete Türen bzw. Fenstern eindringende warme Außenluft in den oberen Bereichen eines Hauses sammelt und zuerst nur die oberen Räume erwärmt.

Erfahrungsgemäß ist es daher im Obergeschoß deutlich wärmer, insbesondere, wenn dieses in einer Leichtbaukonstruktion vorliegt. Da auch die Ausgangsvariante im Obergeschoß als Leichtbau bezeichnet werden kann, wird folglich die Simulation auf diesen Aufbau umgestaltet. Dazu wird die wirksame Speichermasse des Passivhauses um ca. 35% gegenüber der Ausgangsvariante auf einen Wert von 12.205 Wh/K reduziert. Der genannte Wert entstammt dem Energieausweis des eines realen SUN-Hauses mit Holzriegel- und Estrich-Elementen [5]. Damit kann ein „leichterer“ Aufbau mit Gipskartonplatten sowie dahinter liegender Wärmedämmung und Beton-Estrich nachgebildet werden.

Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 12 dargestellt. Als Indikatoren werden Kältelast, Jahreskühlbedarf und die maximale Raumtemperatur ohne Kühlgerät herangezogen.

Tabelle 12: Kühllast und Kühlenergiebedarf der Leichtbau-Version bei einem Referenzklima und bei einem um 2°C wärmerem Klima. Diese Ergebnis spiegelt auch das Obergeschoß des Standard SUN-Gebäudes wieder.

	Referenz- Wetterdatensatz		Referenz- Wetterdatensatz +2°C	
	Passivhaus (Ausgangsvariante)	Passivhaus (Leichtbau)	Passivhaus (Ausgangsvariante)	Passivhaus (Leichtbau)
Kühllast	2.888 W	2.888 W	3.078 W	3.078 W
Jahreskühlbedarf	82 kWh/a	127 kWh/a	356 kWh/a	431 kWh/a
Maximale Raumtemperatur ohne Kühlgerät	27,6°C	28,7°C	29,6 °C	30,5 °C
NEH... Niedrigenergiehaus				

Wie anhand Tabelle 12 zu erkennen ist, wird auch hier zukünftigen Klimaveränderungen durch die Berücksichtigung eines 2°C höheren Wetterdatensatzes Rechnung getragen. Ferner ist ersichtlich, dass die Kühllast trotz geringerer Speichermasse nicht zunimmt. Der Jahreskühlbedarf sowie die maximal auftretende Raumtemperatur ändern sich jedoch signifikant. Unter der Annahme des Referenzwetterjahres nimmt ersterer um ca. 55% zu, die maximale Raumtemperatur steigt um 1,1°C auf 28,7°C an. Sollte die Erwärmung auch in den nächsten Jahren bei 2°C über dem langjährigen Mittel liegen, so steigt auch in diesem Szenario der jährliche Kühlbedarf um ca. 20% an. Ebenso erreicht die Raumtemperatur Werte von 30,5°C.

Wie der Analyse zu entnehmen ist, muss also in Obergeschoßen eines Passivhauses mit Temperaturen von ca. 30°C im Sommer gerechnet werden, wenn eine Leichtbauweise vorliegt. Um diesem Effekt entgegen zu wirken, empfiehlt es sich etwaige Speichermassen im Obergeschoß anzubringen (z.B. Integration Gipsplatten mit PCM oder ein „Sargdeckel“ aus).

3.5.5 Einfluss Querlüftung

Ergänzend wird in diesem Kapitel der Einfluss der sogenannten Querlüftung aufgezeigt. Bisher wurde in allen Varianten davon ausgegangen, dass eine zusätzliche manuelle Lüftung³ (Luftwechsel: 1 /h) erfolgt, wenn die Raumtemperatur des Hauses größer ist, als 24°C und die Außentemperatur nicht höher ist, um die Wärme aus dem Haus abzulüften. Dieser manuelle Luftwechsel erfordert ein sensibilisiertes Nutzerverhalten, das jedoch nicht immer vorausgesetzt werden kann. Aus diesem Grund soll gezeigt werden, welchen Einfluss das Nutzerverhalten auf den Kühlbedarf und die maximal auftretenden Temperaturen im Sommer haben kann. Umgekehrt kann ein nachlässig offengelassenes Fenster Wärmebedarf und Raumtemperaturen bei heißer Witterung drastisch erhöhen – besonders gefährdet ist ein Gebäude mit einem Obergeschoß in Leichtbauweise (Dachschräge, Decken). Hierzu wird als Betrachtungsgebäude das **Passivhaus ohne Betonkernaktivierung** herangezogen. Für die Werte der Querlüftungen werden folgende Raten eingesetzt: 0,4 /h (mäßiges Nutzerverhalten), 1 /h (gutes Nutzerverhalten), 1,5 /h (sehr gutes Nutzerverhalten) und 2 /h (ausgezeichnetes Nutzerverhalten).

³ Querlüftung: 1 pro Stunde, d.h. einmal in der Stunde wird der das komplette Luftvolumen des Hauses durch die manuelle Lüftung ausgetauscht

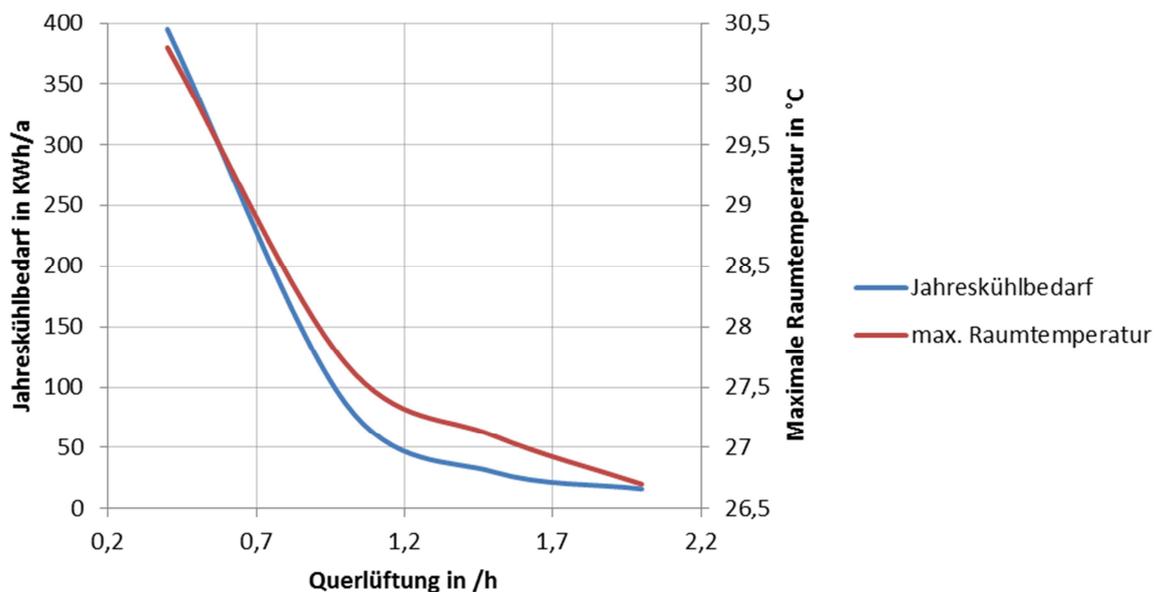


Abbildung 12: Jahreskühlbedarf und maximale Raumtemperaturen in Abhängigkeit der Intensität der Querlüftung

Wie aus Abbildung 12 hervor geht, ist der Einfluss der Querlüftung durchaus beträchtlich. Ausgehend von der bisher verwendeten Lüftungsrate von 1 /h bewirkt eine Verschlechterung dieser Rate um 60% (0,4 /h) eine Erhöhung des Kältebedarfs um ca. 350% auf 395 kWh/a. Auch die Temperatur würde auf über 30°C ansteigen. Im Gegenzug kann der Kühlbedarf durch eine Verdoppelung der manuellen Lüftung um über 80% gesenkt werden. Es blieben dann nur ca. 16 kWh pro Jahr an Kühlenergie übrig. Auch die Temperatur könnte damit auf unter 27°C gehalten werden. Für die obigen Überlegungen wird angemerkt, dass in allen Fällen an heißen Tagen nur dann über Fenster gelüftet wird, wenn es draußen kühler als innen ist. Ein verkehrtes Lüftungsverhalten – Lüften wenn es draußen wärmer als innen ist, wird hier nicht berücksichtigt, tritt aber in der Praxis dennoch auf, und bewirkt eine Überwärmung des Hauses bzw. zu einem gravierend ansteigenden Stromverbrauch, falls eine Klimaanlage installiert ist.

3.5.6 Einfluss Sonnenschutz (Jalousien)

Ähnlich wie auch im vorhergehenden Kapitel wurden auch für den Sonnenschutz diverse Annahmen getroffen, um die Aufheizung des Gebäudes im Sommer zu verhindern. Für alle bisherigen Varianten wurde mit einem Sonnenschutzreduktionsfaktor von 0,3 für die Himmelsrichtungen Ost, West und Süd gerechnet. Dies bedeutet, dass nur 30% der durch Fenster theoretisch einfallenden Strahlung tatsächlich ins Haus gelangt. Für die Nordseite des Gebäudes wurde der Faktor auf 1 gesetzt, da von dieser Seite mit wenig Sonneneinstrahlung gerechnet werden kann und daher ein Sonnenschutz in diesem Bereich eingespart werden kann.

Um den Einfluss dieses Parameters hervor zu streichen, wurden folglich diese Sonnenschutzreduktionsfaktoren auf die Werte 0,6 und 1 verändert, um deren Wirkung auf den Kühlbedarf und die maximalen Raumtemperaturen zu eruieren. Als Betrachtungsgebäude diente das **Passivhaus ohne Bauteilaktivierung**. Das Ergebnis ist in Abbildung 13 dargestellt.

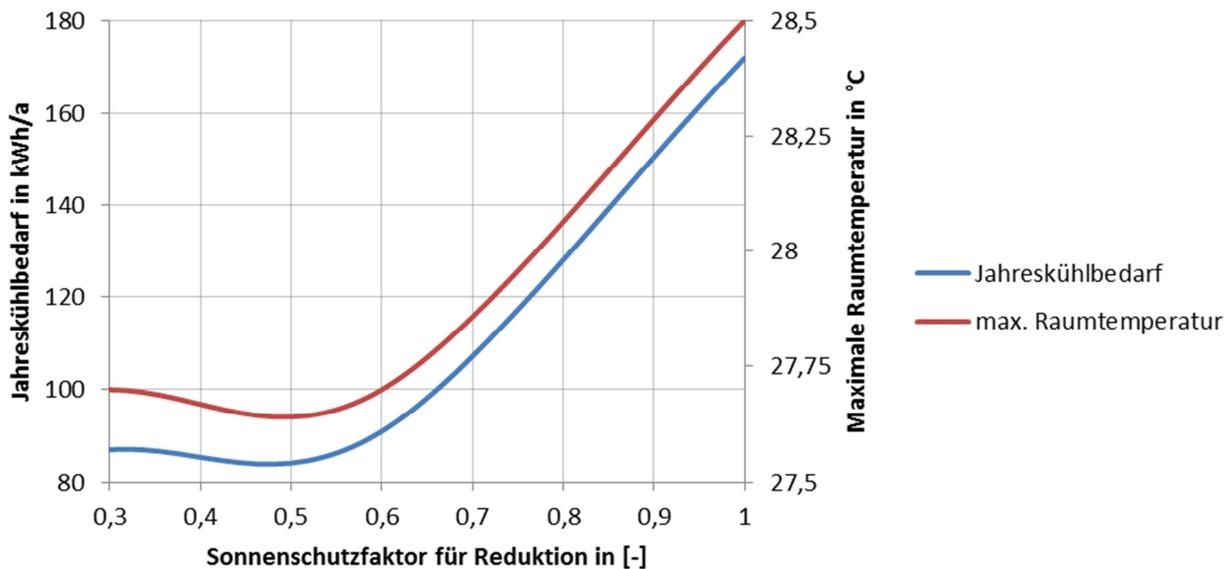


Abbildung 13: Jahreskühlbedarf und maximale Raumtemperaturen in Abhängigkeit des Sonnenschutzes

Wie zu erkennen ist, nimmt der Kühlbedarf ab Werten von 0,6 und darüber drastisch zu, während die maximal zu erwartenden Temperaturen relativ konstant bleiben. Dies bedeutet, dass, wenn keine Sonnenschutzregelung vorhanden ist, also die Sonnenstrahlen ungehindert in das Gebäude einfallen können, der jährliche Kühlbedarf im Vergleich zum Ausgangsszenario um nahezu das Doppelte ansteigt.

4 Mehrkosten und ökologische Amortisation

Im Zuge dieses Kapitels soll nun anhand ausgewählter Varianten die Mehrkosten sowie die ökologische Amortisation diverser Baumaßnahmen dargestellt werden.

Alle Kosten werden inkl. MwSt. angegeben, weil diese von Endkunden bezahlt werden muss.

Als Vergleichsvariante dient dabei folgende Ausführung, die im weiteren Verlauf „Referenz-Variante“ genannt wird:

- „SUN“ Niedrigenergiehaus ohne Lüftung mit Heizungssystem Luft-Wärmepumpe⁴

Dieser Variante werden folgende Bau-Ausführungen gegenüber gestellt:

- Vollsolares „SUN“ Nullwärmehaus mit Niedrigenergiehaus-Standard ohne Lüftung
- Vollsolares „SUN“ Nullwärmehaus mit Passivhaus-Standard
- Vollsolares „SUN“ Nullwärmehaus mit Passivhaus-Standard und Bauteilaktivierung

Für die Berechnung der ökonomischen und ökologischen Amortisation wird allgemein nach Gleichung 1 und 2 vorgegangen.

$$Amortisationszeit_{ökonomisch} = \frac{\sum \text{Mehrkosten}}{\text{jährliche Einsparung}} \quad (\text{Gl.1})$$

$$Amortisationszeit_{ökologisch} = \frac{\sum \text{zusätzliche Herstellungsenergie}}{\text{jährliche energetische Einsparung}} \quad (\text{Gl.2})$$

4.1 „SUN“ Niedrigenergiehaus ohne Lüftung mit Heizungssystem Luft-Wärmepumpe

Das „SUN“ Niedrigenergiehaus ohne Lüftung, versorgt durch das Heizungssystem Luft-Wärmepumpe, entspricht einem nahezu exakt nach den Standards der bgl. Wohnbauförderung errichteten Gebäudes. Die architektonische Ausgestaltung sowie das bauphysikalische Konzept entsprechen jenen des in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellten Gebäudes. Der einzige Unterschied zu den bisher berücksichtigten Varianten besteht im Fehlen einer Lüftung mit Wärmerückgewinnungssystem sowie der Versorgung mit einer Luft-Wärmepumpe anstatt einer Solarthermie-Anlage.

Die Gesamtkosten sowie die expliziten Kosten für die Luft-Wärmepumpe sind in Tabelle 13 ersichtlich.

Tabelle 13: Gesamtkosten und Kosten für eine Luft-Wärmepumpe für ein Niedrigenergiehaus nach bgl. Wohnbau-Standard

Gesamtinvestitionskosten NEH ohne Lüftung mit Luft-Wärmepumpe ¹	260.000 €
Davon Investitionskosten Luft-Wärmepumpe ²	16.000 €
Jährlicher Strombedarf für Heizen und Kühlen	2.787 kWh
Angenommener spezifischer Strompreis ³	21 Cent/kWh
Jährliche Stromkosten für Heizen und Kühlen	585 €
¹ Quelle: Ing. Andreas Waha GmbH	
² Quelle: Ing. Andreas Waha GmbH und eigene Annahme	
³ Quelle: eigene Annahme	

⁴ Entspricht aktuellem Standard der bgl. Wohnbauförderung 2014

Für eine ökologische Bilanzierung kann der Primärenergieinhalt (PEI)⁵ als Indikator herangezogen werden. Da für eine ökologische Vergleichsrechnung lediglich die Unterschiede der einzelnen Varianten im Vordergrund stehen, ist in Tabelle 14 nur der Primärenergieinhalt der Luft-Wärmepumpe ersichtlich. Das Gebäude an sich bleibt bei allen Varianten zumindest auf Niedrigenergiehaus-Standard, es ist daher in weiterer Folge nur interessant die ökologischen und ökonomischen Mehr-Aufwände zu berücksichtigen.

Als Grundlage für den Wert des Primärenergiebedarfs wurde eine Studie der bayrischen Forschungsstelle für Energiewirtschaft⁶ herangezogen. Aus dieser geht hervor, dass für die Herstellung einer Sole-Wasser-Wärmepumpe 10.750 kWh (38,7 GJ) Primärenergie bereitgestellt werden muss. Davon macht die Bereitstellung der Wärmequellenanlage (Erdwärmesonden, Zuleitung zur Wärmepumpe, Solepumpe) allein fast 70% aus. Da diese Aufwände bei der Integration einer Luft-Wärmepumpe entfallen, kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass eine Luft-Wärmepumpe mit deutlich geringerem Herstellungsaufwand produziert werden kann. Schätzungsweise kommen zu den verbleibenden 30% (3.225 kWh) noch energetische Aufwände für einen größeren Verdampfer, dem Fundament für den Verdampfer und diverse Rohrverbindungen im Bereich von 5.600 kWh hinzu. Es werden daher Primärenergieaufwände von 8.822 kWh (= 25 GJ) veranschlagt (siehe Tabelle 14)

Darüber hinaus müssen auch die jährlichen primärenergetischen Einsparungen dargestellt werden. Dafür werden für alle Varianten die Stromverbräuche herangezogen. Diese Verbrauchswerte werden anschließend mit dem Faktor 3 multipliziert, um von der Endenergie auf die Primärenergie zu gelangen. Der Faktor beschreibt somit den Gesamtwirkungsgrad des Systems für Stromerzeugung und Stromtransport. Er wird demnach mit 33% angenommen.

Tabelle 14: Primärenergiebedarf für Herstellung und Betrieb der Luft-Wärmepumpe

PEI Luft-Wärmepumpe	8.822 kWh/Stück
jährlicher PEI Strom für Betrieb Luft-Wärmepumpe	8.361 kWh/Jahr

4.2 Vollsolares „SUN“ Nullwärmehaus versus Niedrigenergiehaus-Standard ohne Lüftung

Wie bereits erwähnt, wird als erste Variante das „SUN“ Nullwärmehaus mit Niedrigenergiehaus-Standard ohne Lüftung untersucht. Die Größe der Solarthermie-Anlage ist bereits aus Kapitel 3.4.1 bekannt. Für eine ökonomische Analyse müssen folglich noch die Kosten für den Solarkollektor und den Saison-Speicher erhoben werden. Neben eigenen Berechnungen wurde dazu eine Masterarbeit aus dem Jahr 2013 herangezogen⁷.

Aus dieser Arbeit konnten die Kosten für einen solaren Saison-Speicher in den vorliegenden Größenordnungen entnommen und extrapoliert werden. Im Falle des Nullwärmehauses mit Niedrigenergiehaus-Standard wird ein Wert von 557 €/m³ verwendet.

Für die finanziellen Aufwände des verwendeten Hochtemperatur-Kollektors wurde die Masterarbeit lediglich als Anhaltspunkt benutzt. Für die Kosten des Kollektors wurde ein geschätzter spezifischer Wert von 540 €/m² verwendet. Dieser Betrag wird in weiterer Folge auch für alle weiteren Varianten herangezogen.

⁵ Der Primärenergieinhalt (PEI) beschreibt die Energiemenge, die zur Deckung des Endenergiebedarfs benötigt wird. Dabei ist auch die zusätzliche Energiemenge zu berücksichtigen, die durch zeitlich oder örtlich vorgelagerte Prozessketten außerhalb des Systems „Gebäude“ bei der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung der eingesetzten Brennstoffe entsteht (Quelle: www.baunetzwissen.de)

⁶ Bressler, G.; Günther-Pomhoff, C. und Sailer, A. (1996): Ganzheitliche Bilanzierung von elektrisch angetriebenen Wärmepumpen als Basis einer Ökobilanz, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, Auftraggeber: Bayerische Forschungsförderung, abgerufen am 23.09.2014 um 11:00 Uhr: www.ochsner.com/fileadmin/downloads/Studien/wp.pdf

⁷ Pölzl, M. (2013): Variantenvergleich von nachhaltigen Heizungssystemen bei Betrieb eines thermischen Saisonspeichers für ein Einfamilienhaus, Masterarbeit, Masterstudiengang Nachhaltige Energiesysteme, Fachhochschule Burgenland GmbH, S.84-88

Tabelle 15: Ergebnisse ökonomische Analyse für vollsolares "SUN" Nullwärmehaus mit Niedrigenergiehaus-Standard ohne Lüftung

Kollektorfläche	41 m ²
Speichergröße	139,4 m ³
Spezifische Kosten für Kollektor ¹	540 €/m ²
Spezifische Kosten für solaren Speicher ²	557 €/m ³
Investitionskosten Solarkollektor	22.140 €
Investitionskosten solarer Speicher	77.646 €
Abzug Investitionskosten für Luft-Wärmepumpe	16.000 €
Summe zusätzlicher Investitionskosten	83.786 €
Jährlicher Strombedarf für Pumpen	214 kWh/a
Angenommener spezifischer Strompreis	21 Cent/kWh
Jährliche Stromkosten für Heizen und Kühlen	45 €/a
Jährliche Stromkosten-Einsparung	540 €/a
Statische Amortisationszeit	155 Jahre
¹ Quelle: Pölzl (2013), eigene Annahme	
² Quelle: Pölzl (2013), eigene Extrapolation	

Wie anhand Tabelle 15 zu erkennen ist, ergeben sich zusätzliche Investitionskosten in der Größenordnung von 84.000 € im Vergleich zur Referenzvariante. Diesen Mehr-Aufwänden stehen dabei lediglich jährlichen Einsparungen von 45 €/a gegenüber, was in einer statischen Amortisationszeit von rund 155 Jahren mündet.

Für die ökologische Analyse wurde vermehrt auf die Datenbank „Baubook“⁸ zurückgegriffen. So wurde in der Datenbank für den Primärenergieinhalt eines Flachkollektors ein Wert von rund 308 kWh/m² angegeben. Da dies jedoch alle weiteren Komponenten (Pumpen, Armaturen, Rohre, Dämm- und Befestigungsmaterial, Wärmetauscher) eines solaren Heizungssystem sowie die besondere Beschichtung eines Hochtemperatur-Kollektors unberücksichtigt lässt, werden für all diese Einheiten noch zusätzliche 100 kWh/m² veranschlagt. Dies ergibt letztlich einen spezifischen Wert von 408 kWh/m³ für den Kollektor. Dieser Wert wird auch für alle weiteren Varianten beibehalten.

Für die ökologischen Aufwände des solaren Speichers wurden eigene Berechnungen auf Basis der einzelnen Komponenten durchgeführt. Dabei wurde eine zylindrische Geometrie des Speichers angenommen. Die Dimensionen der einzelnen Speicher-Varianten sind in Tabelle 16 ersichtlich.

Tabelle 16: Dimensionen solare Speicher

Volumen solarer Speicher	Durchmesser des solaren Speichers	Grundfläche des solaren Speichers	Höhe des solaren Speichers
139,4 m ³	6 m	28,27 m ²	4,95 m
80 m ³	5 m	19,63 m ²	4,07 m
78 m ³	5 m	19,63 m ²	3,97 m

⁸ Quelle: www.baubook.at

Die Eigenschaften und Dimensionen der berücksichtigten Komponenten des Speichers sind in Tabelle 17 aufgelistet. Dabei stammen die Werte für die Dichten und Primärenergieinhalte aus der „Baubook“-Datenbank.

Tabelle 17: Eigenschaften und Dimensionen der berücksichtigten Komponenten für den solaren Speicher

<i>Bezeichnung Komponenten</i>	<i>Dichte der Komponente</i>	<i>Spezifischer PEI der Komponente</i>	<i>Dicke der Komponente</i>
Stahlblech verzinkt	7.800 kg/m ³	31,2 MJ/kg	3 mm
Edelstahl	7.900 kg/m ³	59,1 MJ/kg	0,3 mm
Vakuumdämmung	185 kg/m ³	81,5 MJ/kg	15 cm
Trapezblech	7.800 kg/m ³	31,2 MJ/kg	0,9 mm
XPS-Dämmplatte (Grundfläche)	30 kg/m ³	94 MJ/kg	40 cm
Stahlbeton- Fundament	2.325 kg/m ³	1,31 MJ/kg	40 cm

Ergänzend muss angefügt werden, dass für die Berechnung der Volumina der einzelnen Komponenten für die Vakuumdämmung die Grundfläche der Speicher-Geometrie unberücksichtigt wurde. Darüber hinaus wurde für die XPS-Dämmplatte und das Stahlbeton-Fundament eine um ein Meter größere Fläche für die Berechnungen verwendet. Weiters wurde der anschließend sich ergebende Wert für die Materialien mit einem Faktor von 1,2 multipliziert. Dies soll neben den ökologischen Aufwänden für die Materialien auch die Verarbeitung und die Anlieferung in Form eines 20-prozentigen Aufschlages berücksichtigen. Für den solaren Speicher des Niedrigenergiehauses ergab sich demgemäß ein Wert von 0,587 kWh/l (siehe Tabelle 18).

Tabelle 18: Ergebnisse ökologische Analyse für vollsolares "SUN" Nullwärmehaus mit Niedrigenergiehaus-Standard ohne Lüftung

Spezifischer PEI für Kollektor ¹	408 kWh/m ²
Spezifische PEI für solaren Speicher ²	0,587 kWh/l
PEI Solarkollektor	16.728 kWh
PEI solarer Speicher	81.828 kWh
Abzug PEI Luft-Wärmepumpe	-8.822 kWh
Summe zusätzlicher PEI (fix)	89.734 kWh
Jährlicher PEI Strom Solarthermie (variabel)	642 kWh/a
Jährliche primärenergetische Einsparung	7.719 kWh/a
Energetische Amortisationszeit (statisch)	11,6 Jahre
¹ eigene Berechnungen	
² Baubook (2014) und eigene Berechnungen	

Wie anhand Tabelle 18 ebenfalls zu erkennen ist, ergibt sich nach Gegenüberstellung der primärenergetischen Aufwände und jährlichen Einsparungen eine Amortisationszeit von ca. 11,6 Jahren. Aus ökologischer Sicht kann ein vollsolares Nullwärmehaus mit Niedrigenergiehaus-Standard daher grundsätzlich gut geheißen werden, da die Amortisationszeit unterhalb der Lebensdauer eines durchschnittlichen Hauses und der Solaranlage liegt.

4.3 Vollsolares „SUN“ Nullwärmehaus versus Passivhaus-Standard

Als zweite Variante wird das „SUN“ Nullwärmehaus mit Niedrigenergiehaus-Standard ohne Lüftung untersucht. Die Größe der Solarthermie-Anlage ist bereits aus Kapitel 3.4.2 bekannt. Die Herkunft der spezifischen Kosten für Kollektor und Speicher können in Kapitel 4.2 nochmals nachgelesen werden. Die finanziellen Aufwände für die Lüftung und zusätzliche Dämmung auf Passivhaus-Standard entstammen den Erfahrungswerten eines langjährig tätigen Baumeisters.

Tabelle 19: Ergebnisse ökonomische Analyse für vollsolares "SUN" Nullwärmehaus mit Passivhaus-Standard

Kollektorfläche	26 m ²
Speichergröße	80 m ³
Spezifische Kosten für Kollektor ¹	540 €/m ²
Spezifische Kosten für solaren Speicher ²	738 €/m ³
Investitionskosten Solarkollektor	14.040 €
Investitionskosten solarer Speicher	59.040 €
Investitionskosten Lüftung und zusätzliche Dämmung ³	39.000 €
Abzug Investitionskosten für Luft-Wärmepumpe	-16.000 €
Summe zusätzlicher Investitionskosten	96.080 €
Jährlicher Strombedarf für Pumpen	124 kWh/a
Angenommener spezifischer Strompreis	21 Cent/kWh
Jährliche Stromkosten für Heizen und Kühlen	26 €/a
Jährliche Stromkosten-Einsparung	559 €/a
Statische Amortisationszeit	172 Jahre
¹ Quelle: Pölzl (2013), eigene Annahme	
² Quelle: Pölzl (2013), eigene Extrapolation	
³ Quelle: Ing. Andreas Waha GmbH	

Anhand Tabelle 19 ist zu erkennen, dass sich im Falle des Passivhauses sogar eine noch größere Amortisationszeit mit ca. 172 Jahren ergibt als beim vollsolaren Niedrigenergiehaus.

Für die ökologische Amortisationszeit müssen zunächst die Aufwände für alle zusätzlichen Dämmungskomponenten eruiert werden. Hierzu wurde sich abermals der Datenbank „Baubook“ bedient. Für die primärenergetischen Mehr-Aufwände der Dämmung wird letztlich mit einem Wert von 15.484 kWh gerechnet. Die Erklärung zu diesem Wert kann anhand Tabelle 20 und Tabelle 21 nachvollzogen werden.

Tabelle 20: Eigenschaften der Komponenten für zusätzliche Dämmung

Komponenten der zusätzlichen Dämmung	Raumgewicht ¹	Summe nicht erneuerbarer und erneuerbarer PEI ¹
EPS F plus	15 kg/m ³	100 MJ/kg
Universalfilz (Mineralwolle)	21 kg/m ³	49 MJ/kg
EPS W20 plus	20 kg/m ³	100 MJ/kg
EPS W 15	13,5 kg/m ³	100 MJ/kg
¹ Quelle: Baubook (2014)		

Tabelle 21: Primärenergieinhalte für Komponenten der zusätzlichen Dämmung

Bauteil-Bezeichnung	Fläche	Zusätzliche Dämmungskomponente	Zusätzliche Dämmstärke für Passivhaus	Zusätzlicher PEI des Bauteils
Außenwand Nord	59,35 m ²	EPS F plus	10 cm	2.473 kWh
Außenwand Ost	62,54 m ²	EPS F plus	10 cm	2.606 kWh
Außenwand Süd	50,32 m ²	EPS F plus	10 cm	2.097 kWh
Außenwand West	64,20 m ²	EPS F plus	10 cm	2.675 kWh
Decke Spitzboden massiv	7,48 m ²	EPS W 15	8 cm	224 kWh
Decke Spitzboden Tramdecke	87,27 m ²	Mineralwolle	10 cm	2.494 kWh
Dachschräge	4,88 m ²	Mineralwolle	10 cm	139 kWh
Fußboden zu Keller	99,90 m ²	EPS W20 plus	5 cm	2.775 kWh
Summe				15.484 kWh

Für das Lüftungsgerät wird ein Primärenergieinhalt von 2.323 kWh veranschlagt. Dieser Wert entstammt ebenfalls der „Baubook“-Datenbank. Letztendlich resultiert nach Gegenüberstellung der primärenergetischen Aufwände und jährlichen Einsparungen eine Amortisationszeit von ca. 9,9 Jahren. Aus ökologischer Sicht kann daher auch ein vollsolares Nullwärmehaus mit Passivhaus-Standard grundsätzlich gut geheißen werden, da die Amortisationszeit unterhalb der Lebensdauer eines durchschnittlichen Hauses liegt.

Tabelle 22: Ergebnisse ökologische Analyse für vollsolares "SUN" Nullwärmehaus mit Passivhaus-Standard

Spezifischer PEI für Kollektor ¹	408 kWh/m ²
Spezifische PEI für solaren Speicher ²	0,743 kWh/l
PEI Solarkollektor	10.608 kWh
PEI solarer Speicher	59.440 kWh
PEI für zusätzliche Dämmung	15.484 kWh
PEI zentrales Lüftungsgerät ³	2.323 kWh/Stück
Abzug PEI Luft-Wärmepumpe	-8.822 kWh
Summe zusätzlicher PEI (fix)	79.033 kWh
Jährlicher PEI Strom Solarthermie (variabel)	372 kWh/a
Jährliche primärenergetische Einsparung	7.989 kWh/a
Energetische Amortisationszeit (statisch)	9,9 Jahre
¹ eigene Berechnungen	
² Baubook (2014) und eigene Berechnungen	
³ Baubook (2014)	

4.4 Vollsolares „SUN“ Nullwärmehaus versus Passivhaus-Standard und Bauteilaktivierung

Als letzte Variante wird das „SUN“ Nullwärmehaus mit Passivhaus-Standard und Betonkernaktivierung untersucht. Die Größe der Solarthermie-Anlage ist bereits aus Kapitel 3.4.3.1 bekannt. Die Herkunft der spezifischen Kosten für Kollektor und Speicher können in Kapitel 4.2 nochmals nachgelesen werden. Die finanziellen Aufwände für die Lüftung und zusätzliche Dämmung auf Passivhaus-Standard entstammen den Erfahrungswerten eines langjährig tätigen Baumeisters.

Die entscheidende Veränderung besteht in der Betonkernaktivierung. Für eine ökonomische und v.a. eine ökologische Analyse ist es daher essentiell die zusätzlichen Volumina an Beton und deren Eigenschaften zu kennen. Für die nachfolgenden Berechnungen werden daher abermals Werte der „Baubook“-Datenbank verwendet. Ebenso muss auch einberechnet werden, dass durch die Integration von Beton-Einheiten eine Ziegeldecke eingespart werden kann, was in der ökologischen Analyse berücksichtigt wird (siehe Tabelle 25).

Die wesentlichsten Annahmen im Zuge der ökonomischen und ökologischen Berechnung hinsichtlich der Betonkernaktivierung können Tabelle 23, Tabelle 24 und Tabelle 25 entnommen werden.

Tabelle 23: : Primärenergieinhalt für zusätzlichen Beton

	Zusätzliches Volumen an Beton	Dichte Beton ¹	Spezifischer PEI Beton ¹	PEI Beton gesamt
Geschoßdecke	21,82 m ³	2.325 kg/m ³	1,31 MJ/kg	18.461 kWh
Decke zu Spitzboden (gesamt)	23,69 m ³	2.275 kg/m ³	1,03 MJ/kg	15.420 kWh
Dachschräge	1,22 m ³	2.275 kg/m ³	1,03 MJ/kg	794 kWh
Summe	46,72 m ³			34.675 kWh
¹ Quelle: Baubook (2014)				

Tabelle 24: Primärenergieinhalt für eingesparte Ziegeldecke

	Eingespartes Volumen an Ziegel	Dichte Ziegel ¹	Spezifischer PEI Ziegel ¹	PEI Ziegel gesamt
Decke zu Spitzboden massiv	1,65 m ³	700 kg/m ³	2,16 MJ/kg	693 kWh
¹ Quelle: Baubook (2014)				

Wie anhand Tabelle 25 zu sehen ist, ergeben sich zusätzliche Beton-Volumina im Ausmaß von ca. 47 m³. Bei einem konservativ angenommenen Betonpreis von 150 €/m³ betragen die zusätzlichen Kosten aufgrund des Betons ca. 7.000 €. Dies führt zu einer weiteren Verschlechterung der ökonomischen Amortisationszeit von rund 182 Jahren.

Tabelle 25: Ergebnisse ökonomische Analyse für vollsolares "SUN" Nullwärmehaus mit Passivhaus-Standard mit Betonkernaktivierung

Kollektorfläche	26 m ²
Speichergröße	78 m ³
Spezifische Kosten für Kollektor ¹	540 €/m ²
Spezifische Kosten für solaren Speicher ²	738 €/m ³
Investitionskosten Solarkollektor	14.040 €
Investitionskosten solarer Speicher	57.564 €
Investitionskosten Lüftung und zusätzliche Dämmung ³	39.000 €
Zusätzliche Menge Beton	46,72 m ³
Spezifischer Betonpreis	150 €/m ³
Investitionskosten zusätzlicher Beton	7.008 €
Abzug Investitionskosten für Luft-Wärmepumpe	-16.000 €
Summe zusätzlicher Investitionskosten	101.612 €
Jährlicher Strombedarf für Pumpen	122 kWh/a
Angenommener spezifischer Strompreis	21 Cent/kWh
Jährliche Stromkosten für Heizen und Kühlen	26 €/a
Jährliche Stromkosten-Einsparung	559 €/a
Statische Amortisationszeit	182 Jahre
¹ Quelle: Pölzl (2013), eigene Annahme	
² Quelle: Pölzl (2013), eigene Extrapolation	
³ Quelle: Ing. Andreas Waha GmbH	

Für die ökologische Analyse muss der zusätzliche Beton ebenfalls berücksichtigt werden. Es werden primärenergetische Mehr-Aufwände von in Summe 34.675 kWh veranschlagt. Die Erklärung dieses Wertes kann anhand Tabelle 23 nachvollzogen werden. Darüber hinaus werden noch die nun entfallenden Aufwände für die Ziegeldecke abgezogen. Letztlich kann mit einer energetischen Amortisationszeit von ca. 14 Jahren gerechnet werden. Somit kann auch ein vollsolares Nullwärmehaus mit Passivhaus-Standard und Bauteilaktivierung grundsätzlich gut geheißen werden, da die Amortisationszeit unterhalb der Lebensdauer eines durchschnittlichen Hauses liegt. Wie zu erkennen ist, übersteigt diese Amortisationszeit jedoch jene des vollsolaren Passivhauses ohne Betonkernaktivierung. Aus ökologischer Sicht ist daher in diesem Fall ein vollsolares Passivhaus ohne Betonkernaktivierung zu bevorzugen.

Tabelle 26: Ergebnisse ökologische Analyse für vollsolares "SUN" Nullwärmehaus mit Passivhaus-Standard mit Betonkernaktivierung

Spezifischer PEI für Kollektor ¹	408 kWh/m ²
Spezifische PEI für solaren Speicher ²	0,751 kWh/l
PEI Solarkollektor	10.608 kWh
PEI solarer Speicher	58.578 kWh
PEI für zusätzliche Dämmung	15.484 kWh
PEI zentrales Lüftungsgerät ³	2.323 kWh/Stück
PEI für zusätzlichen Beton	34.675 kWh
Abzug PEI für entfallene Ziegeldecke	-693 kWh
Abzug PEI Luft-Wärmepumpe	-8.822 kWh
Summe zusätzlicher PEI (fix)	112.153 kWh
Jährlicher PEI Strom Solarthermie (variabel)	366 kWh/a
Jährliche primärenergetische Einsparung	7.995 kWh/a
Energetische Amortisationszeit (statisch)	14,0 Jahre
¹ eigene Berechnungen	
² Baubook (2014) und eigene Berechnungen	
³ Baubook (2014)	

5 Handlungsempfehlungen

Vollsolare Wärmeversorgung:

Der Aufbau vollsolar betriebener Nullwärmehäuser für einen 4-Personen-Haushalt erfordert immense Aufwände an Geld, Material und grauer Energie speziell für den Saisonspeicher. Selbst im günstigsten Fall ist ein Speicher mit 65m³ Volumen erforderlich, der mit einer relative bescheiden Kollektorfläche geladen wird. Die hohen Kosten hierfür lassen keine positive zu bewertende Wirtschaftlichkeit zu. Auch der ökologische Nutzen einer solchen Anlage wird nur langfristig realisiert, aber immerhin noch innerhalb der zu erwartenden Lebensdauer der Anlage.

Obwohl der Speicher mit einem U-Wert von 0,1 W/m²/K bereits bestens gedämmt ist, besteht beim vollsolaren NEH ohne Lüftung immer noch ein Speicherverlust von 80% und beim vollsolaren Passivhaus ohne Bauteilaktivierung ein Verlust von 91% im Verhältnis zum Nutzwärmebedarf (Heizung und Warmwasser).

Als möglicher Anwendungsfall für vollsolare Anlagen eignen sich daher nur größere Mehrfamilienhäuser oder dicht neben einander gebauten Gebäuden (verdichteter Wohnbau).

Je größer der Saisonspeicher, umso günstiger ist das Verhältnis Oberfläche/Volumen, d.h. der relative Verlust ändert sich mit $Q^{-1/3}$. Verdeutlichung: Mit 200 Wohneinheiten (mit dem Wärmebedarf der Passivhausvariante) sinkt der relative Verlust auf 16% ($=91\% \cdot 200^{-1/3}$). Vollsolare Systemausführungen eignen sich daher aus ökologischen Gesichtspunkten am ehesten für die Wärmeversorgung von kompakten Siedlungen, welche gut gedämmt sind.

Der Einsatz teilsolarer Systeme erscheint aus den genannten Gründen für ein Einfamilienhaus als wirtschaftlich sinnvollere Variante. Deckungsgrade im Bereich von 72% können auch ökologisch vertreten werden. Ökonomisch ist bei heutigen Rahmenbedingungen eine Photovoltaik-Anlage in Kombination mit einer Wärmepumpe jedoch wirtschaftlich attraktiver (siehe „Leitfaden zur Optimierung der Solarenergienutzung [6]).

Klimatisierung:

Es wurde gezeigt, dass der Einbau von Speichermassen im Gebäude vor allem im Obergeschoß sinnvoll ist, um eine rasche Aufheizung im Sommer zu verhindern.

Mit Speichermassen sollte jedenfalls vorsichtig umgegangen werden, da deren graue Energie rasch die Herstellungsenergie und Betriebsenergie von Klimaanlage auf viele Jahre überschreiten kann.

Werden zu wenig Speichermassen eingebaut bzw. wird das Benutzerverhalten nicht korrekt beeinflusst, ist mit dem Ausbau von Klimaanlage in Zukunft zu rechnen.

Das Benutzerverhalten hat bei Gebäuden mit bester Dämmung einen - relativ gesehen - noch wesentlich größeren Einfluss als bei Standardhäusern.

Es ist zu bedenken, dass durchaus sommertaugliche Gebäude aufgrund ineffizienter Lüftungsgewohnheiten gelegentlich auch mit Klimaanlage ausgestattet werden.

Problematisch wird der Energiebedarf dann, wenn Klimaanlage mit falscher Fenster- bzw. Türlüftung sorglos kombiniert werden. Dies lässt den Strombedarf unnötig in die Höhe schnellen. Die Sorglosigkeit wird leider durch eine im Verhältnis zur Arbeitszeit billige Energie unterstützt.

Ein vernünftiger Ansatz wäre es daher, den Betrieb von Klima-, Heizungs- und Lüftungsanlagen zu unterbrechen, sobald Fenster oder Türen mehr als nur kurzfristig geöffnet werden. Damit kann das Nutzerverhalten positiv gelenkt werden.

Bemerkung: Hinsichtlich des Klimaschutzes muss man sich um die Strombereitstellung von Klimaanlage weniger Sorgen machen, da dieser Strombedarf im Gegensatz zum Heizstrom sehr gut mit einer PV-Anlage abgedeckt werden kann.

Ausblick – offene Fragen:

1. Die Vergrößerung der Speichermassen (mehr Betonbauteile, PCM-Platten) kann ökonomisch an Attraktivität gewinnen, wenn sie in Verbindung mit einer Wärmepumpe den Strom einer Photovoltaikanlagen in Form von Wärme im Gebäude zwischenspeichern kann ohne das Gebäude unangenehm zu überwärmen. Die gespeicherte Wärme sollte das Gebäude in der folgenden Nacht bis zum Morgen ausreichend warm halten können. Zu untersuchen wäre hierbei, ob die verbesserte Eigenbedarfsverwertung des PV-Stroms die Mehrkosten der Speichermasse in ausreichend kurzer Zeit kompensieren kann.
2. Es empfiehlt sich, die vorliegende Arbeit auf Mehrfamilienhäuser auszudehnen; aufgrund des günstigeren Verhältnisses Speichervolumen : Speicheroberfläche sind sowohl wirtschaftlich als auch ökologisch bessere Ergebnisse zu erwarten.

6 Unterlagen

- [1] Waha, Pläne 1:100 für das Blueline-Massivfertifighaus, 2012
- [2] ÖNORM B8110-3 Wärmeschutz im Hochbau, 1999
- [3] ÖNORM B8110-6 Grundlagen und Nachweisverfahren — Heizwärmebedarf und Kühlbedarf, 2008
- [4] A. Waha, Energieausweis zum Gebäude Blueline Standard vom 12.3.2011, erstellt mit Ecotech Software
- [5] A. Waha, Energieausweis zum Gebäude Blueline in Holzriegelbauweise vom 12.3.2011, erstellt mit Ecotech Software
- [6] G. Wind, Leitfaden zur Optimierung der Solarenergienutzung - das Energiesparhaus wird zum Plusenergiehaus, 2012, 2012, <http://www.ibwind.at/download/Leitfaden-Blueline.pdf>
- [7] Referenzwetterdaten aus dem Photovoltaikanlagen-Simulationsprogramm PV-Sol (Hersteller Fa. Valentin)extrahiert
- [8] T*SOL – Simulationsprogramm Fa. Valentin
- [9] Pölzl, M. (2013): Variantenvergleich von nachhaltigen Heizungssystemen bei Betrieb eines thermischen Saisonspeichers für ein Einfamilienhaus, Masterarbeit, Masterstudiengang Nachhaltige Energiesysteme, Fachhochschule Burgenland GmbH