

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Prof. Dr. Philip Leistner

Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

IBP-Bericht EER 019/2016/952

Windheizung 2.0 - Energiespeicherung und Strom- netzregelung mit hocheffizienten Gebäuden

Projektphase 2015/16

Durchgeführt im Auftrag vom
Bayerischen Landesamt für Umwelt, finanziert vom
Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft und
Medien, Energie und Technologie

*Auszugsweise Veröffentlichung nur mit
schriftlicher Genehmigung des Fraun-
hofer-Instituts für Bauphysik gestattet*

Der Bericht umfasst
214 Seiten Text
40 Tabellen
29 Abbildungen

Herbert Sinnesbichler, Matthias Kersken, Matthias
Pazold, Katrin Lenz, Hans Erhorn, Heike Erhorn-
Kluttig, Patrick Schumacher, Sarah Doster, Michael
Jäger, Florian Antretter, Dietrich Schmidt

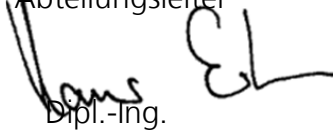
Holzkirchen, 19. Oktober 2016

stellv. Institutsleiter



Prof. Dr.-Ing.
Gunnar Grün

Abteilungsleiter



Dipl.-Ing.
Hans Erhorn

Bearbeiter



Dipl.-Ing. (FH)
Herbert Sinnesbichler

Inhalt

1	Einleitung Aufgabenstellung	4
2	Methodik	6
3	Auswahl der Randbedingungen	9
3.1	Analyse Starkwindereignisse	9
3.2	Festlegung der Typ-Gebäude	17
3.2.1	Analyse Gebäudebestand	17
3.2.2	Gewählte Typgebäude	20
3.2.3	Energetische Standards	22
3.2.4	Zugrunde gelegte energetische Bauteilqualitäten	22
3.2.5	Zugrunde gelegte Luftwechselraten	26
3.3	Technologieübersicht	32
3.4	Simulationsumgebung	32
3.5	Anlagentechnik	34
3.6	Kosten	42
3.7	Ökobilanz	48
4	Ergebnisse der Grobanalyse	53
4.1	Durchführung der Analyse	55
4.2	Bewertungskriterien	57
4.3	Ergebnisse Grobanalyse	58
5	Ergebnisse der Detailanalyse	62
5.1	Durchführung der Analysen	62
5.2	Bewertungskriterien	63
5.3	Ergebnisse Detailanalyse	66
5.3.1	Einfamilienhaus - Neubaufall	66
5.3.2	Einfamilienhaus - Sanierungsfall	72
5.3.3	Bürogebäude	76
5.3.4	Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen	77
5.3.5	Ergebnisse der Analysen des Hochtemperatur-Steinspeichers	82
5.3.6	Ergebnisse für die Seitenstudie mit Passivhausstandard	86
6	Musterbauplan	92
6.1	Generelle Eignung	92
6.2	Technologie-Kombinationen	94
6.3	Auslegungshilfen	97

7	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	100
8	Literaturverzeichnis	107
	Anhang 1 - Dokumentation der Bauteilaufbauten	110
	Anhang 2 - Matrix der Technologieübersicht	158
	Anhang 3 - Details der Kostenermittlung	162
	Anhang 4 - Ergebnisse der Detailanalyse	168
	Anhang 5 - Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	179
	Anhang 6 - Ergebnisse der Studie zum Hochtemperatursteinspeicher	185
	Anhang 7 - Dokumentation der veränderten Bauteilaufbauten der Passivhaus-Seitenstudie	190
	Anhang 8 - Ergebnisse der Seitenstudie mit Passivhaus- Randbedingungen	197
	Anhang 9 - Eingangsgrößen für die Sachbilanz	202
	Anhang 10 - Musterbauplan Windheizungsgebäude	209

1 Einleitung Aufgabenstellung

Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien betrug im Jahr 2015 in der Bundesrepublik Deutschland etwa 194 TWh, dies sind ca. 30 % der erzeugten Gesamtstrommenge. Hiervon wurden 39 TWh mit Photovoltaikanlagen (PV) und 86 TWh mit Windkraftanlagen [1] erzeugt, die nicht regelbar sind und daher zur Sicherung der Netzstabilität zeitweise vom Netz genommen werden müssen. Aufgrund des schnell wachsenden Zubaus besonders von Windkraftanlagen, wird diese Erzeugungsmenge auch in Zukunft weiter steigen. Da die Solar- und Windstromproduktion nicht bedarfsabhängig erfolgen kann, gilt es zukünftig den Stromverbrauch zu flexibilisieren, um das Angebot fluktuierender Stromerzeugung sinnvoll zu nutzen. Damit ist ein Paradigmenwechsel von der „verbrauchsabhängigen“ Erzeugung hin zu einer „angebotsorientierten“ Nutzung von Energie verbunden. Mit der Umstellung unseres Energiesystems in der Energiewende geht nicht nur ein erhöhter Anteil regenerativer und fluktuierender Stromerzeugung einher, sondern es sind auch eine erhöhte Effizienz bzw. ein erhöhter Anteil regenerativer Energie im Sektor Wärme unbedingt zur Erreichung der gesteckten politischen Ziele notwendig.

Derzeit entfällt etwa ein Drittel des gesamten Endenergieverbrauchs auf den Gebäudesektor, damit sind Gebäude einer der größten und wichtigsten Verbrauchssektoren. Darüber hinaus bietet der gesamte Gebäudebestand durch seine thermische Speichermasse ein immenses und noch weitgehend ungenutztes Energiespeicherpotenzial. Würde man die Raumtemperatur des Gebäudebestandes in Deutschland kurzzeitig im 1 Kelvin erhöhen, könnte man die Energiemenge von etwa 1 TWh durch die Wärmespeicherfähigkeit der Bausubstanz zwischenspeichern [2]. Der Gebäudesektor kann auf Grund dieser Eigenschaften einen wichtigen Beitrag zur Netzstabilisierung und zum Ausgleich von Stromspitzen leisten. Weiterhin ist davon auszugehen, dass zukünftig mehr Strom zu Heizzwecken, vorzugsweise aus den nicht regelbaren Überschüssen, verwendet werden wird.

Zu beobachten ist derzeit, dass der regenerative Energieanteil im Wärmesektor wesentlich langsamer steigt, als dies im Stromsektor der Fall ist, obwohl der Endenergieverbrauch für Raumwärme, Warmwasser und Kälte im Gebäudebereich fast doppelt so hoch ist wie der Stromverbrauch. Ein erhöhter fluktuierender Anteil der Stromerzeugung bedeutet somit, dass elektrische und kosteneffiziente thermische Speicher eine entscheidende Rolle im künftigen Energiesystem spielen. Wobei gerade eine flexible Ansteuerung stromgeführter anlagentechnischer Aggregate im Wärme-/Kältesektor sich anbietet, steigende Anteile aus fluktuierender Wind- und Solarenergie des Stromsektors sinnvoll zu nutzen. Dabei können Gebäude und deren Anlagentechnik kostengünstig in zu beachtenden Grenzen als thermischer Speicher genutzt werden, ohne Einschränkung des Nutzerkomforts.

In dem Projekt Windheizung 2.0 - Energiespeicherung und Stromnetzregelung mit hocheffizienten Gebäuden - wird das Potential zur Deckung des Wärmebedarfs von Gebäuden durch kurzfristig hohe Stromerzeugungsspitzen (z.B. Über-

schüsse bei Winterstürmen) aus der künftigen Windenergieerzeugung untersucht. Die Beheizung dieser Gebäude soll zukünftig nicht mehr ausschließlich bedarfsabhängig, sondern überwiegend angebotsorientiert erfolgen, um eine hohe Netzdienlichkeit sicherzustellen. Die zu erarbeitenden Lösungsansätze orientieren sich hierbei an den vier Zielgrößen Versorgungssicherheit/Systemverträglichkeit, Wirtschaftlichkeit, Nutzerkomfort und Umweltverträglichkeit. Die Ergebnisse der Studie geben Hinweise, welche Gebäude (Dämmstandard, Anlagentechnik, Speichersysteme) geeignet sind, kurzzeitig hohe Stromspitzen aus Starkwindereignissen mit einem Heizsystem aufzunehmen und als Wärmemenge solange im Gebäude zu speichern, dass bis zu mehrwöchige Abstände zwischen den Windspitzen überbrückt werden können. Hierbei ist zu beachten, dass die Speicherfähigkeit möglichst so groß gewählt wird, dass auf einen Strombezug während künftiger Stromengpasszeiten während der Heizperiode weitgehend vollständig verzichtet werden kann. Die erarbeiteten Ergebnisse beziehen sich auf energetisch hochwertige Neubauten und auch auf energetisch hochwertig sanierte Bestandsgebäude (Wohn- und Bürogebäude). Der Wärme- und Stromverbrauch dieser hocheffizienten, elektrisch beheizten Gebäude muß einerseits aus Anforderungsgründen und andererseits aus Kosten- und Akzeptanzgründen (Diskussion um Energieverschwendung etc.) möglichst gering sein.

Zur Beantwortung der eingangs erläuterten Fragestellungen werden umfangreiche Simulationsrechnungen durchgeführt, in denen unterschiedliche Gebäude-/Anlagenkombinationen und thermische Speicherkonzepte auf ihre Nutzbarkeit in Hinblick auf Strom aus Windspitzen untersucht werden. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse werden unterschiedliche Gebäudetypen (Nutzungsszenarien, verfügbare Speichermassen) und Baukonstruktionen (Baustoffe, Dämmniveaus der Außenbauteile, aktivierte Innenbauteile) betrachtet. Darüber hinaus werden Systeme zur schnellen Beladung (elektrische Direktheizung, Wärmepumpen) mit unterschiedlichen Speichersystemen (Innenbauteile mit Bauteilaktivierung, Flächenheizungen, Warmwasserspeicher) kombiniert und unterschiedliche Entladungsszenarien (passive Entladung, unterschiedliche Flächenheizungen, Radiatoren, etc.) bewertet.

Gebäudebauteile als thermische Speicher zu verwenden bedeutet, dass diese über das im gewöhnlichen Gebäudebetrieb übliche Maß hinaus beladen, bzw. erwärmt werden. Dies hat auch einen Einfluss auf das Raumklima – es wird bei Beladung der Bauteile im Gebäude wärmer. Somit ist die maximal mögliche Beladung durch die Komfortanforderung, speziell die maximal erlaubte Raumtemperatur beschränkt. Der Zusammenhang zwischen der speicherbaren Energie und deren Auswirkung auf das Raumklima wird durch Bewertung des Nutzerkomforts berücksichtigt.

Als Grundlage zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Szenarien dienen neben den Investitionskosten unterschiedliche Szenarien für die Betriebskosten. Es gilt durch eine Parametervariation die betriebswirtschaftlich attraktivste Gebäude-/Anlagenkombination für den geplanten Anwendungsfall zu bestimmen.

2 Methodik

Dieses Kapitel beschreibt die generelle Methodik die dem Vorgehen in dieser Studie zu Grunde liegt. Ein Flussdiagramm das den Arbeitsablauf beschreibt ist in Bild 1 dargestellt.

In einem ersten Schritt werden die Randbedingungen festgelegt, unter denen ein Windheizungsgebäude funktionieren muss. Dies betrifft zunächst eine Analyse der vorkommenden Starkwindereignisse. Hieraus wird abgeleitet, welche maximalen zeitlichen Überbrückungsdauern unter Zugrundelegung des gesamtdeutschen Klimas von dem Gebäude realisiert werden müssen, um nicht regelmäßig außerhalb von Starkwindereignissen größere elektrische Strommengen zur Wärmebereitstellung zu benötigen. Dies ist eine Grundvoraussetzung um eine Windheizungsgebäude ökonomisch und netzdienlich betreiben zu können. In der vorliegenden Studie werden beispielhaft Einfamilienhäuser (EFH) und Bürogebäude, jeweils im Neubau und als saniertes Objekt, untersucht. Um eine wissenschaftliche Grundlage für die Auswahl konkreter Typgebäude bzw. Geometrien zu erhalten, wird sowohl der bayerische als auch der bundesweite Bestand an Einfamilien- und Bürogebäuden hinsichtlich der typischen Flächengrößen und Baumaterialien analysiert. Basierend auf den so gewonnenen Erkenntnissen werden typische Gebäude-Geometrien ausgewählt. Diese Typgebäude werden jeweils in den als üblich identifizierten Bauweisen Ziegel, Beton und Holz (Bürogebäude in Holzbauweise nur als Neubau) betrachtet. Hieraus ergeben sich insgesamt 11 unterschiedliche Typgebäude. Neben der Gebäude-Geometrie werden auch die energetischen Standards der Referenzfälle, der Sanierung und des Neubaus festgelegt. Hierbei gelten die Mindestanforderungen der EnEV 2014. Nach Festlegung der energetischen Standards werden, basierend auf Berechnungen gemäß DIN V 18599 [3], für jedes Typgebäude die entsprechenden U-Werte ermittelt die erforderlich sind, um für die jeweilige Geometrie den definierten energetischen Standards von Referenz und Windheizungs-Gebäuden zu entsprechen. Anschließend werden für jedes Bauteil der unterschiedlichen Typgebäude und für die einzelnen energetischen Standards die Bauteilaufbauten für die drei Bauweisen (Ziegel, Beton und Holz) so definiert, dass sie jeweils die erforderlichen U-Werte erreichen und in ihrem Aufbau repräsentativ sind. Es ist zu erwarten, dass die thermisch/energetischen Unterschiede zwischen den beiden Massivbauweisen Ziegel und Beton nicht sehr groß sein werden. Aus diesem Grund wird keine separate Betrachtung für Kalksandstein durchgeführt, da die Dichte dieses Baustoffs, je nach gewähltem Produkt, in dem Bereich zwischen Ziegel und Beton liegt und somit auch die Ergebnisse in diesem Bereich zu erwarten sind.

Für diese verfügbaren 11 Windheizungs-Typgebäude ist zunächst noch keine detaillierte Anlagentechnik definiert, trotzdem kann der Heizwärme-Bedarf dieser 11 Basisfälle mit Hilfe von Simulationsrechnungen in der Softwareumgebung WUFI-Plus [4] abgeschätzt werden. Die hierfür erforderlichen Nutzungsrandbedingungen (z.B. Luftwechselraten und Solltemperaturen) werden in Anlehnung an DIN V 18599 gewählt und in WUFI-Plus umgesetzt. Auf Grund der starken anlagentechnischen Ausrichtung dieser Studie ist allerdings die Betrachtung

tung des Endenergiebedarfs, nicht nur der Heizwärme (Nutzenergie) erforderlich. Der Endenergiebedarf besteht aus dem Bedarf für Heizwärme und Brauchwarmwasser-Erwärmung inklusive der Erzeugungs-, Verteil- und Übergabeverluste sowie der elektrischen Hilfsenergie. Der Bedarf für Brauchwarmwasser wird entsprechend den Vorgaben der DIN V 18599-10 angesetzt. Die für die Ermittlung des Endenergiebedarfs erforderlichen Verluste und Hilfsenergiemengen werden ebenfalls mit Hilfe von DIN V 18599-Berechnungen abgeschätzt. Diese Bedarfsabschätzung wird separat für jeden Zeitraum zwischen zwei Starkwindereignissen (Überbrückungsperiode) durchgeführt, um für jede dieser Perioden während der betrachteten Heizperiode einen separaten Bedarf zu erhalten.

Ein zentraler Aspekt bei der Konzeption eines Windheizungsgebäudes ist die einsetzbare Technische Gebäude-Ausrüstung (TGA) zur Bereitstellung von Heizwärme und Brauchwarmwasser. Generell ist eine Vielzahl unterschiedlicher technischer Grundkonzepte verfügbar die auf ihre Eignung bezüglich des Windheizungskonzepts überprüft werden müssen. Es wird eine Liste aller denkbaren Technologien erstellt die die jeweiligen Systeme nach Erzeuger-, Speicher- und Übergabesystem eingruppiert. Aus dieser Zusammenstellung werden nun alle Technologien ausgewählt, die für das Konzept Windheizung 2.0 grundsätzlich geeignet sind.

In dem nun folgenden, als „Grobanalyse“ bezeichneten, Prozess werden alle technisch möglichen Systemkombinationen aus Erzeuger-, Speicher- und Übergabesystem gebildet. Diese Kombinationen werden, soweit sinnvoll möglich, jedem der 11 Typgebäuden zugeordnet und somit zu knapp 5000 potentiellen Windheizungsvarianten kombiniert. Die für eine Überbrückungsperiode zwischen zwei Starkwindereignissen theoretisch verfügbare thermische Speicherkapazität aller dieser Varianten wird berechnet. Diese Kapazität der einzelnen Varianten wird mit der Bedarfsabschätzung des jeweiligen Typgebäudes verglichen. Hieraus wird die Windstromdeckung am Gesamtwärmebedarf errechnet. Parallel werden, basierend auf den Investitionskosten und dem Strombedarf während (Windstrombedarf) und außerhalb von Starkwindereignissen (Reststrombedarf), die Lebenszykluskosten für jede dieser Varianten auf Basis der Kapitalwertmethode errechnet. Sowohl bezüglich der Windstromdeckung als auch der Kosten werden Grenzwerte festgelegt. Als Ergebnis der Grobanalyse werden alle diejenigen Varianten herausgefiltert die einen oder beide dieser Grenzwerte nicht einhalten.

Die verbleibenden Varianten werden im Rahmen des folgenden, als „Detailanalyse“ bezeichneten, Prozesses inklusive detaillierter Modelle der jeweiligen Anlagentechnik in der WUFI-Plus Softwareumgebung dynamisch simuliert. Mit Hilfe dieser Simulationsrechnungen und der Hilfsenergieberechnung gemäß DIN V 18599 werden detaillierte Endenergiebedarfswerte für den solarthermischen Beitrag, den Wind- und den Reststrombedarf ermittelt. Diese Bedarfswerte sind die Grundlage für die Berechnung der Bewertungskriterien dieses Analyseschritts.

Als Bewertungskriterien für die Detailanalyse werden die Windstromdeckung, der Endenergiebedarf und dessen Zusammensetzung, der Beitrag zur Klimaerwärmung (Treibhauspotenzial, GWP) und die Nutzung fossiler, primärenergetischer Energieträger (Primärenergiebedarf, nicht-erneuerbar), der thermische Komfort und der finanzielle Mehr- bzw. Minderaufwand berücksichtigt. In der Detailanalyse werden keine festen Grenzwerte für die einzelnen Kriterien definiert. Stattdessen werden die Ergebnisse der einzelnen Varianten diskutiert und Empfehlungen für einen Musterbauplan abgeleitet.

Diese Methodik ist in Bild 1 schematisch dargestellt. Zuerst werden wie oben, in dem orange hinterlegten Bereich gezeigt, die verschiedenen Randbedingungen für das Windheizungskonzept festgelegt. In einem ersten Zwischenschritt wird der Wärmebedarf der Basisfälle (ohne detaillierter Abbildung der Anlagentechnik) mit Hilfe von Simulationsrechnungen ermittelt. Parallel werden die Speicherkapazitäten der einzelnen Systeme und die Kosten der einzelnen Komponenten ermittelt. Im Rahmen der hier farblich blau hinterlegten Grobanalyse werden die Speicherkapazitäten aller Windheizungskombinationen ermittelt und daraus die Lebenszykluskosten und die Windstromdeckung berechnet. Anschließend wird überprüft, welche Varianten die Auswahlkriterien der Grobanalyse erfüllen. Diese ausgewählten Varianten werden dann in der anschließenden Detailanalyse dynamisch simuliert (Gebäude- und Anlagentechnik). Nach der Ermittlung des Endenergiebedarfs unter Berücksichtigung der detaillierten Anlagentechnik werden die einzelnen Bewertungskriterien der Detailanalyse (grün hinterlegt) ermittelt. Aus diesen Informationen wird anschließend abgeleitet, welche Varianten als windheizungstauglich eingestuft werden.

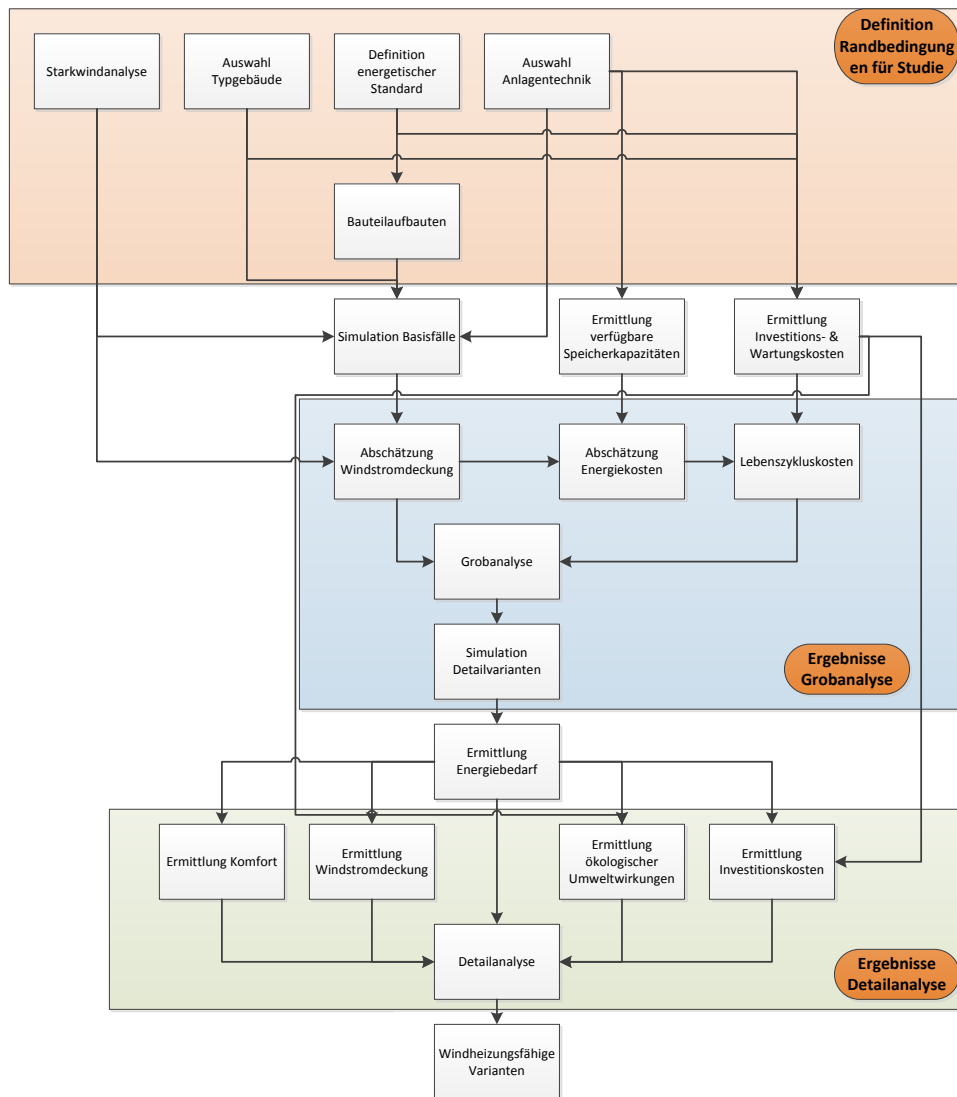


Bild 1:
Flussdiagramm der in dieser Studie angewendeten Methodik.

3 Auswahl der Randbedingungen

3.1 Analyse Starkwindereignisse

Mit zunehmendem Zubau erneuerbarer Energieerzeuger aus volatilen Energiequellen steigen die Stromüberschüsse und die Häufigkeit der Abregelung nimmt zu. Die Studie „Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien“ vom Fraunhofer IWES [5] zeigt, dass 2012 die Ausfallarbeit in Schleswig-Holstein 346 Gigawattstunden (GWh) betrug. Dies ist ein Anteil von 3,5 Prozent der EE-Stromerzeugung in Schleswig-Holstein und entspricht in etwa einem volkswirtschaftlichen Wert von rund 37 Millionen Euro pro Jahr. Schätzungsweise 20 Prozent dieses Stroms wurden dabei aufgrund von Netzengpässen im Übertragungsnetz abgeregelt. Bei weiterem Zubau fluktuierender Energieerzeuger steigen auch vermehrt die Stromüberschüsse im Übertragungsnetz an und die Häufigkeit der Abregelung er-

neuerbarer Anlagen zur Stromerzeugung nimmt zu. In ganz Deutschland stieg die Ausfallarbeit allein für Windenergie von 480 GWh in 2013 auf 1.221 GWh im Jahr 2014. Entschädigungszahlungen durch EinsMan Zahlungen stiegen auf 82,7 Mio. Euro in 2014 gegenüber 43,7 Mio. Euro in 2013 [6]

Die Überschüsse entstehen meist in regional unterschiedlichen Gebieten. Bild 2 verdeutlicht, dass Windstrom im Norden überproportional vertreten ist. Weiter zeigen die Ausbauziele für 2020 der Bundesländer, dass sich die regionalen Überschüsse aufgrund der höheren Zubauraten in windreichen Regionen verdeutlichen werden, weil in den jeweiligen Regionen die Investition in Windanlagen am attraktivsten ist. So strebt Niedersachsen für das Jahr 2020 einen Ausbau auf 14.000 MW onshore und 8.000 MW offshore Leistung und bis 2050 auf 20.000 MW an. Die Netzentwicklungsinitiative im Land Schleswig-Holstein plant mit knapp 8.500 MW Windenergie onshore im Jahr 2020. Weiter plant Hessen 2 % der Landesfläche als Vorrangflächen für die Windenergienutzung ausweisen, um bis 2050 die Stromversorgung vollständig auf erneuerbare Energien umzustellen [7].

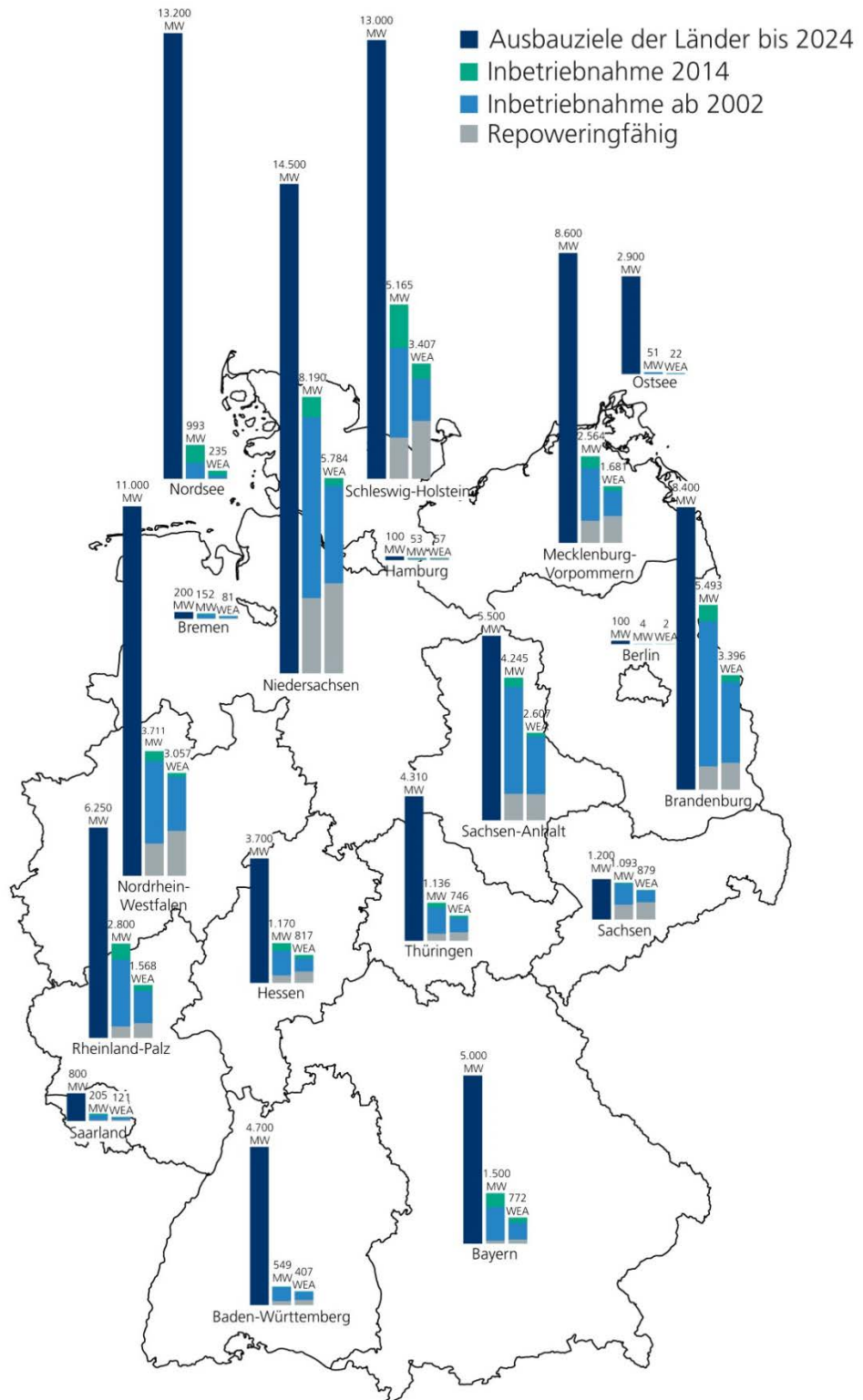


Bild 2:
 Aktueller Stand und künftige Ausbauziele der Windleistung nach Bundesland [8].

Analyse der Klimadaten

Die Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes DWD werden im Rahmen dieser Studie an verschiedenen Stellen benötigt. Für die Festlegung des Starkwindaufkommens werden Mittelwerte der Standorte Cuxhaven, Emden, Fehmarn, Norderney, Schleswig und UFS Deutsche Bucht gewählt. Die Windmessstation befindet sich auf einer Höhe von 10 Metern. Der Deutsche Wetterdienst definiert die Windgeschwindigkeit anhand der von Sir Francis Beaufort (1774 – 1857) entwickelten Beaufort-Skala [9]. Diese reicht von Stärke 0 (Windstille) bis Stärke 12 (Orkan). Beispielsweise ist bei 6 Beaufort die Rede von Starkwind. Ein Ereignis mit jener Windstärke zeichnet sich dadurch aus, „dass starke Äste zu schwanken beginnen, Regenschirme nur schwer zu halten sind und Telegrafleitungen im Wind pfeifen“. Die Windgeschwindigkeit beträgt dann zwischen 39 und 49 km/h (bzw. 10,8 bis 13,8 m/s) [10]. Zur Berechnung der Windgeschwindigkeit in abweichenden Höhen kann die Berechnungsgleichung (Gleichung (1)) nach Hellmann verwendet werden:

$$v_h = v^* \left(\frac{h}{h^*}\right)^g \quad (1)$$

mit:

v_h - mittlere Windgeschwindigkeit in der Höhe h

v^* - Bezugsgeschwindigkeit in einer Referenzhöhe

h^* - Referenzhöhe (meistens 10m, selten 30 m)

g - Rauigkeitsexponent (meist 0,1 bis 0,3)

Da Windkraftanlagen nur bodennahen Wind nutzen können, muss der Einfluss der Bodenoberfläche berücksichtigt werden. Der ungestörte, geostrophische Wind wird durch Hindernisse in Bodennähe wie zum Beispiel Häuser, Bäume oder Büsche abgebremst. Für den Exponenten g existiert eine Richtwerttabelle nach Kleemann und Meliß [11]:

- Offenes Gelände (Wasser, Gras- oder Ackerland, Küsten, Wüsten etc.):
0,16
- Gelände mit Hindernissen bis 15 m (Wälder, Siedlungen, Städte etc.):
0,28
- Gelände mit großen Hindernissen (große Städte etc.):
0,40

Zur weiteren Berechnung wird im Rahmen dieser Studie ein Exponent g von 0,16 ausgewählt.

In Bild 3 ist die erzeugte Leistung einer Windkraftanlage in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit dargestellt. Windkraftanlagen benötigen zum Anlaufen eine Windgeschwindigkeit von ungefähr 3 m/s. Zwischen 3 m/s und 12 m/s variiert die an das Stromnetz abgegebene elektrische Leistung stark. Windkraftanlagen erreichen in der Regel bei einer Windgeschwindigkeit von ca. 12 m/s die Nennleistung. Bei Windgeschwindigkeiten größer 12 m/s bleibt die Anlagenleistung konstant. Bei Windereignissen größer 25 m/s wird zum Schutz der Anlagen eine Notabschaltung herbeigeführt, indem die Rotorblätter durch eine Pitch-Regelung aus dem Wind gedreht werden und eine Notbremsung eingeleitet wird.

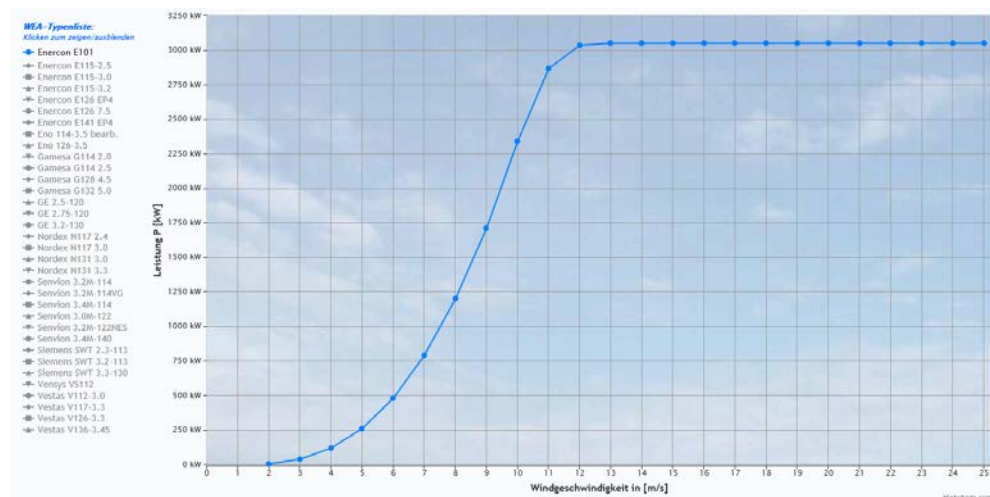


Bild 3: Durchschnittliche Leistungskurve einer Windkraftanlagen mit 3 MW in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit [12].

Auf der Internetplattform des DWD sind stündliche Mittelwerte der Windgeschwindigkeit angegeben. In Bild 4 ist die statistische Verteilung der Windgeschwindigkeiten in Cuxhaven als Beispielregion im 10-jährigen Mittel dargestellt. Die Wetterdaten liegen von Anfang des Jahres 2003 bis Ende 2012 vor. Windgeschwindigkeiten ab 10,8 m/s werden einem Starkwindereignis zugeordnet.

Für die Ermittlung der benötigten thermischen Speicherfähigkeit des Gebäudes ist die Dauer zwischen zwei Starkwindereignissen zu ermitteln. In Bild 4 sind deshalb die Starkwindereignisse chronologisch aus den Jahren 2003 bis 2012 dargestellt. Im Mittel der sechs betrachteten Messstationen verstreichen 84 Stunden bzw. 4,2 Tage bis zum nächsten Starkwindereignis mit einer Dauer von mindestens 5 Stunden. Die maximale Dauer zwischen zwei Starkwindereignisse beläuft sich auf 33 Tagen. Das 95. Quantil und somit zu einer 95 % Wahrscheinlichkeit, liegt die Dauer zwischen zwei Starkwindereignissen bei rund 13 Tagen während einer angenommenen Heizperiode von Anfang Oktober bis Ende März.

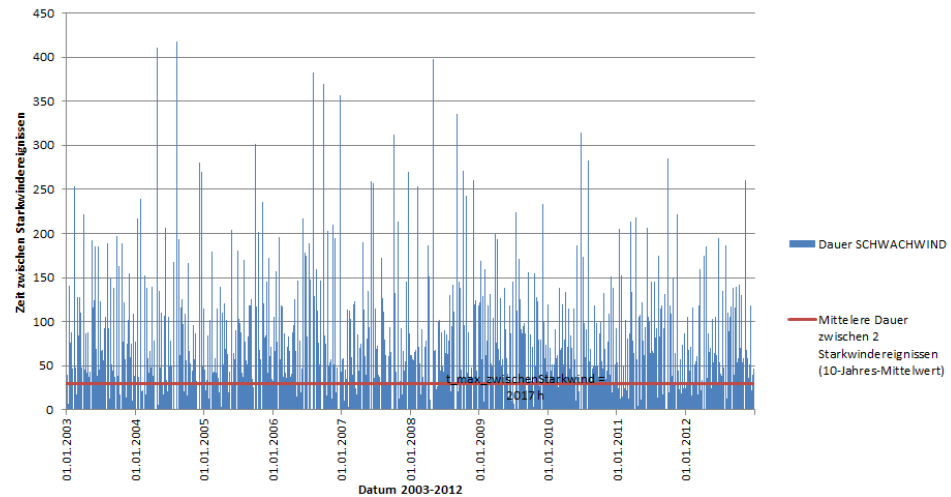


Bild 4:
Dauer zwischen zwei Starkwindereignissen in Cuxhaven zwischen 2003 und 2012.

Werden nur einstündliche Starkwindereignisse betrachtet, liegt der Mittelwert zwischen zwei Starkwindereignissen bei 1,6 Tagen, der Maximalwert im Durchschnitt aller sechs betrachteten Stationen bei 24 Tagen und der 95 %-Quantil-Wert bei 6,5 Tagen.

Die Dauer eines Starkwindereignisses ist neben der Auslegung des Speichersystems auch für die Auslegung des Wärmeerzeugers bedeutsam. Während des Starkwindereignisses sollte eine möglichst große Energiemenge in den Gebäudebauteilen oder dem Warmwasserspeicher eingelagert werden, um den Wärmebedarf während der Schwachwindzeiten möglichst vollständig decken zu können. Ein hoher Anteil des Windstromes an der Wärmebereitstellung des Gebäudes kann dadurch sichergestellt werden.

Die Dauer der Starkwindereignisse für den Standort Cuxhaven ist in Bild 5 dargestellt. Dieser liegt im Mittel bei 7,8 Stunden. Für die insgesamt sechs betrachteten Standorte liegt der Mittelwert bei 9,8 Stunden mit einer Mindestdauer von 5 Stunden während der Heizperiode von Anfang November bis Ende Februar. Sowohl die Dauer der Starkwindereignisse als auch die Häufigkeit ist um den Jahreswechsel deutlich erhöht. Ein Vergleich des Auftretens von Starkwindereignissen mit der Heizperiode zeigt eine große Gleichzeitigkeit. Die Heizperiode startet am 1. Oktober und endet am 31. März eines Jahres. Von insgesamt 2.682 Stunden Starkwind ereignen sich 2.371 Stunden bzw. 88 Prozent während der Heizperioden in den betrachteten 10 Jahren von 2003 bis 2012. Dies verdeutlicht wie gut Heizperiode und Windaufkommen zusammenpassen und zeigt damit, dass sich die Windenergie sehr gut als Energieträger zur Wärmebereitstellung eignet.

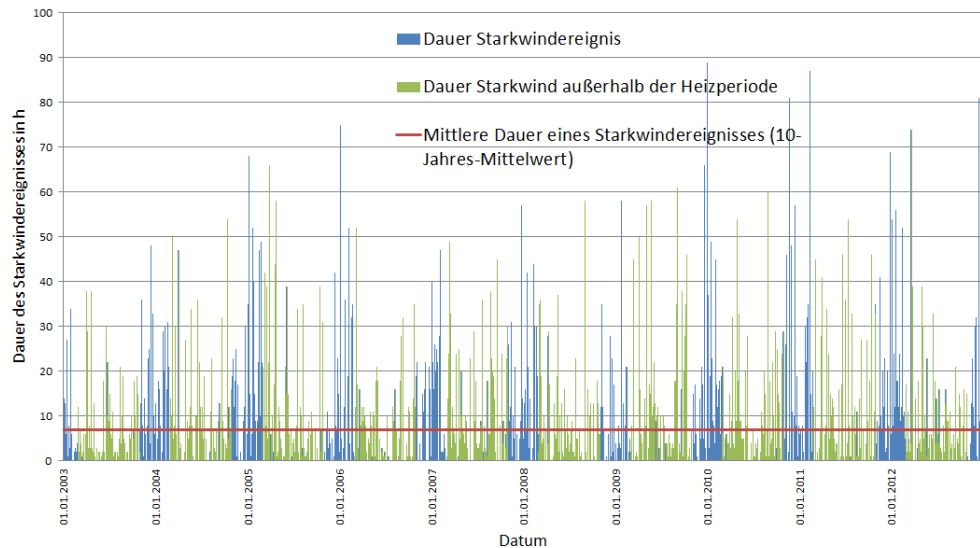


Bild 5:
Dauer der Starkwindereignisse für den Standort Cuxhaven zwischen 2003 und 2012.

Zusammenfassend sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 die charakteristischen Daten der Windanalyse dargestellt (Mittelwert, Maximum und 95. Quantil). Wie bereits erläutert, werden im Folgenden in dieser Studie die mittlere Dauer eines Starkwindereignisses und der mit 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit längste Abstand (95 %-Quantil) zwischen zwei Ereignissen als Bewertungsgrundlage verwendet. Für den Hauptteil der Studie werden die in Tabelle 1 dargestellten, 5-stündigen Starkwindereignisse betrachtet. Entsprechend ergeben sich für die definierte Heizperiode von Oktober bis Ende März 12 Windzyklen, die jeweils aus 9 Stunden Beladezeit und 13 Tagen (312 Stunden) Überbrückungsperiode bestehen. Ergänzende hierzu werden im Rahmen der Seitenstudie bzgl. Passivhäuser (siehe Abschnitt 5.3.6) auch Starkwindereignisse größer gleich 1 Stunde betrachtet (siehe Tabelle 2).

Tabelle 1:
Zusammenfassung der Kennwerte Wind-Wetterdaten auf Basis der Daten-
grundlage von 2003 - 2012 für die sechs betrachteten Standorte mit einer
Dauer des Starkwindereignisses größer gleich 5 Stunden.

Vergleich der Wetterstationen					
	Starkwind (Heizperiode 1.10 - 31.3)		Dauer zwischen 2 Starkwind mit $\geq 5h$ (Heizperiode)		
	Mittelwert [h]	95.Quantil [h]	Max [Tage]	Mittelwert [Tage]	95.Quantil [Tage]
Cuxhaven	7,8	32	27,8	3,3	10,7
Emden	5,71	20	36,8	4,5	16
Fehmarn	10	42	23,4	5,4	7
Norderney	8,4	35	30,5	3,1	10
Schleswig	5,55	21	46,9	6,8	26,9
UFS Deutsche Bucht	17,5	72,5	32,9	2,3	6
Mittelwert	9,2	37,1	33,1	4,2	12,8

Tabelle 2:
Zusammenfassung der Kennwerte Wind-Wetterdaten auf Basis der Daten-
grundlage von 2003 - 2012 für die sechs betrachteten Standorte mit einer
Dauer des Starkwindereignisses größer gleich 1 Stunde.

Vergleich der Wetterstationen					
	Starkwind (Heizperiode 1.10 - 31.3)		Dauer zwischen 2 Starkwind mit $\geq 1h$ (Heizperiode)		
	Mittelwert [h]	95.Quantil [h]	Max [Tage]	Mittelwert [Tage]	95.Quantil [Tage]
Cuxhaven	7,8	32,0	15,2	1,4	5,2
Emden	5,71	20	22,83	1,72	7,45
Fehmarn	10	42	16,5	1,19	4,2
Norderney	8,4	35	19,7	1,3	4,9
Schleswig	5,55	21	38,9	2,6	12,9
UFS Deutsche Bucht	17,5	72,5	32,9	1,25	4,29
Mittelwert	9,2	37,1	24,3	1,6	6,5

3.2 Festlegung der Typ-Gebäude

Für die Ermittlung des Potentials zur Nutzung und Speicherung von Windenergie zu Heizzwecken in Gebäuden werden zunächst repräsentative Typgebäude festgelegt, an denen die möglichen Technologien und Konzepte rechnerisch bewertet werden. Im Einzelnen werden der Studie folgende Typgebäude zugrunde gelegt:

- Einfamilienhaus: Neubau und Sanierung
- Bürogebäude: Neubau und Sanierung

Dazu werden im ersten Schritt der gesamtdeutsche und der bayrische Gebäudebestand analysiert um signifikante Kenngrößen wie z.B. die mittlere Gebäudedegröße zu ermitteln. Danach werden dazu passende realisierte Gebäude, zu denen alle benötigten geometrischen Kennwerte vorliegen, als Typgebäude festgelegt. Im letzten Schritt wird dann die Gebäudehüllqualität (U-Werte), die Hüllflächenaufbauten (Materialien und Stärken) und weitere benötigte Kenndaten für die Berechnungen bestimmt.

3.2.1 Analyse Gebäudebestand

Für die Analyse des Gebäudebestands werden folgende Gebäudestatistiken zusammengestellt und untersucht:

- Wohngebäudebestand in Bayern 2013, (Quelle: Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung [13])
- Wohngebäudebestand in Deutschland 2013, (Quelle: Destatis [14])
- Anzahl Wohngebäude nach Baujahren (Jahrzehnten), (Quelle: Ergebnis des Zensus 2011 zum Berichtszeitpunkt 9. Mai 2011, Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2014 [15])
- Errichtung neuer Bürogebäude in Bayern 2014, (Quelle: Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung [16])
- Errichtung neuer Bürogebäude in Deutschland 2012, (Quelle Destatis [17])

Wohngebäude

Die Ergebnisse sind beispielhaft für den Wohngebäudebestand in Bayern in Tabelle 3 für das Jahr 2013 dargestellt. Der Wohngebäudebestand in Bayern wird von Einfamilienhäusern dominiert (67 % Gebäude; 33 % Wohnungen).

Tabelle 3:
Wohngebäudebestand in Bayern 2013. (Quelle: Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung [13]).

Gebäudetyp	Gebäude	Wohnungen	Wohnfläche [1.000 m ²]	Wohnungen/Gebäude	Wohnfläche/Gebäude [m ²]	Wohnfläche/Wohnung [m ²]	Anteil Gebäude [%]	Anteil Wohnungen [%]	Anteil Wohnfläche [%]
Insgesamt	2.948.790	5.936.414	576.446,5	2,01	195,5	97,1	100,0	100,00	100,00
1 Wohnung	1.984.912		267.630,2	1,00	134,8		67,3	33,44	46,43
2 Wohnungen	548.547	1.097.094	109.779,7	2,00	200,1	100,1	18,6	18,48	19,04
ab 3 Wohnungen	412.488	2.775.339	196.033,4	6,73	475,2	70,6	14,0	46,75	34,01
Wohnheime	2.843	79.069	3.003,3	27,81	1.056,4	38,0	0,1	1,33	0,52

Daher wird für die Windheizungsstudie ein Einfamilienhaus als Repräsentant für den Wohnungsbau ausgewählt. Hierzu wird die Tabelle 4 in Einfamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser verdichtet. Die Wohngebäude mit einer und zwei Wohnungen werden den Einfamilienhäusern zugeordnet, unter der Annahme, dass viele der Gebäude mit zwei Wohneinheiten Einfamilienhäuser mit kleiner Einliegerwohnung sind, wie sie früher aus steuerrechtlichen Überlegungen vielfach umgesetzt wurden. Die Wohngebäude ab 3 Wohnungen werden den Mehrfamilienhäusern zugeordnet. Dadurch steigt die Dominanz dieses Gebäudetyps auf 86 % bei der Gebäudeanzahl und 52 % bei der Wohnungsanzahl.

Tabelle 4:
Aufteilung des bayerischen Wohngebäudebestands in Ein- und Mehrfamilienhäuser.

Gebäudetyp	Gebäude	Wohnungen	Wohnfläche [1.000 m ²]	Wohnungen/Gebäude	Wohnfläche/Gebäude [m ²]	Wohnfläche/Wohnung [m ²]	Anteil Gebäude [%]	Anteil Wohnungen [%]	Anteil Wohnfläche [%]
Insgesamt	2.948.790	5.936.414	576.446,5	2,01	195,5	97,1	100,0	100,00	100,00
Einfamilienhäuser	2.533.459	3.082.006	377.409,9	1,22	149,0	122,5	85,9	51,92	65,47
Mehrfamilienhäuser	412.488	2.775.339	196.033,4	6,73	475,2	70,6	14,0	46,75	34,01
Wohnheime	2.843	79.069	3.003,3	27,81	1.056,4	38,0	0,1	1,33	0,52

Die mittlere Wohnfläche von bayerischen Einfamilienhäusern beträgt hiernach 149 m². Zusätzlich wird überprüft, ob die Mittelwerte aus der bayrischen Statistik von den entsprechenden Kennzahlen für Gesamtdeutschland abweichen. Wenn möglich sollen aus den Berechnungen auch Schlüsse für das Gebäudeensemble in Gesamtdeutschland gezogen werden können. In Tabelle 5 werden

hierzu die statistischen Gebäudedaten von Deutschland in analoger Weise Ein- und Mehrfamilienhäusern zugeordnet.

Tabelle 5:
Aufteilung des deutschen Wohngebäudebestands in Ein- und Mehrfamilienhäuser.

Gebäudetyp	Gebäude	Wohnungen	Wohnfläche [1.000 m ²]	Wohnungen/ Gebäude	Wohnfläche/ Gebäude [m ²]	Wohnfläche/ Wohnung [m ²]	Anteil Gebäude [%]	Anteil Wohnungen [%]	Anteil Wohnfläche [%]
Insgesamt	18.521.263	39.612.188	3.620.039	2,14	195,5	91,4	100,00	100,00	100,00
Einfamilienhäuser	15.380.608	18.452.231	2.164.467	1,20	140,7	117,3	83,04	46,58	59,79
Mehrfamilienhäuser	3.120.696	20.743.263	1.436.835	6,65	460,4	69,3	16,85	52,37	39,69
Wohnheime	19.959	416.694	18.736	20,88	938,7	45,0	0,11	1,05	0,52

Die mittlere Wohnfläche eines deutschen Einfamilienhauses beträgt 140,7 m² und ist damit nur geringfügig abweichend von der mittleren Wohnfläche eines bayerischen Wohngebäudes (149 m²). Auch der Anteil der Einfamilienhäuser an den gesamten Wohngebäuden liegt in einem ähnlichen Bereich: 52 % in Bayern und 47 % in Deutschland. Eine Verallgemeinerung der Studienergebnisse auf mittlere deutsche Verhältnisse ist daher zulässig.

Hinsichtlich der Bewertung der energetischen Qualität der Gebäudesubstanz, ergibt der Zensus 2011 der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder die im Bild 6 dargestellte Verteilung der Altersklassen beim Bau von Wohngebäuden in Bayern:

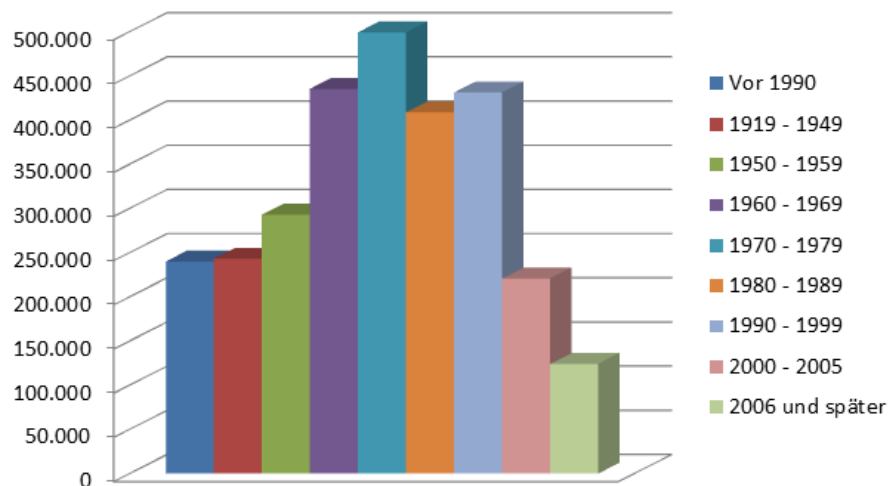


Bild 6:
Baujahrsklassen von Wohngebäuden in Bayern. Quelle: Ergebnis des Zensus 2011 zum Berichtszeitpunkt 9. Mai 2011, Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2014 [15]).

Die meisten Wohngebäude wurden in den Jahrzehnten zwischen 1960 und 1999 gebaut mit einem Maximum zwischen 1970 und 1979. Das energetische Niveau des Gebäudebestandes entspricht im Mittel somit dem der ersten Wärmeschutzverordnung, mit einem Primärenergiebedarf von Einfamilienhäusern von ca. 250 kWh/m²a. Die energetische Gebäudesanierungsrate in Bayern liegt gemäß [18] mit 0,8 %/Jahr unter dem Mittelwert von Deutschland gemäß [19] mit 0,9 – 1,3 %/Jahr.

Nichtwohngebäude

Als Repräsentant für Nichtwohngebäude werden in der Studie Büro- und Verwaltungsgebäude herangezogen. Bei den Büro- und Verwaltungsgebäuden ergeben sich die in der Tabelle 6 zusammengestellten statistische Kenngrößen für Neubauten in Bayern 2014 und Deutschland 2012:

Tabelle 6:
Errichtung neuer Bürogebäude in Bayern 2014 [20].

Büro- und Verwaltungsneubauten	Gebäude	Rauminhalt [1.000 m ³]	Nutzfläche [1.000 m ²]	Veranschlagte Kosten [1.000 €]	Rauminhalt/Gebäude [m ³]	Nutzfläche/Gebäude [m ²]
Bayern	336	2.128	387,4	661.920	6.333	1.153
Deutschland	1.686	10.874	2.022,8	2.873.728	6.449	1.199

Auch bei den Bürogebäuden ergeben sich somit ähnliche Kennwerte für bayerische und deutsche Gebäude. Die mittleren Nutzflächen je Gebäude betragen 1.153 m² (Bayern) und 1.199 m² (Deutschland). Eine Aussage über die Baualtersklassen und Sanierungsraten des Nichtwohngebäudebestandes lässt sich aus dem zur Verfügung stehenden statistischen Datenmaterial nicht herleiten.

3.2.2 Gewählte Typgebäude

Aus dem am IBP vorliegenden umfangreichen Datenpool von realisierten Gebäuden wird für jede Kategorie das Gebäude ausgewählt, welches den ermittelten Kennwerten am nächsten kommt.

Wohngebäude

Als repräsentatives Wohngebäude für den Gebäudebestand wird das Versuchsgebäude (Zwillingsgebäude) des Fraunhofer IBP, gemäß Bild 7, verwendet. Dieses Gebäude verfügt über eine Energie-Bezugsfläche gemäß EnEV [21] von 160 m².

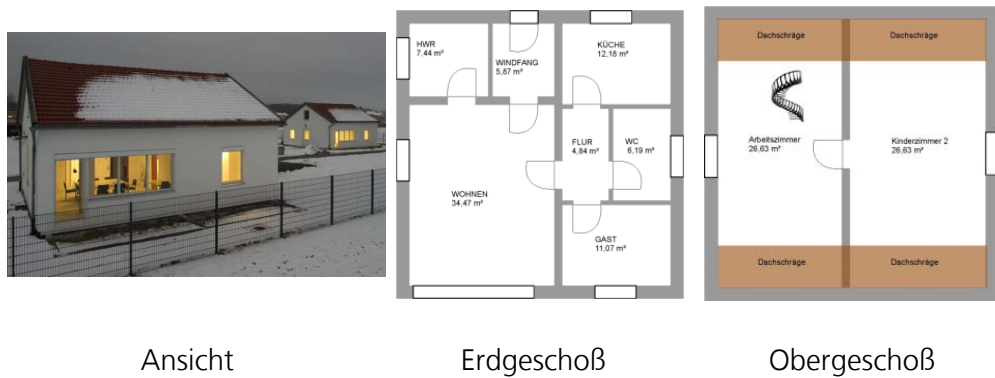


Bild 7:
Ansicht und Grundrisse des Versuchsgebäudes des Fraunhofer IBP.

Das Gebäude ist zweigeschossig, weist eine Wohnfläche von 135 m² auf und bildet damit gut den Bundesdurchschnitt ab.

Ergänzend zu dem „Durchschnittsgebäude“ wird für die Bewertung der Neubauführung das in der ersten Projektphase verwendete Wohnhaus „Leitershofen“ zugrunde gelegt. Das Gebäude ist mit einer Wohnfläche von ca. 250 m² zuzüglich einer „warmen“ Kellerfläche von ca. 90 m² zwar überdurchschnittlich groß, bildet so jedoch einen gehobenen Baustandard ab und ist aufgrund der in der Vorstudie gewonnenen Erfahrungen gut zur Einstufung der erzeugten Simulationsergebnisse geeignet. Das Gebäude ist in Bild 8 mit Ansicht und Erdgeschoss-Grundriss dargestellt. Dieses Gebäude verfügt über eine Energie-Bezugsfläche gemäß EnEV [21] von 434 m².

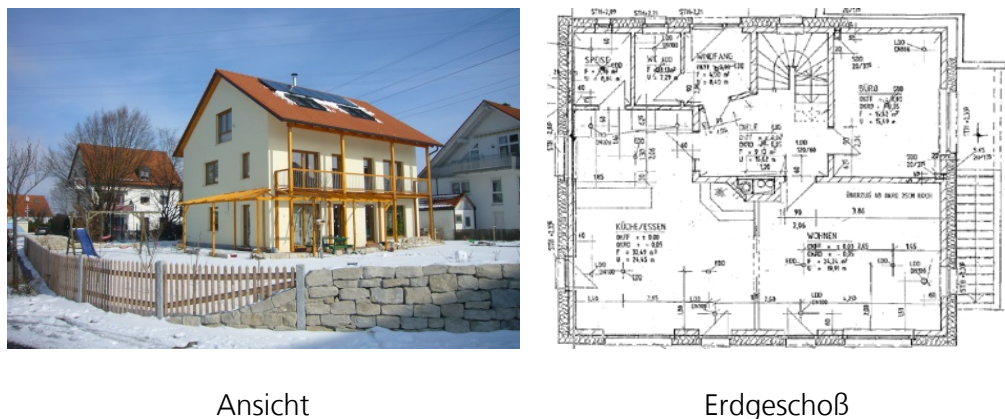


Bild 8:
Ansicht und Erdgeschoss-Grundrisse des Wohngebäudes Leitershofen.

Nichtwohngebäude

Als Büro- und Verwaltungsgebäude wird das ZUB-Modell-Bürogebäude aus dem Typgebäudekatalog des Zentrums für umweltbewusstes Bauen [21] für die Untersuchungen der Studie zugrunde gelegt. In Bild 9 sind die Ansicht des Modellgebäudes, sowie die Zonierung des Gebäudes dargestellt. Das Gebäude

weist einen Rauminhalt von 7.473 m^3 auf und repräsentiert damit gut die mittleren Kennwerte von neu errichteten Büro- und Verwaltungsbauten. Dieses Gebäude verfügt über eine Nettogrundfläche von 1692 m^2 .

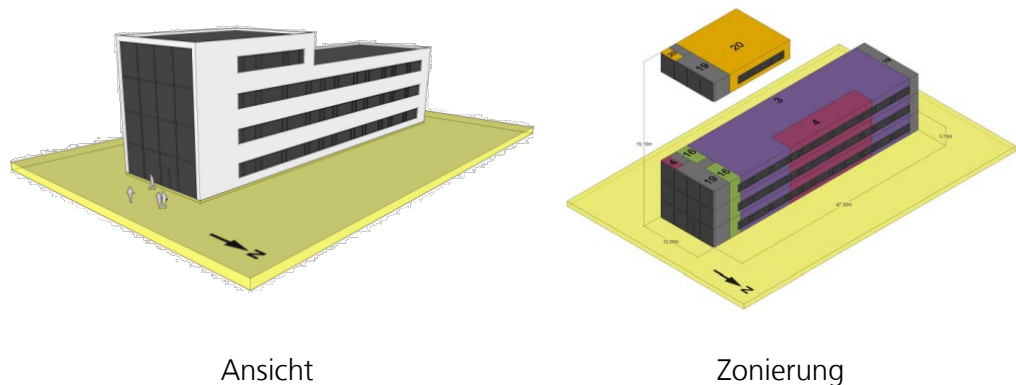


Bild 9:
Ansicht und Zonierung des ZUB Modell-Bürogebäudes [21].

3.2.3 Energetische Standards

Aus den Untersuchungen der Vorphase und abschätzenden Betrachtungen zu den erschließbaren Windzyklen zeichnet sich ab, dass ein niedriger Energiebedarf der Gebäude substanziell für den sicheren Betrieb der Systemtechnik Windheizung ist. Daher wird für die Untersuchungen die höchstmögliche Förderstufe der KfW Bank für neu errichtete oder sanierte Gebäude als Randbedingung zugrunde gelegt. Das bedeutet für Wohnneubauten ein Wärmeschutzniveau entsprechend der Anforderungen des KfW 40 Effizienzhauses nämlich 55% des Höchstwertes des spezifischen Transmissionswärmeverlustes $H'T_{REF}$ und für sanierte Wohngebäude ein Wärmeschutzniveau des KfW 55 Effizienzhauses d.h. 70% des Höchstwertes des spezifischen Transmissionswärmeverlustes $H'T_{REF}$.

Zur Bewertung der wirtschaftlichen Effizienz wird die jeweilige Untersuchungsvariante einer Gebäudeausführung mit den Mindestanforderungen der zum Zeitpunkt der Untersuchungen gültigen Energieeinsparverordnung (2014) gegenüber gestellt. Dies entspricht für Neubauten das Ausführungsniveau des Referenzgebäudes und für sanierte Bestandsgebäude ein Wärmeschutzniveau das max. 140% über dem des Referenzgebäudes liegt.

3.2.4 Zugrunde gelegte energetische Bauteilqualitäten

Einfamilienhaus Neubau

Das der Untersuchung zugrundeliegende Wohnhaus „Leitershofen“ weist zur Erreichung des Mindestniveaus der Energieeinsparverordnung 2014 und zum Erreichen des KfW 40 Effizienzhaus Niveaus die in Tabelle 7 dokumentierten U-Werte für die Außenbauteile auf. Beide Niveaus sind mit marktgängigen Pro-

dukten realisierbar, wobei die Ausführungen im KfW 40 Effizienzhaus Niveau entsprechend hohe Produktqualitäten erfordert.

Tabelle 7:
U-Werte des betrachteten Einfamilienhauses (Neubau).

Baustandard	Bauteil	U-Wert [W/m ² K]
Neubau EnEV Niveau (H'T _{REF} 100 %)	Dach	0,20 W/m ² K
	Außenwand	0,28 W/m ² K
	Fenster	1,4 W/m ² K (g = 0,6; τ = 0,78)
	Bodenplatte/Wand gegen Erdreich	0,35 W/m ² K
	Wand/Decke ge- gen unbeheizt	0,35 W/m ² K
Neubau KfW 40 Niveau (H'T _{REF} 55 %)	Dach	0,08 W/m ² K
	Außenwand	0,1 W/m ² K
	Fenster	0,85 W/m ² K (g = 0,5; τ = 0,7)
	Bodenplatte/Wand gegen Erdreich	0,2 W/m ² K
	Wand/Decke ge- gen unbeheizt	0,2 W/m ² K

Einfamilienhaus Sanierung

Das der Untersuchung zugrundeliegende IBP-Versuchsgebäude weist zur Erreichung des Mindestniveaus für Sanierungen der Energieeinsparverordnung 2014 und zum Erreichen des KfW 55 Effizienzhaus Niveaus die in Tabelle 8 dokumentierten U-Werte für die Außenbauteile auf. Beide Niveaus sind mit markt-gängigen Produkten realisierbar, wobei die Ausführungen im KfW 55 Effizienzhaus Niveau entsprechend hohe Produktqualitäten erfordert.

Tabelle 8:
U-Werte des betrachteten Einfamilienhauses (Sanierung).

Baustandard	Bauteil	U-Wert [W/m ² K]
Sanierung EnEV Niveau (H'T_{REF} 140 %)	Dach	0,35 W/m ² K
	Außenwand	0,45 W/m ² K
	Fenster	1,5 W/m ² K (g = 0,65; τ = 0,8)
	Bodenplatte/Wand gegen Erdreich	0,6 W/m ² K
	Wand/Decke ge- gen unbeheizt	0,45 W/m ² K
Sanierung KfW 55 Niveau (H'T_{REF} 70 %)	Dach	0,1 W/m ² K
	Außenwand	0,18 W/m ² K
	Fenster	1,0 W/m ² K (g = 0,55; τ = 0,75)
	Bodenplatte/Wand gegen Erdreich	0,2 W/m ² K
	Wand/Decke ge- gen unbeheizt	0,3 W/m ² K

Büro- und Verwaltungsgebäude

Das der Untersuchung zugrundeliegende ZUB-Modell-Bürogebäude weist zur Erreichung des Mindestniveaus der Energieeinsparverordnung 2014 für Neubauten und für Sanierungen und zum Erreichen eines dem KfW 40 bzw. 55 Effizienzhaus Niveaus äquivalenten Wärmeschutzniveaus, die in Tabelle 9 dokumentierten U-Werte für die Außenbauteile auf. Beide Niveaus sind mit markt-gängigen Produkten realisierbar, wobei die Ausführungen im KfW 40/55 Effizienzhaus Niveau entsprechend hohe Produktqualitäten erfordert, die in diesem Gebäudebereich eher selten realisiert werden. Daher ist zu erwarten, dass bei Umsetzung der Windheizungstechnologie im Bereich der Nichtwohngebäude eher größere Vorbehalte von potentiellen Investoren geäußert werden. Hier gilt es daher erhöhte Aufwendungen in entsprechende Informationskampagnen einzuplanen.

Tabelle 9:
U-Werte des betrachteten Bürogebäudes (Neubau und Sanierung).

Baustandard	Bauteil	U-Wert [W/m ² K]
Neubau EnEV Niveau (H'T _{REF} 100 %)	Dach	0,20 W/m ² K
	Außenwand	0,28 W/m ² K
	Fenster	1,4 W/m ² K (g = 0,6; τ = 0,78)
	Bodenplatte/Wand gegen Erdreich	0,35 W/m ² K
	Wand/Decke ge- gen unbeheizt	0,35 W/m ² K
Sanierung EnEV Niveau (H'T _{REF} 140 %)	Dach	0,45 W/m ² K
	Außenwand	0,5 W/m ² K
	Fenster	1,5 W/m ² K (g = 0,65; τ = 0,8)
	Bodenplatte/Wand gegen Erdreich	0,6 W/m ² K
	Wand/Decke ge- gen unbeheizt	0,45 W/m ² K
Neubau KfW 40 Niveau (H'T _{REF} 55 %)	Dach	0,08 W/m ² K
	Außenwand	0,1 W/m ² K
	Fenster	0,8 W/m ² K (g = 0,48; τ = 0,65)
	Bodenplatte/Wand gegen Erdreich	0,1 W/m ² K
	Wand/Decke ge- gen unbeheizt	0,2 W/m ² K
Sanierung KfW 55 Niveau (H'T _{REF} 70 %)	Dach	0,08 W/m ² K
	Außenwand	0,2 W/m ² K
	Fenster	0,9 W/m ² K (g = 0,52; τ = 0,72)
	Bodenplatte/Wand gegen Erdreich	0,2 W/m ² K
	Wand/Decke ge- gen unbeheizt	0,3 W/m ² K

Zur Berücksichtigung der Wärmebrücken werden die U-Werte der opaken Bauteile um den pauschalen Wärmebrückenzuschlag von 0,05 W/(m²K) erhöht [22]. Im Rahmen dieser Studie werden mehrere Bauweisen in Hinblick auf die verwendeten Materialien untersucht. Dies sind Ziegel-, Beton- und Holzbauweise. Baupraktisch ist es nicht üblich jedes Bauteil einer Bauweise aus dem gleichen Material zu erstellen. So wird z.B. auch bei einem Holzgebäude die Kellerwand oder die Bodenplatte typischerweise aus Beton erstellt. Aus diesem Grund enthalten Gebäude einer Bauweise auch Bauteile aus anderen Materialien. Die entsprechende Zuordnung der einzelnen Bauteile zu den drei Bauweisen findet sich in Tabelle 10. Beim sanierten Bürogebäude wird keine Holzbauausführung betrachtet. Der Grund hierfür ist, dass die Musterbauordnung (MBO) erst seit wenigen Jahren die Ausführung größerer Gebäude aus Holz zu-

lässt. Somit gibt es für den Sanierungsfall eines hölzernen Bürogebäudes derzeit nur eine sehr kleine Anzahl an entsprechenden Fällen. Basierend auf dieser Aufteilung und den U-Werten aus Tabelle 7 bis Tabelle 9 werden für die Bauteile der einzelnen Materialien typische Bauteilaufbauten entwickelt. Diese Aufbauten sind in Anhang 1 dokumentiert.

Tabelle 10:
Aufteilung der Konstruktionsmaterialien der einzelnen Bauteile nach den 3 Bauweisen.

Bauteil	Einfamilienhaus								Bürobau							
	Neubau (neu)				Sanierung (san)				Neubau (neu)				Sanierung (san)			
	Referenz (Ref)	Ziegelbau (Z)	Betonbau (B)	Holzbau (H)	Referenz (Ref)	Ziegelbau (Z)	Betonbau (B)	Holzbau (H)	Referenz (Ref)	Ziegelbau (Z)	Betonbau (B)	Holzbau (H)	Referenz (Ref)	Ziegelbau (Z)	Betonbau (B)	Holzbau (H)
Außenwand	Z	Z	B	H	Z	Z	B	H	B	Z	B	H	B	Z	B	
Dach	H	H			H	H			B	B			H	B	B	
Kellerwand	B	B			B	B			-							
Bodenplatte	B	B			B	B			B	B			B	B		
Decken	B	B	B	H	B	B	B	H	B	B	B	H	B	B	B	
Innenwände	Z	Z	B	H	Z	Z	B	H	H	Z	B	H	H	Z	B	
Innenwände Flur	-								B	Z	B	H	B	Z	B	
		Z	Ziegel													
		B	Beton													
		H	Holz / Leichtbau / GKB (Immer Ständer- bzw. Fehlbodenbauweise; nie Brettstapel o.ä.)													

3.2.5 Zugrunde gelegte Luftwechselraten

Die gebäudespezifischen Luftwechselraten in dieser Simulationsstudie werden nach DIN V 18599 [3] entsprechend Tabelle 11 angesetzt. Gemäß den Mindestanforderungen an ein Passivhaus für die Luftdichtheit der Gebäudehülle wird ein n_{50} -Wert von 0,6 1/h angesetzt. Zusammen mit dem Abschirmungskoeffizienten von 0,07, ergibt sich ein durchschnittlicher Infiltrationsluftwechsel von 0,042 1/h. Für das Einfamilienhaus werden sowohl der Luftwechsel mit der Außenluft, der Luftaustausch zwischen den einzelnen Räumen und der Luftwechsel der mechanischen Lüftungsanlage mit Hilfe eines Druckknotennetzwerks modelliert. Die Gebäudedurchströmung wird somit abhängig von den Strömungswiderständen der Gebäudebauteile, angetrieben durch Winddruck auf die Fassade, Temperaturdifferenzen und der mechanischen Lüftung, simuliert. Dies ist erforderlich, da nicht alle Räume in gleichem Maße mit Zu- und Abluft versorgt werden und sich daraus ein bestimmter, interzonaler Luftaustausch ergibt. Die Aufteilung nach Zu- und Ablufträumen ist in Bild 10 und Bild 11 dargestellt. Die Luftundichtheiten in der Gebäudehülle werden so skaliert, dass sich während der Heizperiode ein mittlerer Außenluftwechsel entsprechend der Summe aus Infiltration und nutzerbedingtem Fensterluftwechsel ergibt. Zusätzlich wird der durch die mechanische Lüftungsanlage geförderte Luftstrom als fester Volumenstrom berücksichtigt. Bei den Einfamilienhäusern wird die Lüftungsanlage permanent betrieben. Das System verfügt über einen konstanten Wärmerückgewinnungsgrad von 90 %.

Im Typbüro wird sowohl der Infiltrations- und Fensterluftwechsel als auch der Luftstrom der Lüftungsanlage, ggf. über die Wärmerückgewinnung, als fester Wert für jede Gebäudezone modelliert. Im Bürofall ist die Nutzung eines Druckknotennetzwerks nicht erforderlich, da hier die Zu- und Abluftmengen aller einzelnen Bilanzzonen ausbalanciert sind. Im Bürofall wird die Lüftungsanlage nur während der Zeit von 5 – 18 Uhr betrieben, wie in Bild 12 zu erkennen ist. Die Anlage verfügt über einen konstanten Wärmerückgewinnungsgrad von 80 %.

Tabelle 11:
Angesetzte Luftwechselraten nach DIN V 18599.

	Luftwechsel [1/h]			
	Gesamt	Infiltration	Fenster	mechanisch
Einfamilienhaus	0,5	0,042	0,1	0,358
Büro	1,43	0,042	0,1	1,288

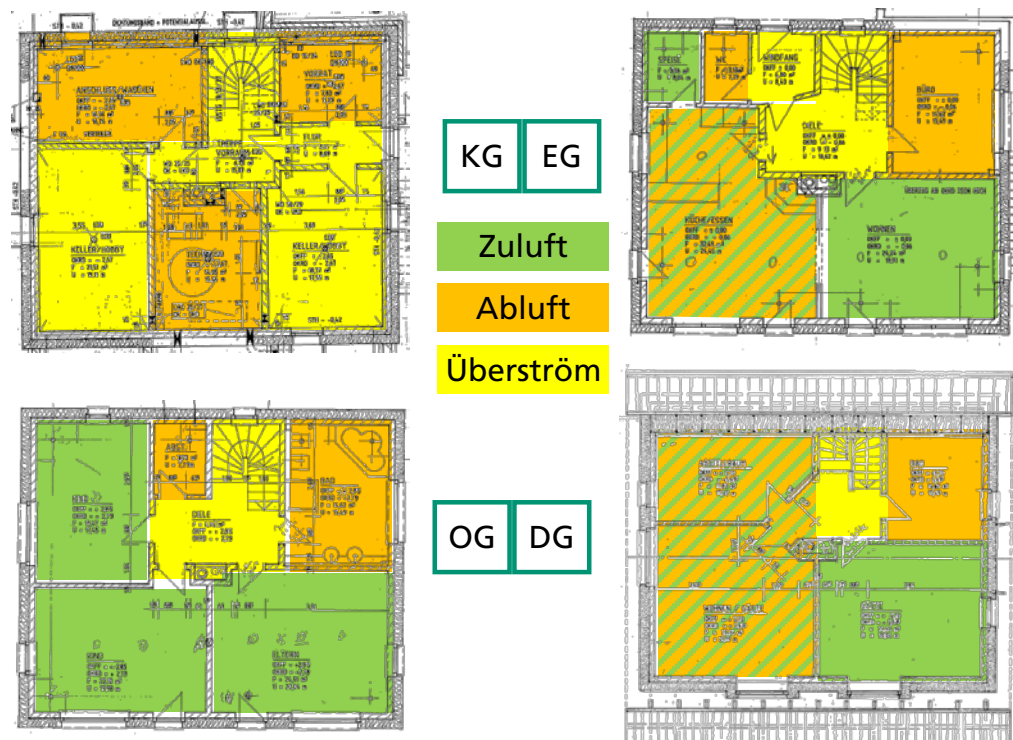


Bild 10:
Aufteilung der Zu- und Ablufträume für Einfamilienhaus Neubau.

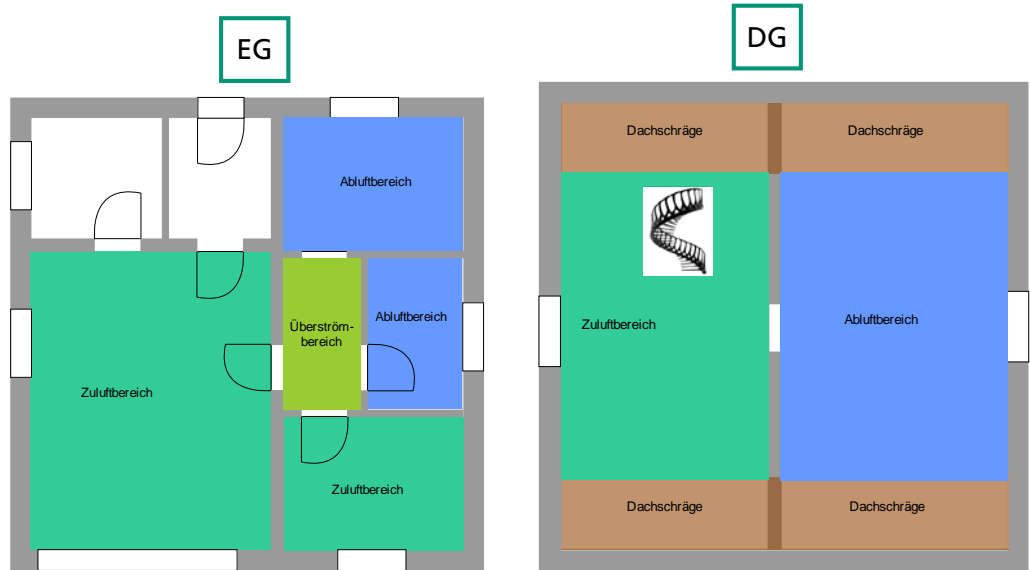


Bild 11:
Aufteilung der Zu- und Ablufträume für den Sanierungsfall des Einfamilienhauses.

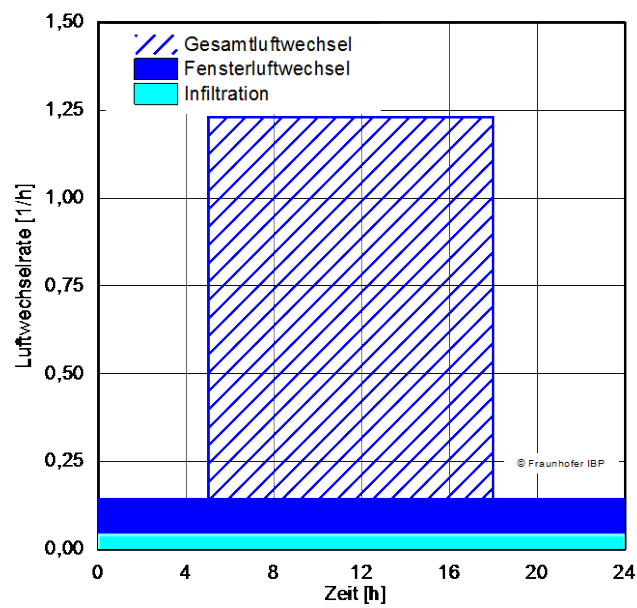


Bild 12:
Darstellung des Luftwechsels im Typbüro.

Nutzung

Die internen Wärmequellen, die aus der Wärmeabgabe der Bewohner bzw. Nutzern und der Geräte bestehen, werden für die Einfamilienhäuser als konstant über 24 Stunden eines Tages verteilt angesetzt. Die Höhe dieser internen Wärmequellen nach DIN V 18599 beträgt $45 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{d})$, bzw. $1,88 \text{ W}/\text{m}^2$. Diese Leistung wird zur Berücksichtigung der Verteilverluste der Brauchwarmwasser-Verteilung beim Neubaufall um $0,54 \text{ W}/\text{m}^2$ und beim Sanierungsfall um $0,42 \text{ W}/\text{m}^2$ erhöht. Für die Büroräume werden die internen Wärmegegewinne entsprechend Bild 13 auf die Nutzungszeit (7 – 18 Uhr) verteilt. Die internen Wärmequellen der restlichen Nutzungszonen des Bürogebäudes werden entsprechend Tabelle 12 als konstant über die Nutzungszeit verteilt angesetzt. Für den Bürofall muss zusätzlich die Wärmeabgabe des Kunstlichts berücksichtigt werden. Die anzusetzende Beleuchtungsleistung wird nach DIN V 18599, wie in Tabelle 13 dargestellt, ermittelt. Durch die Multiplikation der außen vorhandenen Globalstrahlungsleistung mit dem Tageslichtquotienten wird abgeschätzt, ob in der jeweiligen Zone die minimale erforderliche Beleuchtungsstärke (E_m) durch die Tageslichtversorgung gewährleistet ist. Ist die nicht der Fall wird die Leistung der Beleuchtung den internen Wärmequellen hinzugerechnet. Des Weiteren ist beim Bürogebäude die an die Raumluft abgegebene Wärme der Lüftungsanlage als innere Wärmequelle während den Lüfter-Laufzeiten angesetzt.

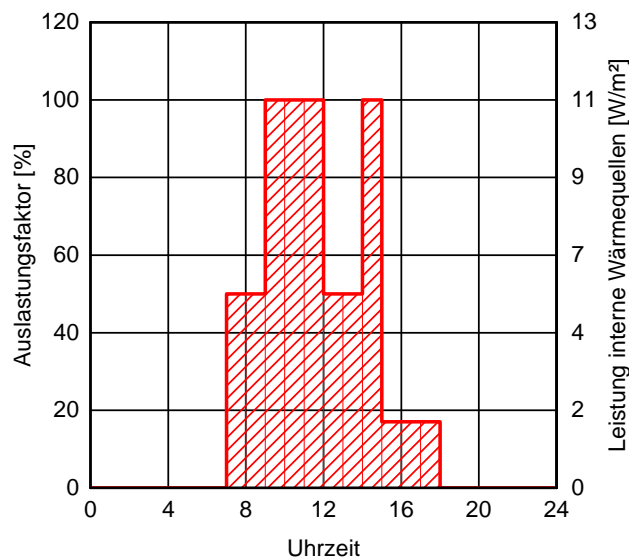


Bild 13:

Zeitliche Verteilung der internen Wärmegegewinne aus Personen und Geräten für die Büroräume.

Tabelle 12:
Interne Wärmequellen aus Personen und Geräten für die Räume des Bürofalls.

Zone	Während der Nutzungszeit (11 h/d)	
	Personen und Geräte [W/m²]	Kunstlicht [W/m²]
Büro	siehe Profil	nach Bedarf; 10,7
Besprechung	9,5	nach Bedarf; 10,7
Treppe	-	Während der Nutzung; 1,3
Flur	-	Während der Nutzung; 1,3
Sanitär	-	Während der Nutzung; 1,5
Archiv	-	Während der Nutzung; 0,3

Tabelle 13:
Elektrische Leistung der Beleuchtung für die einzelnen Zonen des Bürogebäudes mit unterschiedlicher Nutzung inklusive der zu Grunde liegenden Berechnungsparameter.

Zone	P	P_o	E_m	$p_{j,lx}$	k_a	k_l	k_R	F_t	C_A	$C_{prä,kon}$	$F_{l,KL,j}$
Büro	10,7	21,5	500	0,06	0,92	1	0,78	0,7	0,3	0,5	0,835
Besprechung	9,5	21,8	500	0,06	0,93	1	0,78	1	0,5	0,95	0,835
Sanitär	1,5	12,6	200	0,06	1	1	1,05	1	0,9	0,95	0,835
Verkehrsfläche	1,3	6,3	100	0,06	1	1	1,05	1	0,8	0,95	0,835
Archiv	0,3	4,3	100	0,06	1	1	0,71	1	0,98	0,95	0,835

P	Elektrische Leistung der Beleuchtung	[W/m ²]
P ₀	Installierte Beleuchtungsleistung	[W/m ²]
E _m	Wartungswert der Beleuchtungsstärke, (DIN V 18599-4, Tabelle 5)	[lx]
p _{J,lx}	Auf 1 lx bezogene spezifische Anschlussleistung direkt/indirekt, (DIN V 18599-4, Tabelle 5)	[W/(m ² lx)]
k _a	Minderungsfaktor Bereich Sehaufgabe, (DIN V 18599-10, Tabelle 5)	[-]
k _L	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Lampenart (Leuchtstofflampe Kompakt mit EVG) (18599-4, Tabelle 6, stabförmige Leuchtstofflampe)	[-]
k _R	Korrekturfaktor Einfluss Raumauslegung in Abhängigkeit des Raumindex, (18599-4, Tabelle 7)	[-]
F _t	Teilbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit für Beleuch- tung, (DIN V 18599-10, Tabelle 5)	[-]
C _A	Relative Abwesenheit, (DIN V 18599-10, Tabelle 5)	[-]
C _{prä,kon}	Der Faktor zur Berücksichtigung der Konstantlichtkontrolle, (DIN V 18599-4, 5.4.6)	[-]
F _{I,KL,j}	Faktor zur Berücksichtigung der Effizienz der Präsenzkon- trolle, (DIN V 18599-4, Tabelle 26)	[-]

Die Energieaufwendungen für die Brauchwarmwasserbereitung werden für die Typbüros nicht betrachtet. Hier wird von einer dezentralen Bereitung ausgegangen, die durch das Windheizungskonzept nicht beeinflusst wird. Für die Einfamilienhäuser wird entsprechend DIN V 18599 eine Wärmeentnahme von 1,26 W/m² aus dem Versorgungssystem angesetzt. Diese Wärme wird lediglich dem Versorgungssystem entnommen, den Räumen aber nicht als interner Wärmegewinn zugeschlagen, da ein wesentlicher Teil dieser Wärme über das Abwasser verloren geht.

Zur Vermeidung von Überhitzung auf Grund solarer Einstrahlung, die bei Betrachtung des Winterhalbjahres ggf. in den Übergangszeit auftreten können, sind alle betrachteten Gebäude mit einem Sonnenschutzsystem ausgestattet. Für die Einfamilienhäuser wird ein außenliegender Rollladen (f_c-Wert = 0,3) angesetzt, der bei einer Überschreitung der maximal zulässigen Raumlufttemperatur aktiviert wird. Für das Büro wird ein innenliegender textiler Behang (f_c-Wert = 0,75) der bei einer Grenzbestrahlungsstärke, der Summe aus Direkt- und Diffusstrahlung außen am jeweiligen Fenster, von 150 W/m² für Nordfenster und 200 W/m² für Südfenster (gem. DIN 4108-2) aktiviert wird.

Die festgelegten Solltemperaturen der Räume beziehen sich jeweils auf die operative Raumtemperatur. Für die Einfamilienhäuser wird eine minimale Solltemperatur von 20 °C festgelegt, die während eines Starkwindereignisses auf bis zu maximal 25 °C angehoben wird. Das Schlafzimmer wird mit einer um 2 K reduzierten und das Bad mit einer um 2 K erhöhten Solltemperatur betrachtet. Für die Typbüros wird ein reduzierter zulässiger Temperaturkorridor von 21 °C (nach DIN V 18599) bis max. 24 °C betrachtet. Diese Temperaturgrenzen sind DIN EN 15251 [23] entnommen.

3.3 Technologieübersicht

Zur Bewertung der Nutzbarkeit marktgängiger Komponenten klassischer Wärmeversorgungs-systeme für die Windheizungsansätze, sind die in Deutschland typisch verwendeten Technologien der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) in einer Matrix getrennt nach der Versorgungskette (Erzeuger, Speicher und Übergabesysteme) zusammengestellt. Dabei sind 56 Wärmeerzeugervarianten, 40 mögliche Speicherkonfigurationen und 70 potentielle Übergabekonfigurationen analysiert und hinsichtlich Windheizungsrelevanz identifiziert worden. Die Matrix der analysierten potentiellen Technologien ist im Anhang 2 zusammengestellt. Hierin ist auch die Bewertung deren grundsätzlichen Eignung für Windheizungskonzepte vorgenommen. Die weitergehende Bewertung ausgewählter Technologien erfolgt im Rahmen der Grob- und Detailanalyse in den folgenden Kapiteln.

3.4 Simulationsumgebung

Um das energetische Gebäudeverhalten bei intermittierendem Gebäudebetrieb, sowie die thermische Behaglichkeit infolge Oberflächen und Bauteiltemperaturen abbilden zu können, ist eine dynamische Gebäudesimulation notwendig. Hierdurch kann unter anderem der Einfluss von thermischen Speichermassen bei zeitabhängigen Heiz- und Überbrückungszyklen (Be- und Entladen) berücksichtigt werden. Für die Durchführung dieser Studie, zur thermischen Simulation, wird die instationäre Gebäudesimulationssoftware WUFI® Plus [24] in der internen Testversion 3.0.3.24 angewendet.

Grundlage der Simulation ist die Raumlufthtemperatur und die Bilanz der Wärmeströme im Raum, bzw. in einer Zone. Die Bilanz berücksichtigt Energieströme über die Raumumschließungsflächen (opake und transparente Gebäudebauteile), über den Luftaustausch durch natürliche und mechanisch angetriebene Lüftung, sowie innere Wärmequellen und -senken und die Anlagentechnik. Die Eingabe der Gebäudegeometrie erfolgt dreidimensional. Über dieses Gebäudemodell sind sämtliche Flächen der Gebäudebauteile, deren Ausrichtung und Typ (opak oder transparent) sowie deren Randbedingungen auf Außen- und Innenseite definiert. Auf der Außenseite von Außenbauteilen wird somit das Außenklima, inklusive Solarstrahlung angesetzt, auf der anderen Seite das simulierte Innenraumklima. Bei Innenbauteilen wird an den jeweiligen Oberflächen das dort vorherrschende Klima des entsprechenden Raumes berücksichtigt. Die mehrschichtigen Bauteilaufbauten werden entsprechend dem

Gebäudetyp und der Bauweise (siehe Abschnitt 3.3) definiert. Bei der Simulation wird das Temperaturfeld, bzw. der Temperaturverlauf im Bauteil und dessen Änderung berechnet [25]. Die Wärmeströme interagieren über die Oberflächen mit dem Raumklima.

Die über die Fenster eintreffende solare Strahlung erwärmt zu 10 % direkt die Raumluft, der Rest wird flächenproportional auf die angrenzenden Oberflächen einer Zone verteilt. Innere Wärmequellen werden als 50 % strahlend und 50 % konvektiv angenommen. Entsprechend erwärmen diese direkt die Raumluft, der Rest wird flächenproportional direkt auf die Oberflächen verteilt. Die Simulation erfolgt, auf Grund der Anwendung des Luftdurchströmungsmodells [26] und der detaillierten Anlagentechnik, im expliziten Rechenmodus. In diesem Fall wird das Raumklima nicht iterativ angepasst, bis die Wärmebilanz einer Zone ausgeglichen ist, sondern die Zeitschrittweite auf ein Minimum reduziert (im Normalfall 30 Sekunden) und das Raumklima entsprechend der Wärmebilanz für den nächsten Zeitschritt berechnet. Die Ergebnisausgabe zur Analyse erfolgt in Stunden-Zeitschritten.

Klimadatensatz

Für das Außenklima wird das Testreferenzjahr Version 2004 der Region 13 angesetzt (Bild 14 und Bild 15). Extreme Wetterbedingungen werden nicht betrachtet.

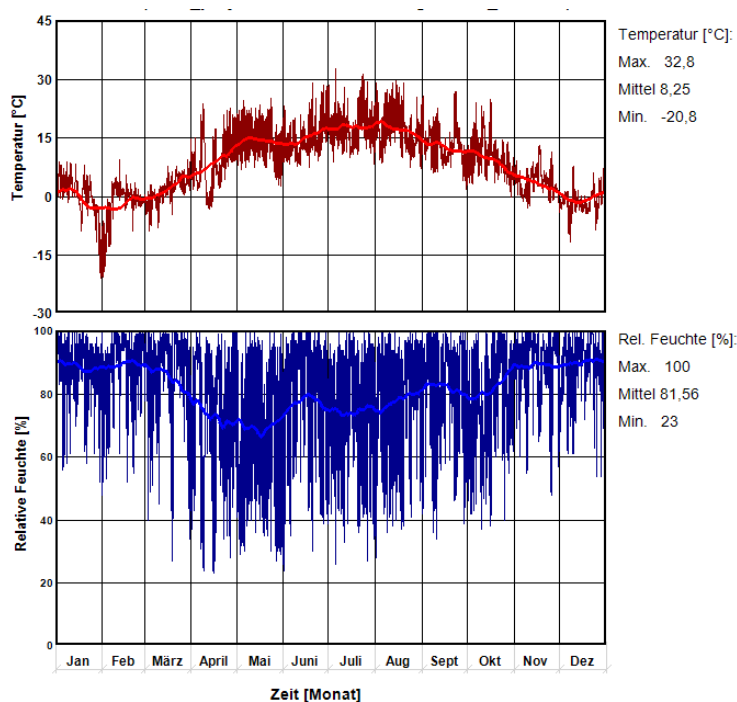


Bild 14:
Außenlufttemperatur und –feuchte Region 13 Testreferenzjahr Version 2004.

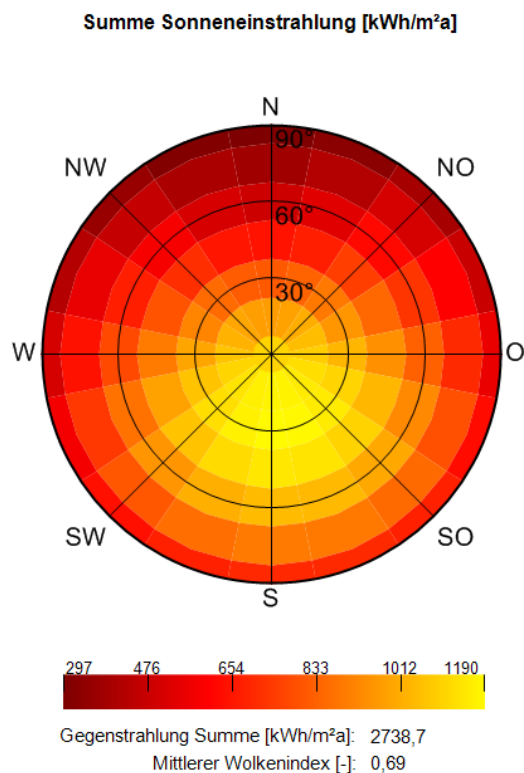


Bild 15:
Für das Testreferenzjahr Region 13 Version 2004 aus horizontaler Direkt- und Diffusstrahlung resultierender solarer Eintrag in Abhängigkeit von der Orientierung (Ausrichtung) und Neigung.

3.5 Anlagentechnik

Anlagentechnik in der Grobanalyse

Die Simulation der Basisfälle der Grobanalyse erfolgt mit idealer Anlagentechnik. Das heißt es steht immer die Energie für das Gebäude zur Verfügung, die notwendig ist um das Innenraumklima auf der gewünschten Solltemperatur zu halten. Im Vordergrund steht hierbei die Aussage zum Wärmebedarf des Gebäudes, während und zwischen den Starkwindereignissen.

Anlagentechnik in der Detailanalyse

Die Detailanalyse wird mit der dynamische Anlagentechnik-Simulation in WUFI Plus [27] durchgeführt. Modelle der einzelnen Anlagentechnik-Komponenten (Wärmeerzeuger, Warmwasserspeicher, Wärmeübergabesystem) bilden ein gesamtes Anlagentechnik-Konzept, bzw. Simulationsmodell, das während der Simulation Daten mit dem Gebäude, wie z.B. Operativtemperatur der Räume, Sollwert-Einstellungen, Außenklima und im Rückschluss z.B. die abgegebene Wärmeleistung an die Räume austauscht. Die Interaktion zwischen Gebäude und Anlagentechnik kann somit abgebildet und im Detail analysiert werden.

Folgend werden die technischen Konzepte der Anlagentechnik in der Detailanalyse dargestellt.

Referenztechnik

Die Wärmeerzeugung zur Simulation der Referenztechnik erfolgt durch einen Öl-Brennwertkessel der einen Warmwasserspeicher, ausgelegt nach der Größe der solarthermischen Anlage zur Brauchwarmwasserbereitung und Raumheizungsunterstützung, beheizt. Die Wärmeverteilung im Gebäude erfolgt über Radiator-Heizkörper.

Das verwendete Wärmeerzeugermodell zur Simulation der Referenztechnik ist eine Kombination aus einem physikalischen und einem empirischen Modell. Der empirische Teil des Modells beschreibt eine Wirkungsgradkennlinie. Der Wirkungsgrad ist abhängig von der Kesselauslastung und der Rücklaufemperatur. Der physikalische Teil berechnet die Leistungsbilanz des Kessels. Das Modell liefert die Wärmeabgabe des Kessels. Der Regler für den Heizkesselkreis erhält als Input die obere Speichertemperatur und eine Solltemperatur, eingestellt auf 65 °C, auf die der Speicher durch den Heizkessel beladen werden soll. Wird die Solltemperatur um maximal 5 K unterschritten, findet eine Beladung statt, bis die Solltemperatur im Speicher um 2 K überschritten wird. Eine minimale Beladezeit von 30 Minuten, sofern die maximale Speichertemperatur nicht überschritten wird, sowie eine minimale Verweilzeit, bzw. Ruhezeit zwischen zwei Beladevorgängen von ebenfalls 30 Minuten sind berücksichtigt.

Das Modell zur Simulation von thermischen Warmwasserspeichern verwendet Wärmeübertrager zur indirekten Be- und Entladung. Die Wärmeübertrager verfügen über einen konstanten Wärmeübergangskoeffizienten und sind in ihren Anschlusshöhen anpassbar. Das im Wärmeübertrager befindliche Medium hat konstante Eigenschaften und der Wärmeübertrager ist masselos und berücksichtigt somit keine Trägheit. Außerdem sind Anschlüsse zur direkten Be- und Entladung vorhanden. Im Speichermodell sind Temperaturfühler integriert. Es ist ein Schichtenspeicher mit 5 Temperaturschichten, welche in horizontaler Ebene isotherm sind. Die Modellierung des Speichers beinhaltet Wärmeströme zwischen benachbarten Schichten auf Grund von Massebewegungen, sowie auf Grund von Wärmeleitvorgängen im Fluid, entlang der Speicherwand und der Speichereinbauten.

Das Brauchwarmwasser wird ausschließlich beim Wohnungsbau berücksichtigt. Dort wird es über den Warmwasserspeicher indirekt über eine Frischwasserstation bereitgestellt. In den Speicher, über den Hausanschluss einfließend, wird eine Kaltwassertemperatur von 10 °C angenommen. Nach dem Erwärmen wird je nach erreichter Wassertemperatur über ein Dreiwege-Mischventil Kaltwasser zur Entnahme der eingestellten Zapfwassertemperatur (45 °C) beigemischt. Die Zapfwasser-Entnahmemenge wird jeweils nach Typgebäude (Neubau, Sanierung) berechnet und als zeitlich konstant angesetzt. Sie ergibt sich aus der Temperaturdifferenz zwischen Kaltwasserzulaufemperatur und Zapftemperatur

und der definierten Brauchwarmwasser-Wärmeentnahme zuzüglich Warmwasser-Verteilverluste.

Das Heizkörper-, bzw. Radiatormodell berechnet die übertragene Leistung mit Hilfe der Norm-Wärmeleistung bei einer Spreizung von 75/65 °C, einer Raumtemperatur von 20 °C und dem Heizkörpertyp, bzw. dem daraus resultierenden Heizkörperexponenten. Die Norm-Wärmeleistung wird je nach Heizlast des Raumes und der Heizkörperexponent mit 1,2831 angenommen. Zur Simulation wird die Masse des Heizkörpers inklusive Wassermenge berücksichtigt und eine Auslegungs-Vorlauftemperatur von 55 °C eingestellt. Die tatsächliche Vorlauftemperatur für den Heizkreis wird über ein Dreiwegeventil geregelt, das den Rücklaufmassenstrom und den Zulauf aus dem Warmwasserspeicher unter Berücksichtigung der jeweiligen Temperaturen einstellt (Rücklaufbeimischung).

Der Regler für das Heizkörpermodell, das Thermostatventil stellt den Massenstrom des Durchflusses am Heizkörper ein. Als Input erhält der Regler die Operativtemperatur des Raumes, in dem sich der Heizkörper befindet. Diese wird mit dem entsprechenden Auslegungs-Sollwert im Raum verglichen. Fällt die Operativtemperatur unter den Sollwert, regelt das Thermostatventil, bzw. der Proportionalregler den Massenstrom am Heizkörper hoch, welcher dann damit eine entsprechende Wärmeleistung an einen Raum abgibt. Steigt die Operativtemperatur über dem Sollwert +1 K stellt das Ventil den Massenstrom aus.

Windheizungskonzepte

Für die Simulation der Windheizungskonzepte wird zur Wärmeerzeugung der Brennwertkessels durch einen direktelektrischen Durchlauferhitzer, oder eine Außenluft-Wärmepumpe ersetzt. Je nach Variante wird das Radiator-Heizkörpermodell mit einem Modell zur Simulation der Bauteilaktivierung (BTA) ersetzt. Letzteres wird für sämtliche Varianten mit Verlegung von Heizungsrohren im Bauteil, also für die klassische BTA, in der geometrischen Mitte des Bauteils, aber auch für Fußbodenheizung oder Oberflächenaktivierung verwendet.

Hinzu kommt die Möglichkeit den Heizkreis, oder das Brauchwarmwasser nach dem Ausgang am Warmwasserspeicher per direktelektrischen Durchlauferhitzer zu erwärmen, wenn der Speicher die gewünschte Soll-Temperatur nicht mehr bereitstellen kann. So wird verhindert, dass der Warmwasserspeicher außerhalb der Starkwindzeiten mit Reststrom beladen wird, bzw. beladen werden muss.

Brauchwarmwasser und Warmwasserspeicher werden wie bei der Referenztechnik beschrieben simuliert. Das Volumen vom Warmwasserspeicher wird entsprechend dem jeweiligen Windheizungskonzept und dem Gebäudetyp gewählt. In der Detailanalyse werden allgemein zwei Speichergrößen betrachtet. Es wird ein übliche ausgelegter Warmwasserspeicher untersucht, welcher bei gegebener Anlagentechnik auch nicht speziell im Windheizungskonzept eingesetzt werden würde (Auslegungsspeicher, Auslegung für Solarthermieanlage). Des Weiteren wird eine dem Windheizungskonzept angepasste Speichergröße untersucht, welche zur Überbrückung der Periode zwischen zwei Starkwinder-

eignissen (Windperiodenspeicher) ausgelegt ist (Heizung und Brauchwarmwasser) und folgend ein deutlich größeres Volumen bereitstellt. Die Dimensionierung ist im Folgenden unter Auslegung der TGA-Komponenten beschrieben.

Zum Beladen von Bauteilen und Warmwasserspeicher muss der Durchlauferhitzer in kurzer Zeit (Starkwindereignis) viel Heizleistung aufbringen, um das Wasser im Speicher auf 85 °C, bzw. das Wasser bei BTA-Systemen auf die gewünschte Vorlauftemperatur zu erwärmen. Das Simulationsmodell berechnet bei jeweiliger Zulauftemperatur und Zulaufmassenstrom aus dem Speicher die notwendige Wärmeleistung zur Bereitstellung der Auslegungs-Solltemperatur, oder bei Erreichen der maximalen eingestellten Wärmeleistung die Wassertemperatur nach dem Erwärmen.

Das Modell zur Simulation der BTA berechnet den abgegebenen Wärmestrom über Wärmeleitung der Rohrwand in ein Bauteil, bzw. in eine Schicht eines Bauteils des Gebäudemodells. Bauteiltemperatur, Wassertemperatur in verschiedenen Bereichen in Längsrichtung aufgeteilt, sowie die Temperatur am Vor- und Rücklauf werden berechnet. Bis zu einem maximal ausgelegten Massenstrom wird dieser mit einer PI-Regelung in Abhängigkeit von Ist- und Soll-Operativtemperatur im jeweiligen Raum und in Abhängigkeit der Rücklauftemperatur geregelt.

Bild 16 zeigt exemplarisch den Zusammenhang zwischen Gebäudemodell, Bauteil und Anlagentechnik. Ausgehend von dem gesamt eingeblendetem dreidimensionalen Gebäudemodell des Typ-Wohngebäudes (Sanierungsfall), links dargestellt, folgt das Wohnzimmer herausgenommen mittig im Bild und weiter nach rechts der Fußboden des Wohnzimmers, bzw. das Bauteil der Decke des unbeheizten Kellers. Darunter ist dieses Bauteil im Schichtaufbau (quergedreht) inklusive Einteilung in die Finite Volumen abgebildet. Von links in Gelb, Dämmung gefolgt von der Betondecke, Trittschalldämmung und dem Estrich. Dort in der Mitte, rot gekennzeichnet, ist die Lage der BTA Rohre im Bauteil dargestellt.

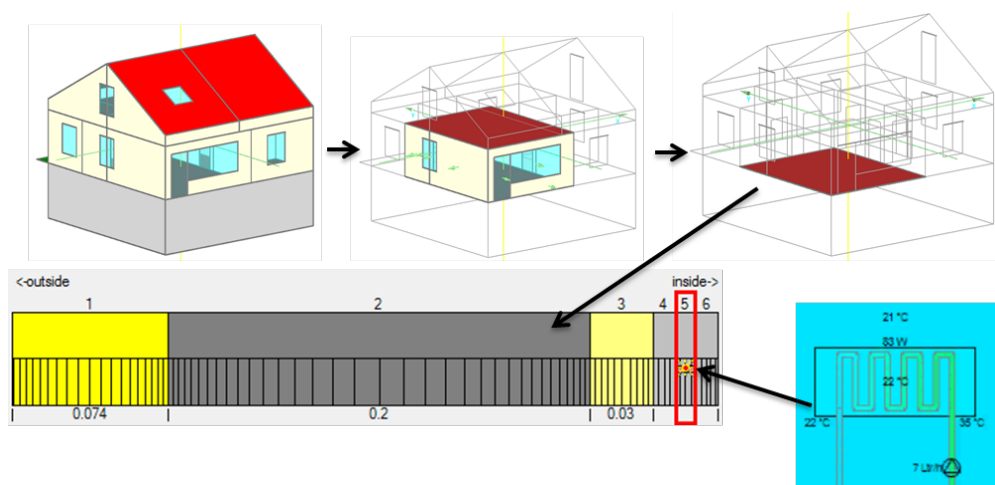


Bild 16:
Exemplarischer Zusammenhang zwischen Gebäudemodell, Bauteil und BTA-

Modell der Anlagentechnik in WUFI Plus. Dieser Zusammenhang beginnt mit dem 3D Modell des gesamten Gebäudes, über den Raum und das entsprechende Bauteil bis hin zu dessen Schichtaufbau inklusive Bauteilaktivierung.

Ein Windheizungs-Anlagenkonzept unterscheidet zwischen Starkwind- und Reststromperiode. In den analysierten Varianten mit hydraulischem System belädt ein Durchlauferhitzer den Warmwasserspeicher und die Bauteile während der Starkwindperiode. In der Reststromperiode wird dieser vom Warmwasserspeicher getrennt, hier soll der Wasserspeicher nicht direkt-elektrisch beladen werden. Er kann aber noch nach Ausgang am Warmwasserspeicher zwischengeschaltet werden um Heizkreis und Brauchwarmwasser auf Soll-Temperatur zu erwärmen, sollte der Warmwasserspeicher hierzu nicht mehr ausreichend warm sein. Es wird angenommen, dass der Durchlauferhitzer die erforderliche Temperatur erreichen kann. Für sämtliche Heizkreisregler (Heizkörper und BTA) wird die Soll-Temperatur während dem Starkwindereignis auf die obere Grenze des erlaubten Temperaturkorridors der Räume gesetzt und die maximale Durchströmung zugelassen. Wenn die erhöhte Soll-Temperatur im Raum erreicht ist, schaltet der Regler den Massenstrom der Heizkörper oder der BTA raumweise aus, während der Wasserspeicher weiterhin bis zum Erreichen der Maximaltemperatur erwärmt wird. Die Trägheit der BTA-Systeme, besonders in der Übergangszeit, wird über eine Rücklauftemperatur-Steuerung berücksichtigt. Der Sollwert der Rücklauftemperatur ist von der gleitenden Außenlufttemperatur der letzten 24 Stunden abhängig. Übersteigt die Rücklauftemperatur die aktuelle Soll-Rücklauftemperatur, schaltet ein Regler den Durchfluss komplett ab.

In der Reststromperiode regelt das Ventil am Heizkörper oder BTA-System wie im Referenzfall nach Wärmeanforderung jeden Raum separat. Wenn die Ist-Operativtemperatur unter die untere Grenze des Temperaturkorridors des Raumes fällt, öffnet das Ventil und regelt den Massenstrom um die minimale Soll-Temperatur im Raum zu halten.

Die Vorlauftemperatur für den Heizkreis wird über ein Dreiwegeventil geregelt. Solange die Temperatur im Speicher ausreicht, wird der Massenstrom vom Speicher mit dem Rücklauf zur eingestellten Vorlauftemperatur gemischt. Fällt die Zulauftemperatur aus dem Speicher unter die Soll-Vorlauftemperatur des Heizkreises, wird der Durchlauferhitzer nach dem Dreiwegeventil zwischengeschaltet, um die geforderte Vorlauftemperatur einhalten zu können. Das Ventil fordert den gesamten Massenstrom aus dem Speicher an, bis die Rücklauftemperatur wärmer als die Ausgangstemperatur aus dem Speicher ist. Hierdurch kann der Speicher maximal entladen werden. Ist die Rücklauftemperatur wärmer als die Ausgangstemperatur aus dem Speicher stellt das Dreiwegeventil den Massenstrom komplett auf den Rücklauf, der Wasserspeicher wird somit aus dem Heizkreis genommen und auch nicht indirekt über den Rücklauf des Heizkreises beladen.

Das Wärmepumpenmodell ist ein Kennfeldmodell, dem die erzielbare Wärmeleistung bei entsprechender elektrischer Antriebsleistung, für bestimmte vorge-

gebene Temperaturpaare am Verdampfer und Verflüssiger, zu Grunde liegt. Diese Betriebscharakteristik ist in den technischen Datenblättern der Wärmepumpen enthalten. Diese können zur Parametrisierung des Modells verwendet werden. Während der Simulation berechnet das Wärmepumpenmodell diese Temperaturen an Verdampfer und Verflüssiger und interpoliert daraus, an Hand der Betriebscharakteristik, die resultierenden Leistungswerte der Wärmepumpe. Die Temperaturen am Verdampfer der Außenluft-Wärmepumpe werden mit einem Luftwärmeübertragermodell simuliert. Der Außenluft wird beim Durchströmen des Wärmeübertragers Energie entzogen, welche auf den Verdampfer übertragen wird. Die erzielte Heizleistung wird über die Leistungsbilanz der Wärmepumpe bestimmt, die Leistungszahl (COP) wird für jeden Simulationsschritt ermittelt.

Warmwasserspeicher

Es werden Warmwasserspeicher mit verschiedenen Speichervolumen auf Grundlage unterschiedlicher Auslegung untersucht und folgend beschrieben.

Der kleinste festgelegte Warmwasserspeicher wird für Solarthermie unterstützte Heizungs- und Brauchwarmwasserbereitung ausgelegt (im Folgenden Auslegungsspeicher genannt) und stellt somit einen üblichen Warmwasserspeicher dar, wie er auch bei nicht Windheizungs-Gebäuden eingesetzt werden würde. Da für beide Einfamilienhäuser identische große thermische Solarkollektoren angesetzt werden (bessere Vergleichbarkeit), sind auch die resultierenden Auslegungsspeicher beider Gebäude gleich groß.

Durch Simulation wird der Energiebedarf (Heizung und Brauchwarmwasser) in jeder Überbrückungsperiode zwischen zwei Starkwindereignissen ermittelt, welcher für eine 100 %ige Windstromdeckung nötig ist. Der im Folgenden Teilperiodenspeicher genannte Warmwasserspeicher ist ausgelegt, um den Brauchwarmwasserbedarf in einer Überbrückungsperiode zu decken. Der Windperiodenspeicher ist ausgelegt, um den Brauchwarmwasserbedarf und den Heizenergiebedarf in einer Überbrückungsperiode zu decken. Die Hochtemperatur-Steinspeicher, deren Konzept in Abschnitt 5.3.5 näher erläutert und untersucht wird, werden analog zu den Windperiodenspeichern so ausgelegt, dass sie den gesamten Wärmebedarf einer Überbrückungsperiode speichern können.

Der Brauchwarmwasserbedarf ergibt sich aus der flächenbezogenen Wärmenentnahme und den Verteilverlusten (siehe Abschnitt 3.2) und ergibt über die Dauer der Überbrückungsperiode 250 kWh beim Neubau-Einfamilienhaus und 86 kWh für das sanierte Gebäude. Zur Auslegung des Wärmespeichers zur Überbrückung des Brauchwarmwasserbedarfs (Teilperiodenspeicher) für Neubau- und Sanierung für Wohngebäude wird der maximale Wert von 250 kWh Energiebedarf für Brauchwarmwasser angesetzt. Für Bürogebäude wird hier der Auslegungsspeicher verdoppelt. Zur Auslegung des Windperiodenspeichers wird der in der Grobanalyse ermittelte maximale Wärmebedarf von Brauchwarmwasser und Heizung zur Überbrückung der Zeit zwischen den Starkwin-

ereignissen jeweils für Ziegel-, Beton,- und Holzbau berücksichtigt. Die erforderlichen Speichergrößen anhand der Maximalwerte im Einfamilienhaus (einheitlich für die drei Bauweisen) in Höhe von 1.399 kWh beim Neubau und 755 kWh im Fall Sanierung, werden auf eine jeweils am Markt verfügbare Speichergröße gerundet. Die festgelegten Warmwasserspeichergrößen sind in Tabelle 12 aufgeführt.

Die Temperaturgrenzen des Speichers sind auf 25 – 85 °C festgelegt. Die Speicherdämmung wird mit einer Dicke von 16 cm und einer Wärmeleitfähigkeit von 0,03 W/(mK) angenommen. Mit einem Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{\text{Wasser-Stahl}}$ in Höhe von 6.000 W/(m²K) zwischen Speicherwasser und Speicherwandung, ergibt sich ein Wärmeübergangskoeffizient über die Speicherwand von 0,19 W/(m²K).

Tabelle 14:
Auslegung Warmwasserspeichervolumen.

	Speichervolumen [Liter] (Kapazität [kWh])		
	Auslegungs- speicher	Teilperioden- speicher (Überbrückung BWW-Bedarf)	Windperioden- speicher (Überbrückung BWW + Heiz- wärmebedarf)
Einfamilienhaus, Neubau	915 (64)	3.574 (250)	20.000 (1.400)
Einfamilienhaus, Sanierung	915 (64)	3.574 (250)	10.000 (700)
Büro, Neubau	2.000 (140)	4.000 (280)	58.000 (4.060)
Büro, Sanierung	2.000 (140)	4.000 (280)	74.000 (5.180)

Speicherbeladung

Die Speicherbeladung erfolgt nach den zuvor beschriebenen technischen Konzepten unterschiedlich für Referenz- und Windheizungsvarianten. In den Referenzfällen wird der Warmwasserspeicher auf 65 °C gehalten. In den Windheizungsvarianten mit Durchlauferhitzer wird der Warmwasserspeicher in der Reststromphase nicht beladen, sondern ausschließlich während der Windstromzeiten. Brauchwarmwasser wird mit einem Durchlauferhitzer nach dem Speicher auf die Zieltemperatur von 50 °C (DIN 18599-8 T.5) erwärmt und mit einer Warmwassertemperatur von 45 °C entnommen. Das Wasser im Heizkreis wird in der Überbrückungsphase ebenfalls nach dem Durchlaufen des Speichers im Nachgang per Durchlauferhitzer auf die geforderte Vorlauftemperatur erwärmt. Für konventionelle Außenluftwärmepumpen ist ein Pufferspeicher zur Optimierung der Laufzeiten, besonders im Hinblick auf das Brauchwarmwasser, üblich. In den Windheizungsvarianten mit Wärmepumpe wird diese, trotz Deckung des Wärmebedarfs während der Reststromphase an den Speicher angeschlossen. Das Schichtenspeichermodell erlaubt die Simulation einer Temperaturschichtung in 5 Schichten. Die Wärmepumpe ist hier an der obersten Schicht ange-

geschlossen. Hierdurch soll, besonders im Fall des Warmwasserspeichers mit großen Volumen zur Überbrückung des Brauchwarmwassers und Heizungsbedarf zwischen zwei Starkwindereignissen (Windperiodenspeicher), eine Beladung des gesamten Warmwasserspeichers in der Reststromphase vermieden werden.

Radiatoren

Zur Dimensionierung der Radiator-Heizkörper wird eine Vor-, und Rücklauf-temperatur von 55/45 °C, sowie eine mittlere Heizlast von 50 W/m² angenommen. Die erforderliche Wärmeleistung der Heizkörper sowie der Auslegungsmassenstrom werden raumweise in Abhängigkeit von der jeweiligen Grundfläche ermittelt.

Bauteilaktivierung (BTA)

Zur Bauteilaktivierung in Verbindung mit dem Auslegungsspeicher werden die Rohrschlangen mit einem Verlegeabstand von 10 cm relativ dicht im Bauteil verlegt. Der Rohrdurchmesser wird mit 25 x 2,3 mm angenommen. (20,4 mm Innenrohrdurchmesser und 2,3 mm Wandstärke). Der maximal benötigte Durchfluss durch jeden Heizkreis, bzw. jedes Bauteil wird durch mehrfache Simulation iterativ angepasst, um die am Ende einer Windheizperiode gewünschte Soll-Temperatur erreichen zu können. Hierzu sind hohe Massen- bzw. Volumenströme von bis zu 24 l/(m²h) bezogen auf die Bauteilfläche nötig. Diese resultieren nicht aus der Heizlast des Raums sondern aus der Wärmemenge die innerhalb eines 9-stündigen Starkwindereignisses in das Bauteil eingespeichert werden muss. Für nicht überdämmte Bauteile ist diese Soll-Temperatur im Bauteil bei 35 °C und für überdämmte bei 45 °C festgelegt. Diese Bauteiltemperaturen werden mit Vorlauftemperaturen von 40 °C bzw. 50 °C erreicht.

Die Bauteile fungieren sowohl als Wärmespeicher als auch als Übergabesystem. Besonders im Fall der überdämmten Bauteilaktivierung ist es wichtig, während der Zeit zwischen zwei Starkwindereignissen möglichst wenig Wärme, erzeugt aus Reststrom, in die Bauteile einzubringen, da sonst der mögliche Temperaturhub zur Beladung bei einem Starkwindereignis geringer ausfällt, bzw. dann weniger Wärme geladen werden kann. Dennoch muss auch hier, wie bereits erläutert, bei einer Unterschreitung der Ist-Temperatur unter die untere Grenze des Temperaturkorridors, das Bauteil als Übergabesystem zum Nachheizen des Raumes auf den minimalen Sollwert erwärmt werden.

Hilfsenergie und Verteilverluste

Die Hilfsenergie für Erzeugung, Speicherung und Verteilung zur Raumheizung und Brauchwarmwasserbereitung, sowie zur mechanischen Lüftung wird nicht dynamisch durch die Simulation der Anlagentechnik abgebildet. Sie wird folgend im Kapitel zur Detailanalyse der Berechnung nach DIN V 18599 [3] dem entsprechenden Gebäudetyp entnommen (Abschnitt 5.1, Tabelle 19) und bei der Auswertung des Energiebedarfs berücksichtigt. Der erhebliche Hilfsenergie-

Anteil zur mechanischen Lüftung des Bürogebäudes ist im Simulationsmodell als innere Wärmequelle berücksichtigt.

Es wird angenommen, dass die Verteilung für Heizung und Brauchwarmwasser innerhalb der thermischen Gebäudehülle stattfindet. Die Verteilverluste für Brauchwarmwasser (zuvor bei den Randbedingungen definiert) werden als innere Wärmequelle in den Simulationsmodellen angesetzt und beim Entnehmen der erforderlichen Wärmemenge für Brauchwarmwasser, wie zuvor bei der Konzeptbeschreibung der Anlagentechnik beschrieben, berücksichtigt. Heizverteilungsverluste werden nicht explizit ausgewiesen - nutzbare Gewinne bzw. Verluste werden bei der Simulation vom Energiebedarf jeder Zone bzw. vom Heizungsübergabesystem abgedeckt.

Speicherwärmeverluste der Wasserspeicher über die Speicherwand werden simuliert. Der Warmwasserspeicher wird in eine definierte Zone „gestellt“. Im Einfamilienhaus Neubau ist dies der Technik-Raum im beheizten Keller, im Einfamilienhaus Sanierung befindet sich der Speicher im unbeheizten Keller. Die Temperaturdifferenz zwischen Schichtung im Speicher und Umgebung (Aufstellungsort) wird bei der Berechnung des Wärmeverlustes über die Speicherwand berücksichtigt. Sofern der Speicher innerhalb der thermischen Hülle steht, wird der Wärmeverlust als innere Wärmequelle angesetzt.

3.6 Kosten

Die dieser Studie zugrundeliegenden Kostenannahmen für die einzelnen Technologien werden einer aktuellen Untersuchung zur Verschärfung der Anforderungen an die Energieeinsparverordnung (EnEV 2017) entnommen [28]. Diese Kostenansätze sind mit den zuständigen Bundesbehörden und sonstigen Interessensvertretern abgestimmt und somit über die Gewerke konsensfähig. Sie stellen bundesweite Mittelwerte dar. Örtliche Preise können daher konjunkturrell- oder regionalbedingt abweichen.

In dieser Studie werden alle Investitions- und Betriebskosten über eine Laufzeit von 25 Jahren nach der Kapitalwertmethode bewertet. „Der Kapitalwert einer Investition ist die Summe der Barwerte aller durch diese Investition verursachten Zahlungen (Ein- und Auszahlungen). Die Summe der diskontierten Zahlungen entspricht somit dem Integral über den Zahlungsstrom, der mit einer fallenden Exponentialfunktion gemäß Kalkulationszinssatz bewertet wird. Zum besseren Verständnis der Rechenoperation kann der Kapitalwert auch als der errechnete Geldbetrag betrachtet werden, der eingesetzt werden müsste, um unter Berücksichtigung der Verzinsung und der Ein- und Auszahlungen am Ende der Betrachtung zu einem Saldo von 0 zu gelangen. Voraussetzung ist hierbei die Wiederanlageprämisse, d. h. die zwischenzeitliche Anlage der Überschüsse zum Kalkulationszinssatz“ [29].

Mehrkosten für die Windheizungs-Basisfälle (KfW 40 bzw. KfW 55-Standard)

Jede Windheizungsvariante unterscheidet sich technisch gesehen bezüglich der folgenden 4 Aspekte von dem jeweiligen Referenzgebäude:

- Mehraufwand bezüglich der Dämmung der wärmetauschenden Hüllfläche zum Erreichen der geringeren U-Werte des jeweiligen KfW-Standards.
- Mehraufwand zur Erstellung einer Lüftungsanlage mit Zu- und Abluft und Wärmerückgewinnung (WRG) verglichen mit den Kosten für eine einfache Abluftanlage.
- Mehrkosten für einen Durchlauferhitzer zur thermischen Umwandlung des Windstroms.
- Minderaufwand durch den Wegfall des Öl-Brennwertkessels der EnEV-Referenztechnologie inklusive Heizkörper und Verrohrung.

In der in Abschnitt 3.6 beschriebenen Datenquelle für die Kostenermittlung stehen die Gesamtkosten der einzelnen Außenbauteile pro Fläche in Abhängigkeit vom angestrebten U-Wert zur Verfügung. Es werden für jedes Außenbauteil die spezifischen Flächenkosten für den Referenz- und für den Windheizungsaufbau errechnet und durch Differenzbildung die Windheizungs-mehrkosten ermittelt. Dieses Vorgehen ist beispielhaft in Bild 17 dargestellt. Diese Differenzkosten werden mit der Fläche des jeweiligen Bauteils multipliziert, um die Windheizungs-Mehrkosten für die einzelnen Bauteile zu ermitteln. Die Summe der Mehrkosten dieser einzelnen Bauteile ergibt die Windheizungs-mehrkosten zur Verbesserung der Qualität der wärmetauschenden Hüllfläche. Diese Mehrkosten werden für die vier Typgebäude ohne Berücksichtigung des Baumaterials des Wandbildners ermittelt, da der Wandbildner sowohl bei der Referenz als auch bei der Windheizungsvariante identisch ist. Die Kosten für eine reine Abluftanlage und für eine Lüftungsanlage mit WRG werden in Abhängigkeit der Wohnfläche bzw. vom Auslegungs-Volumenstrom ermittelt. Zur Bestimmung der lüftungsbezogenen Windheizungs-Mehrkosten wird für jedes Typgebäude die Kostendifferenz zwischen der Lüftungsanlage mit WRG und der Abluftanlage ermittelt. Die Mehrkosten für den Durchlauferhitzer werden pauschal auf 800 € abgeschätzt. Da die aktuelle Wirtschaftlichkeitsberechnung der EnEV keine Betrachtung eines Öl-Kessels mehr enthält, wird die Kostenseite der Referenz in dieser Studie für einen Gas-Brennwertkessel ermittelt. Dieser Kesselpreis sowie die Kosten für Heizkörper und Verrohrung, beide inklusive laufender Wartungskosten, sind in Abhängigkeit von der Auslegungsleistung des Kessels verfügbar. Die Summe der bereits aufgelisteten Mehrkosten wird um diese Aufwendungen reduziert, um die Mehrkosten für die 11 Windheizungs-Basisfälle zu erhalten. Eine detaillierte Aufschlüsselung dieser Kosten findet sich im Anhang 3.

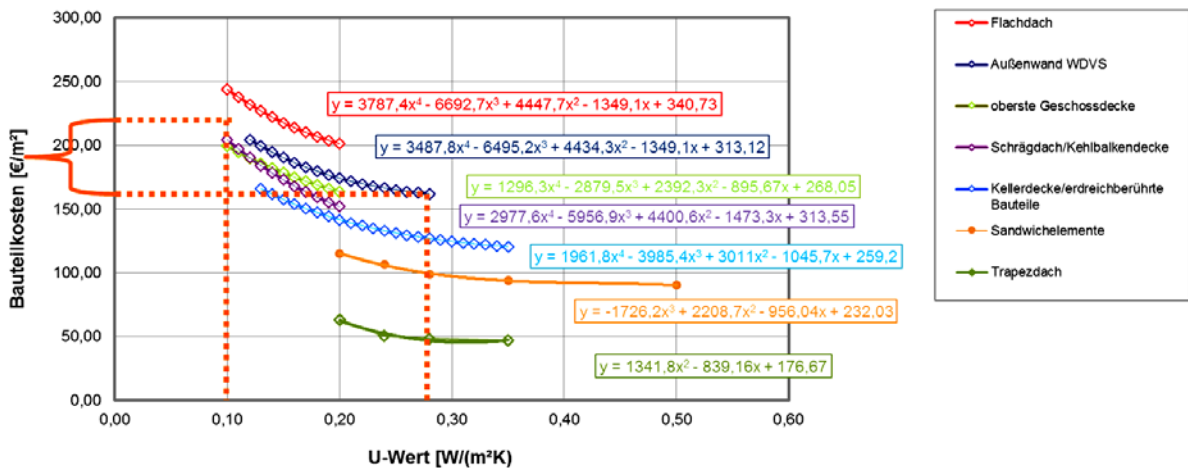


Bild 17:
Schematische Darstellung der Ermittlung der Differenzkosten für die Bauteile der wärmetauschenden Hüllfläche am Beispiel der Außenwand.

Mehraufwand für die Erzeugersysteme

In dieser Studie wird eine Auswahl von Wärmeerzeugern betrachtet. Als direkt-elektrischer Wärmeerzeuger wird zum einen ein Durchlauferhitzer ausgewählt dessen Investitionskosten pauschal auf 800 € abgeschätzt werden. Wasserspeicher-integrierte Heizstäbe werden nicht betrachtet, da durch sie eine weniger ausgeprägte Temperaturschichtung im Speicher zu erwarten ist. Zudem werden direktelektrischen Heizmatten betrachtet, die direkt in die zu aktivierenden Bauteile eingebracht werden. Hierdurch kann das hydraulische System zur Wärmeverteilung entfallen. Es werden Wärmepumpen mit Außenluft, Erdreich über Sole und mit einem Eisspeicher als primärseitige Wärmequelle betrachtet. Zusätzlich zu den Investitionskosten der Wärmepumpe selbst werden die Investitionskosten der primärseitigen Wärmequelle und jährliche Wartungskosten berücksichtigt. Als einziger nicht-elektrischer Wärmeerzeuger zur Deckung des Restwärmebedarfs wird ein Pelletkessel betrachtet. Hier werden sowohl die Investitionskosten für Kessel, Pelletlager und Schornstein als auch die jährlichen Kosten für Wartung und Schornsteinfeger berücksichtigt. Ebenso werden die Kosten für einen Ölkessel als einen wegfallenden Teil der Referenztechnik benötigt. Diesbezüglich werden die Investitionskosten für Kessel, Heizölspeicher und Schornstein als auch die jährlichen Kosten für Wartung und Schornsteinfeger berücksichtigt. Für alle jährlich anfallenden Kosten wird die Preissteigerung (Inflationsrate) entsprechend dem jeweiligen Kostenszenario berücksichtigt. Eine detaillierte Aufschlüsselung der einzelnen Kosten findet sich im Anhang 3.

Mehraufwand für die Speichersysteme

Die Investitionskosten für die wasserbasierten Speichersysteme, inklusive der große Windperiodenspeicher, welche zum Vorhalten der notwendigen Brauchwarmwasser- und Heizenergie zwischen zwei Starkwindereignissen ausgelegt sind, werden in Abhängigkeit von ihrem Volumen ermittelt. Die Investitionskosten für Speichersysteme die mit PCMs (Phase Change Material) gefüllt

sind setzen sich aus den volumenabhängigen Behälterkosten und angenommenen volumenabhängigen PCM-Materialkosten in Höhe von 5 €/l zusammen. Bei den als thermischer Speicher genutzten elektrischen und hydraulischen Bauteilaktivierungen werden die Investitionskosten in Abhängigkeit von der aktivierten Bauteilfläche zusammen mit jährlichen Wartungskosten (Kostenannahme für Fußbodenheizungen nach VDI 2067 [30]) in der Höhe von 1 % der Investitionskosten angesetzt. Die Kosten für die überdämmten BTA-Systeme werden, unabhängig davon ob sie die Aktivierung im Kern oder an der Oberfläche der decken- oder wandbildenden Schicht erfolgt, wie die Kosten einer normalen BTA ermittelt, wobei bei der Oberflächenaktivierung der Innenwände von einer 1-seitigen Aktivierung ausgegangen wird. Diese Kosten werden um die Investitionskosten für ein 2 cm dickes Dämmstoffsystem (40 €/m²) ergänzt. Für alle jährlich anfallenden Kosten wird die Preissteigerung (Inflationsrate) entsprechend dem jeweiligen Kostenszenario berücksichtigt. Eine detaillierte Aufschlüsselung dieser Kosten findet sich im Anhang 3.

Mehraufwand für die Übergabe- und Flächenspeichersysteme

Die Kostenermittlung für die Flächenheizsysteme wie die Oberflächenaktivierung von Decken und Innenwänden und die nur als Übergabesystem verwendete Bauteilaktivierungen sowie Fußbodenheizungen erfolgt analog zu den als Speichersystem genutzten Bauteilaktivierungen. Die Kosten für das Radiatorsystem, bestehend aus Heizkörpern und Verrohrung, werden analog zu den Kosten einer Fußbodenheizung angenommen. Diese Kosten sind ebenfalls ein Teil der wegfallenden Ausstattung der Referenzvariante. Parallel werden Radiatoren als Übergabesysteme auch in machen Windheizungsvarianten betrachtet. Für alle jährlich anfallenden Kosten wird die Preissteigerung (Inflationsrate) entsprechend dem jeweiligen Kostenszenario berücksichtigt. Eine detaillierte Aufschlüsselung dieser Kosten findet sich im Anhang 3.

Zusammensetzung der Energiekosten und der Preissteigerung

Die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Windheizungskonzepte hängt neben den Investitionskosten für den höheren Wärmedämmstandard und der Anlagentechnik, Speicher etc. auch von den Betriebskosten ab, welche größtenteils von den Energiekosten bzw. dem Strompreis abhängig sind. Bild 18 verdeutlicht, dass lediglich 25 Prozent des Endkundenstrompreises von den Stromgestehungskosten abhängig sind. Der größte Teil des Strompreises besteht aus Netznutzung, Steuern und Umlagen.

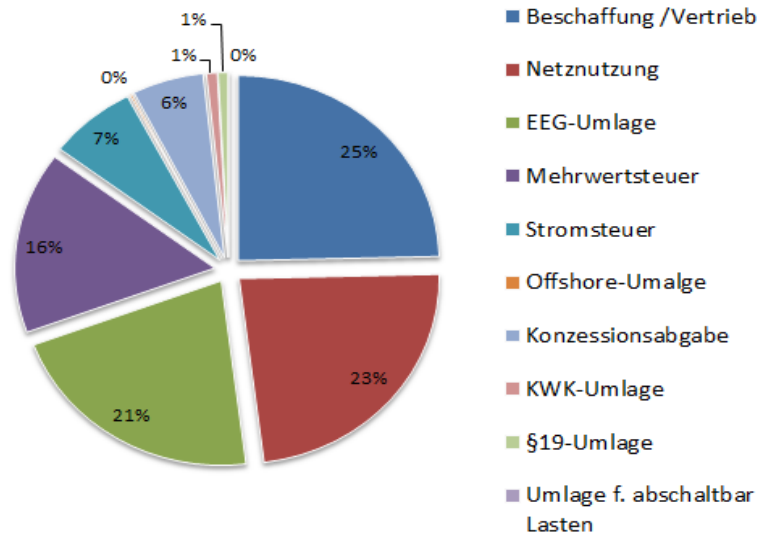


Bild 18:
Zusammensetzung des Endkundenstrompreises, BDEW Stand: 02/2015.

Bei näherer Betrachtung der Marktpreise an der Leipziger Strombörse EEX zeigt sich, dass die Starkwindereignisse in der letzten Heizperiode 2014/2015 aufgrund der Orkantiefs Elon und Felix im Dezember und Januar dazu führten, dass die Börsenstrompreise am Spotmarkt bei bis zu - 50 €/MWh lagen. Bei gleichzeitiger hoher Sonneneinstrahlung sowie hohem Windaufkommen wurden im April sogar -80 €/MWh erreicht, siehe Bild 19.

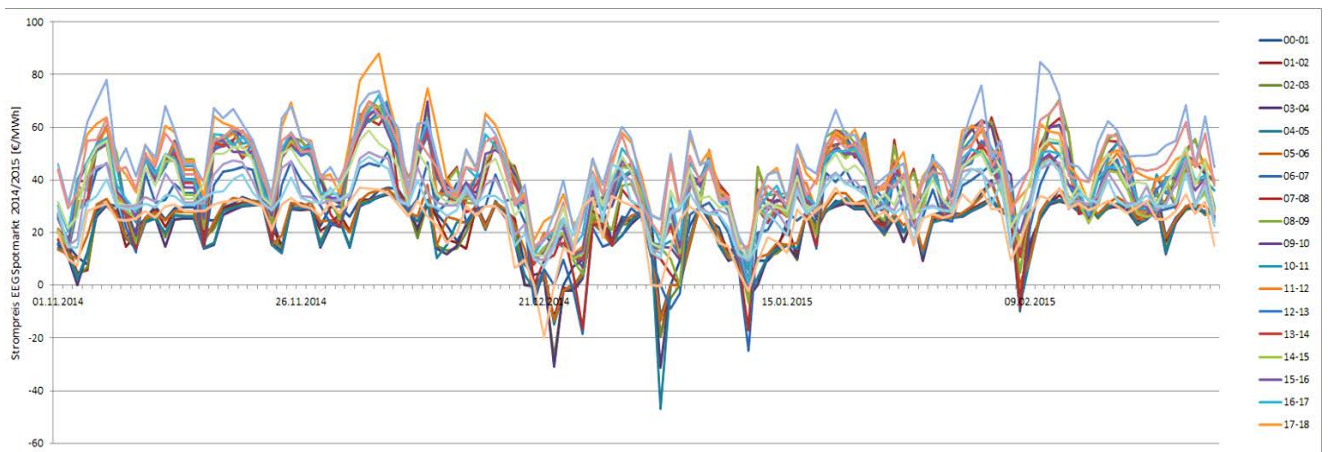


Bild 19:
Entwicklung der Spotmarktpreise an der Strombörse EEX (Nov. 2014 bis Feb. 2015), EEX Leipzig.

Der durchschnittliche negative Spotmarktpreis an der Strombörse lag bei rund -20 €/MWh bzw. -2 ct/kWh. Für die weitere Berechnung eines vergünstigten Endkundenpreises während Starkwindereignissen wird von Marktpreisen am Spotmarkt von 0 €/MWh ausgegangen.

Die im Auftrag von Agora Energiewende erstellte Studie "Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien - Handlungsvorschläge basierend auf einer Analyse von Potenzialen und energiewirtschaftlichen Effekten" des Fraunhofer IWES, IFAM und der Stiftung für Umweltenergierecht SUER [31] wurden unter anderem die Hemmnisse und Potentiale künftiger vergünstigter Strompreise während hohem Wind- und Solaraufkommen detailliert betrachtet.

Zusammenfassend zeigt sich hierbei, dass zwar im Moment keine spezifische Ausnahme der EEG Umlage möglich ist, da bei der Power-to-Heat Anwendung mittels Wärmepumpen keine Zwischenspeicherung nach § 60 Abs. 3 EEG 2014 vorliegt, eine reduzierte EEG-Umlage bzw. eine dynamische Umlage während hohem Windaufkommen bzw. hohem regenerativen Anteilen im Stromnetz jedoch rechtlich möglich ist. Es wird aus diesem Grund davon ausgegangen, dass während Starkwind ein reduziertes Netzentgelt und/oder eine reduzierte EEG-Umlage auch für kleinere dezentrale Anlagen gewährt wird, solange diese eine systemdienliche (marktdienlich oder netzdienlich) Wirkung haben.

Weiter stellt das SUER in ihrem Gutachten fest, dass ein reduziertes Netzentgelt nach § 14a EnWG für unterbrechbare Verbrauchseinrichtung möglich ist. Diese Regelung wird seit längerem für Wärmepumpen mit zeitlicher Abschaltung angewendet und wird in der Preisgestaltung berücksichtigt [31].

In der Regel hat ein Betreiber einer Power-to-Heat Anlage auch die Stromsteuer abzuführen. Insbesondere gilt dies für Endkunden mit kleiner Abnahmemenge und wenn die Wärme nicht wie bei einem produzierenden Unternehmen zur Herstellung eines Produktes oder Dienstleistung genutzt wird [31]. Um wirtschaftlich Überschussstrom während Starkwindereignissen zu nutzen und Anreize zu schaffen Gebäude annähernd ausschließlich alleine mit Starkwind-Strom zu beheizen wird angenommen, dass Strom während Starkwindereignissen von der Stromsteuer künftig befreit werden könnte. Somit ergibt sich aus einem Börsenstrompreis von 0 ct/kWh, einer reduzierten EEG-Umlage von 1,5 ct/kWh sowie unter Berücksichtigung einer Ausnahme von der Stromsteuer ein Endkundenpreis von rund 10,7 ct/kWh.

Zusätzlich zu dem reduzierten Windstrompreis von 10,7 ct/kWh wird im Rahmen dieser Studie der Fall von kostenlosem Windstrom betrachtet. Zwar existiert derzeit keine entsprechende Tarifstruktur, eines der Ziele dieses Forschungsvorhaben ist es jedoch die politischen Entscheidungsträger mit Informationen über potentiell machbare Konzepte zu versorgen. Zudem wird davon ausgegangen, dass der erstellte Windstrompreis im Gegensatz zu den restlichen Energieträgern nicht ansteigt. Da durch den fortschreitenden Windkraftausbau mit der Zeit auch der Anteil an verfügbarem Überschussstrom ansteigt, erscheint diese Annahme gerechtfertigt. Sowohl bezüglich der Preisentwicklung der anderen Energieträger Reststrom (privat), Betriebs-Reststrom (Gewerbe), Öl und Holzpellets als auch bezüglich der Inflationsrate und des Kalkulationszinseszinses werden 3 Szenarien betrachtet. Ein Szenario beschreibt ein sehr geringes Niveau von Energiepreissteigerung, Inflation und Verzinsung. Dieses Szenario

mit geringer Preissteigerung bildet die Grundlage der Wirtschaftlichkeitsberechnung zur EnEV 2017. [28]. Ein Szenario mit hohen Steigerungen ist an die Annahmen hinter dem Deutschen Gütesiegel für Nachhaltiges Bauen (DGNB) [32] angelehnt. Zusätzlich zu diesen beiden Extremen wird ein gemäßigtetes Steigerungsszenario betrachtet. Die Preise für die Energieträger zu Beginn des Bewertungszeitraums sind, ausgenommen dem Windstrom, bei jedem Preissteigerungsszenario gleich. Diese Startpreise sind ebenfalls der EnEV-Wirtschaftlichkeitsberechnung entnommen. Für Pellets und Öl wird der Preis von Privat- und Gewerbekunden gemittelt, da der Unterschied mit 0,006 bzw. 0,001 €/kWh hier sehr gering ist. Für den Reststrom werden die Strommengenkosten für einen Wärmepumpentarif getrennt für Privat- und Gewerbekunden betrachtet, da die Preisdifferenz hier mit 0,033 €/kWh deutlich höher ist.

Tabelle 15:

Zusammenstellung der Energiepreise pro kWh [28] inklusive ihrer Steigerung, der Verzinsungs- und der Inflationsrate der 6 unterschiedlichen Preissteigerungsszenarien.

Szenario Steigerung	Szenario Windstrom	Öl Preis	Wind Strom	Rest Strom	Betriebs Strom	Pellet Preis	Verzinsung / Inflation
Hohe	kostenlos	6,1 ct +5 %	0 ct -	20,5 ct +5 %	17,2 ct +5 %	4,8 ct +5 %	3,0 % 5,5 %
Mäßig	kostenlos	6,1 ct +2 %	0 ct -	20,5 ct +2 %	17,2 ct +2 %	4,8 ct +2 %	2,0 % 2,0 %
Gering	kostenlos	6,1 ct +1,2 %	0 ct -	20,5 ct +0,1 %	17,2 ct +0,1 %	4,8 ct +1,5 %	1,5 % 1,5 %
Hohe	10,7 ct	6,1 ct +5 %	10,7 ct +0 %	20,5 ct +5 %	17,2 ct +5 %	4,8 ct +5 %	3,0 % 5,5 %
Mäßig	10,7 ct	6,1 ct +2 %	10,7 ct +0 %	20,5 ct +2 %	17,2 ct +2 %	4,8 ct +2 %	2,0 % 2,0 %
Gering	10,7 ct	6,1 ct +1,2 %	10,7 ct +0 %	20,5 ct +0,1 %	17,2 ct +0,1 %	4,8 ct +1,5 %	1,5 % 1,5 %

3.7 Ökobilanz

Die Ökobilanz (engl. Life Cycle Assessment, LCA) wird in Anlehnung an DIN EN ISO 14040/44 [33] und DIN EN 15978 [34] durchgeführt. Sie bildet damit eine international standardisierte und in Forschung und Industrie etablierte Methode zur Ausweisung der potentiellen Umweltwirkungen, die ein Produkt oder Produktsystem über seinen Lebenszyklus verursacht. Dabei werden sämtliche Ressourcen und Emissionen entlang der Wertschöpfungskette erfasst und die resultierenden Wirkungen auf die Umwelt in verschiedenen Wirkungskategorien, wie dem Beitrag zum Treibhauspotential oder der Nutzung von fossiler Primärenergie, berechnet.

Nachfolgend wird kurz auf die wichtigsten Randbedingungen bzw. Festlegungen zur Ermittlung der ökologischen Umweltwirkungen im Projekt eingegangen.

Zielstellung

Mit Hilfe der Ökobilanz soll insbesondere beantwortet werden, welche Umweltwirkungen sich über den Lebenszyklus für die festgelegten Varianten zur Windheizung (WHG) ergeben; welchen Einfluss verschiedene Gebäudetypologien, Energiestandards und Stromszenarien auf die Umweltwirkungen über den Lebenszyklus haben und welches ökologische Potenzial in Bezug auf „Graue Energie“ und „Reduzierung der Treibhausgase“ über den Lebenszyklus damit verbunden ist.

Dazu werden verschiedene Varianten der Windheizung (WHG) einer Referenz und untereinander gegenüber gestellt um sie unter ökologischen Gesichtspunkten zu analysieren.

Funktion und funktionelle Einheit

Die Funktion des Konzepts der Windheizung wird für die vorliegenden Untersuchungen definiert als die Versorgung eines Gebäudes mit Wärme, und damit die Bereitstellung eines notwendigen thermischen Innenraumkomforts, über einen Zeitraum von 25 Jahren. Dabei werden definierte Gebäude-Energiestandards (gem. Abschnitt 3.2), spezifische Nutzerprofile (gem. Abschnitt 3.2) sowie definierte Gebäude-Nettogrundfläche (gem. Abschnitt 3.2) berücksichtigt. Das Konzept der Windheizung befähigt zusätzlich Strom aus Windkraftspitzen zwischen zu speichern und für die Wärmeversorgung im Gebäude nutzbar zu machen (gem. Abschnitt 3.3 bzw. 3.4).

Als funktionelle Einheit (quantifizierbare Größe zur Beschreibung der Funktion bzw. Bezugsgröße für die Ergebnisse der Ökobilanz) wird 1m^2 Energiebezugsfläche gem. EnEV je Jahr des Betrachtungszeitraums [$1\text{m}^2\text{1a}$] festgelegt.

Systemgrenzen

Es werden die Lebenszyklusphasen Herstellung, Instandhaltung (gleichwertiger Austausch von Bauteilen nach Ablauf ihrer Lebensdauer innerhalb des Betrachtungszeitraums), das Lebensende sowie der Gebäudebetrieb über 25 Jahre berücksichtigt.

Für die Gebäudekonstruktion der Windheizungsvarianten wird ein Delta-Wert (d.h. Mehr- oder Minderbedarf) zum jeweiligen Referenzgebäude ermittelt (gem. Bild 20). Dieser bezieht sowohl die Baukonstruktion (Außenwände, Innenwände, Decken etc.) als auch die Anlagentechnik (Technische Gebäudeausrüstung, TGA) mit ein. Für den Austausch von Bauteilen werden die BNB Nutzungsdauern von Bauteilen [35] herangezogen.

Für den Gebäudebetrieb werden die jährlichen Werte für Endenergie und die Art der Energieträger (gem. den Ergebnissen der thermischen Simulationen in Tabelle 35 bis 40 in Anhang 9) über einen Zeitraum von 25 Jahren angesetzt.

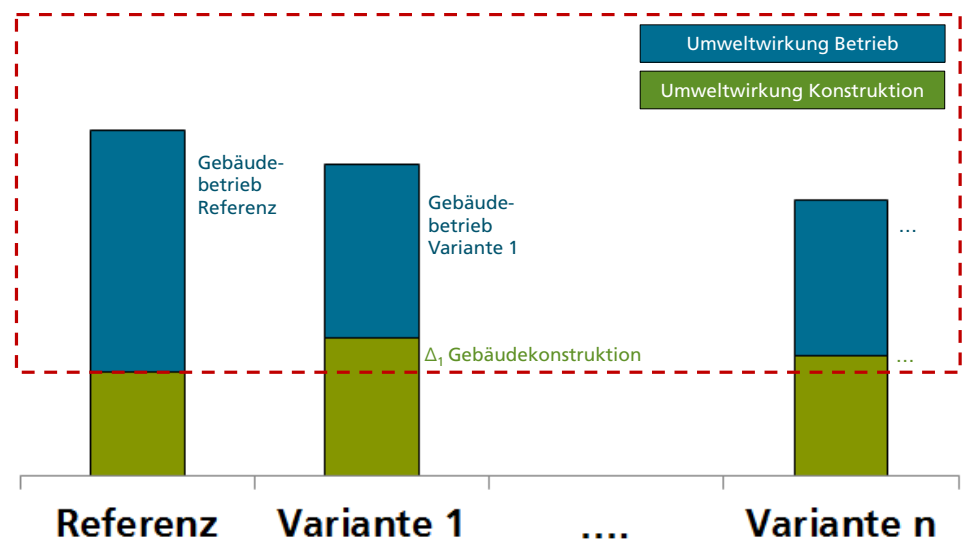


Bild 20:
Systemgrenzen Ökobilanz (eig. Darstellung).

Berücksichtigte Umwelthemen

Für die Ökobilanz werden die Wirkungskategorie „Treibhauspotenzial“ (engl. Global Warming Potential, GWP) als Beitrag zur Klimaerwärmung angegeben in [kg CO₂-Äquivalente] und der ökologische Indikator „Primärenergiebedarf, nicht-erneuerbar“ als Beitrag zur Nutzung fossiler, energetischer Ressourcen angegeben in [kWh] berücksichtigt. Aufgrund der Wichtigkeit dieser Umweltkategorien in der öffentlichen Wahrnehmung wurde die Auswahl der Indikatoren auf die erwähnten beschränkt.

Verwendete Datenbanken und Umweltprofile

Ökologische Daten (Umweltprofile) werden soweit verfügbar der öffentlichen Ökobilanzdatenbank Ökobau.dat [36] entnommen, sowie um fehlende Umweltprofile aus der professionellen Datenbank GaBi 6 [37] ergänzt. Die verwendeten Umweltprofile sind zeitlich für die Jahre 2015 - 2020 und örtlich für Deutschland repräsentativ.

Zur Abbildung der Baukonstruktion und Technischen Gebäudeausrüstung (im Referenzfall und für die Varianten der Windheizung) werden ausschließlich Datensätze der Ökobau.dat benutzt.

Für die Referenzgebäude mit EnEV-Anlagentechnik finden im Betrieb die Ökobau.dat Datensätze „Nutzung - Öl Brennwert (< 20 kW, entspr. EnEV)“ (EFH) bzw. „Nutzung - Öl Brennwert (20 - 120 kW, entspr. EnEV)“ (Büro) zur Abbildung der Umweltwirkungen im Gebäudebetrieb Verwendung. Für die Strombe-

reistellung (Reststrom) wird der „Strom-Mix Deutschland (2015)“ gemäß BMU Leitstudie 2011 - Szenario 2011A [38] mit Hilfe der GaBi 6 Datenbank angesetzt. Der Ansatz der Umweltwirkungen für die Nutzung von Reststrom (Umweltprofil Strom-Mix) erfolgt auf Grundlage der BMU Leitstudie 2011 - Szenario 2011A. Im Rahmen der Leitstudie werden mögliche Entwicklungen zur energiepolitischen Zielerfüllung im Rahmen von drei Rohszenarien für Deutschland beschrieben. Das Szenario 2011A stellt hierbei das mittlere Szenario bezüglich des Ausbaus an erneuerbaren Energien im deutschen Stromsektor dar und berücksichtigt u.a. auch einen potenziellen Ausstieg von Kernenergie im Jahr 2020. Mit Hilfe der Angaben zur Entwicklung der Zusammensetzung der Energieträger und der GaBi 6 Datenbank, werden angepasste Umweltprofile für die Jahre 2015, 2020, 2025, 2030 und 2035 ermittelt. Die Nutzung von Strom zu Starkwindzeiten (Windstrom) wird mit dem Umweltprofil „Strom aus Windkraft“ gem. Ökobau.dat Datenbank abgebildet.

Annahmen zur Entwicklung der Umweltprofile für Wärmebereitstellung

Bild 21 und Bild 22 geben einen Überblick über die Annahmen zur Entwicklung des Umweltprofils für 1 kWh Wärmebereitstellung für die Bezugsjahre 2015 bis 2040 am Beispiel Einfamilienhaus (EFH). Es werden die Umweltwirkungen für die ökologischen Bewertungsgrößen Treibhauspotenzial (GWP) und nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf (PEDne) dargestellt. Die Abbildungen beziehen sich ausschließlich auf den Gebäudebetrieb.

Zur Gegenüberstellung sind verschiedene Pfade der Wärmebereitstellung (aus Strom mit/ohne Windstrom-Anteil, Öl-/Gas-Brennwertkessel) aufgetragen. Der Begriff „Windstrom-Anteil“ bezieht sich hierbei ausschließlich auf den Anteil der Nutzung von Strom zu Starkwindzeiten am Gesamtstrombedarf (vgl. auch Definition Windstromdeckung in Abschnitt 5.2). Der jährliche Anteil der Strom-Produktion aus Windkraft im Strom-Mix gem. Annahmen des Szenarios 2011A (BMU Leitstudie) ist hiervon nicht betroffen und ist bei der Ermittlung der Umweltprofile bereits berücksichtigt. Der Pfad „Wärmebereitstellung aus Strom mit Windstrom-Anteil 0 %“ bildet das Umweltprofil für die reguläre Nutzung von Reststrom. Der Pfad „Wärmebereitstellung aus Strom mit Windstrom-Anteil 100 %“ zeigt äquivalent das Umweltprofil für die Nutzung von Windstrom. Der Pfad „Wärmebereitstellung aus Öl-Brennwertkessel < 20 kW“ entspricht dem Ansatz der Umweltwirkungen im Gebäudebetrieb für den Referenzfall. Die Pfade „Wärmebereitstellung aus Strom mit Windstrom-Anteil von 90 % bzw. 60 %“ geben aggregierte Umweltprofile für eine Variante der Windheizung mit sehr guter und sehr niedriger Windstromdeckung wieder, wie sie im Rahmen der Detailanalyse ermittelt wurden.

Für die Ökobilanz werden die Umweltprofile in den Bezugsjahren 2015, 2020, 2025, 2030 und 2035 jeweils konstant für eine Periode von 5 Jahren ange-

setzt¹. Technologische Veränderungen, die Einfluss auf Veränderungen im Umweltprofil haben, werden ausschließlich für die Wärmebereitstellung aus Strom mit einem Windstrom-Anteil > 0 % berücksichtigt.

Aus den vorliegenden (im Projekt berücksichtigten) Umweltprofilen für den Gebäudebetrieb und für die Jahre 2015 bis 2040 in Bild 21 und Bild 22, lassen sich bereits erste Erläuterungen für die Ergebnisse der Ökobilanz in der Detailanalyse ableiten. Unter der Annahme gleicher Höhe der notwendigen Wärmebereitstellung im Gebäude für Referenzfall und Varianten der Windheizung (WHG) können ökologische Vorteile nur durch einen entsprechenden Windstromdeckungsanteil (ab 60 %) realisiert werden. Die generelle Wärmeversorgung aus Strom ohne Windstromdeckungsanteil im Vergleich zur Wärmeversorgung aus Öl (Referenzfall) wäre in diesem Fall aus ökologischer Sicht nicht sinnvoll. Das „Delta“ zwischen „Wärmebereitstellung mit Windstrom-Anteil 0 %“ und Umweltprofilen für die „Wärmebereitstellung aus Strom mit Windstrom-Anteil > 0 %“ wird im zeitlichen Verlauf deutlich geringer (Halbierung bei Vergleich zwischen den Werten der Jahre 2015 und 2035). Damit gehen reduzierte ökologische Vorteile der Varianten der Windheizungsgebäude einher, unter den in diesem Projekt getroffenen Annahmen. Unterschiede für die Umweltwirkungen des Gebäudebetriebs der WHG in der Detailanalyse lassen sich ebenfalls mit dem Delta der Umweltprofile für „Wärmebereitstellung aus Strom mit Windstrom-Anteil von 90 % bzw. 60 %“ in erster Näherung abschätzen.

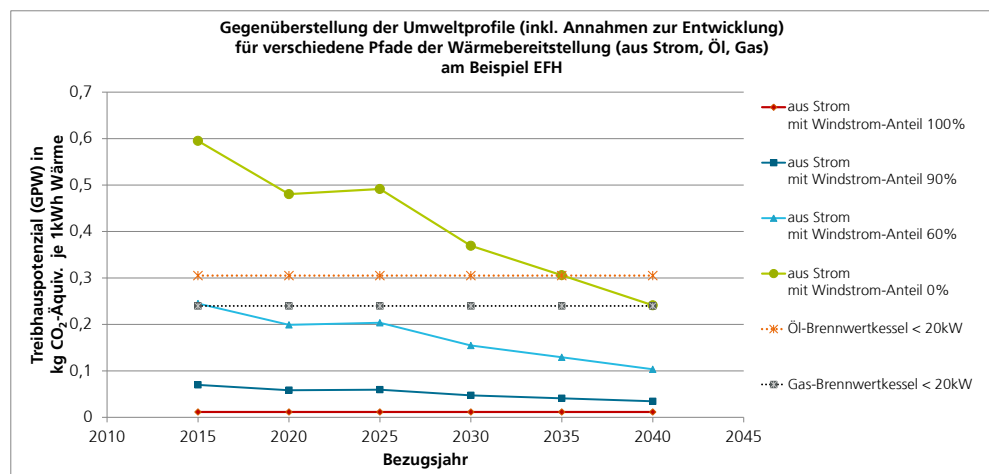


Bild 21: Gegenüberstellung des Beitrags zum Treibhauspotenzial (GWP) je 1 kWh Wärmebereitstellung aus unterschiedlichen Pfaden am Beispiel EFH.

¹ Beispiel: Für die Jahre 2015 bis 2019 wird das Umweltprofil aus dem Bezugsjahr 2015 verwendet. Für die Jahre 2035 bis 2039 wird das Umweltprofil aus dem Bezugsjahr 2035 angesetzt.

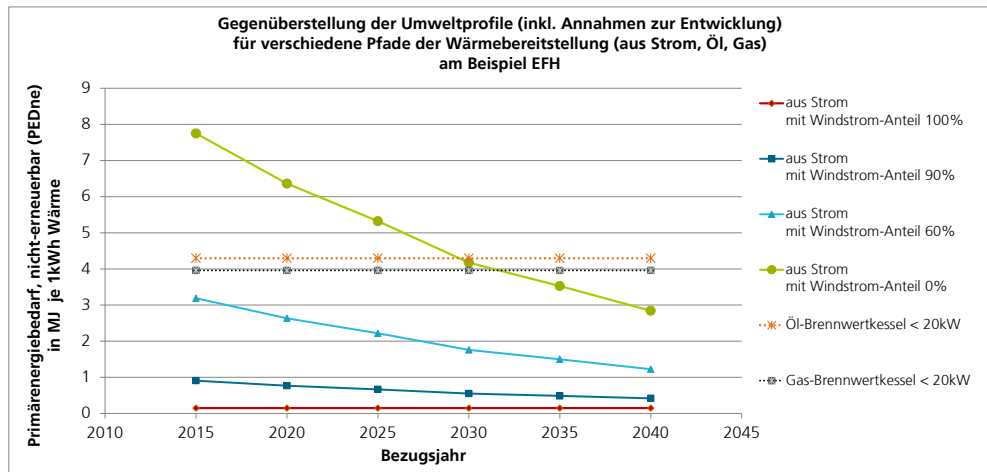


Bild 22:
Gegenüberstellung des Beitrags zur Nutzung nicht-erneuerbarer Primärenergie (PEDne) je 1 kWh Wärmebereitstellung aus unterschiedlichen Pfaden am Beispiel EFH.

Sachbilanz

Die Datenermittlung aller Stoff- und Energieströme (sog. Vordergrunddaten), die mit den Varianten der Windheizung verbunden sind, basiert auf Primärdaten der thermischen Simulation (gem. Abschnitt 3.2 bis Abschnitt 3.4). Die erfassten Daten sind zeitlich für das Jahr 2015/2016 und örtlich für Deutschland repräsentativ. Die wichtigsten konstruktiven Eingangsgrößen für die Sachbilanz im Rahmen der Detailanalyse können dem Anhang 9 entnommen werden.

4 Ergebnisse der Grobanalyse

Kombiniert man alle aus den 4 Typgebäuden und den 3 Baumaterialien resultierenden 11 Basisfälle für die Windheizungsgebäude mit den als potentiell in Frage kommenden TGA-Varianten, ergibt dies knapp 5.000 zu betrachtende Windheizungs-Varianten. Diese Anzahl ist zu hoch, um sie im Rahmen einer Simulationsstudie sinnvoll betrachten zu können. Aus diesem Grund wird die hier beschriebene Grobanalyse durchgeführt, die dazu dient unter stationären Bedingungen die einzelnen Windheizungs-Varianten dahingehend abzuschätzen, ob die vorhandenen Speicherkapazitäten theoretisch überhaupt ausreichen können und ob das finanzielle Endergebnis potentiell positiv ausfallen wird. In der Grobanalyse wird der Wärmebedarf des betrachteten Gebäudes mit der Energiemenge verglichen die theoretisch bei der vollständigen Ausnutzung der gesamten Speicherkapazitäten aller eingebundenen Speichersysteme der jeweiligen TGA-Variante eingespeichert werden kann. Dies geschieht separat für jede der 12 Überbrückungsperioden zwischen zwei Starkwindereignissen (siehe Abschnitt 3.1, Seite 15). In Bild 23 ist dieses periodenweise Verfahren beispielhaft für 4 Überbrückungsperioden dargestellt (Annahme eines Starkwindereignisses am 1. Nov., 14. Nov., etc.). Hierbei beschreibt die rote Kurve jeweils den kumulierten Heizenergiebedarf zwischen den einzelnen Starkwindereignissen. Der türkis (vollflächig bzw. weiß schraffierte) markierte Bereich zeigt die jewei-

lige maximal speicherbare Energie zum Zeitpunkt eines Starkwindereignisses. Die linke Grafik beschreibt hierbei ein Gebäude mit großer und die rechte Grafik mit kleiner Speicherkapazität. Der weiß schraffierte Bereich in der linken Grafik stellt die je Überbrückungsperiode nicht benötigte (noch freie) Speicherkapazität dar (100 % Windstromdeckung). Der rot schraffierte Bereich in der rechten Grafik stellt die fehlende Speicherkapazität dar, die zusätzlich zur vorhandenen eingespeicherten Energie (türkis markiert) dem Gebäude noch zugeführt werden muss. Dieser Energieanteil ist außerhalb der Starkwindereignisse z.B. mittels „Reststrom“ oder andere Energieträger bereit zu stellen (Windstromdeckung < 100 %). Die so abgeschätzten Energiemengen fließen anschließend in die Ermittlung der Windstromdeckung und in eine Kostenbetrachtung mit ein.

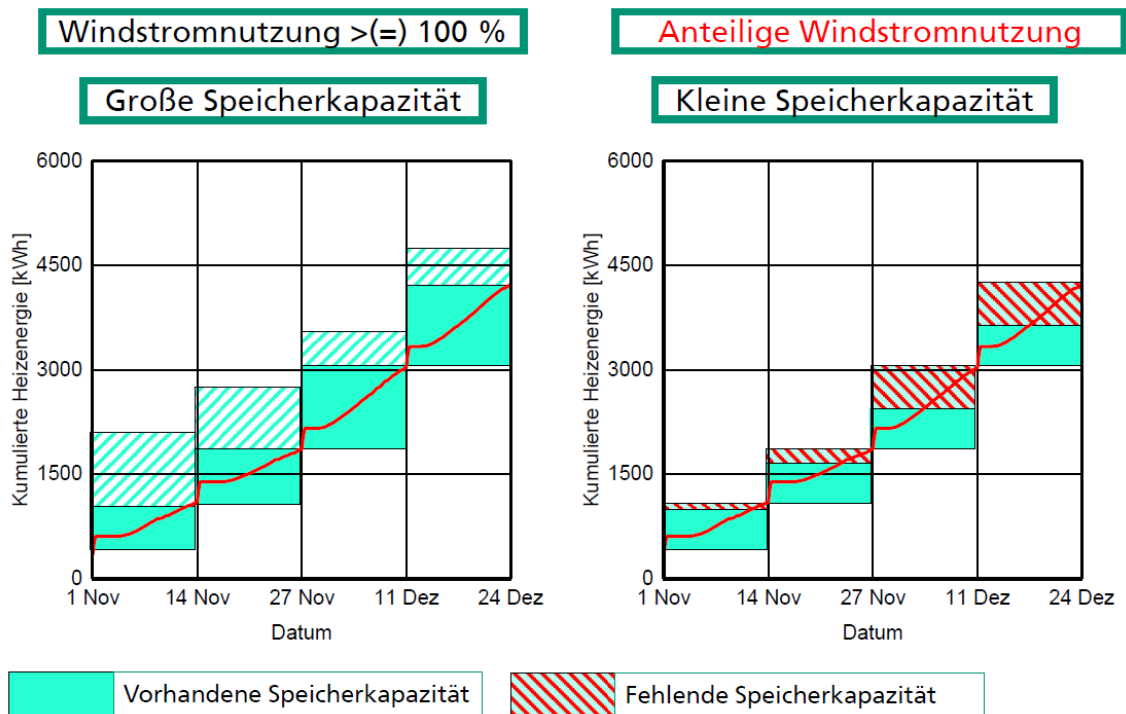


Bild 23:
Schematische Darstellung der Bedarfsermittlung der Wind- und Reststrommengen im Rahmen der Grobanalyse.

4.1 Durchführung der Analyse

Zur Ermittlung des Wärmebedarfs werden die 11 Basisfälle, also die Windheizungsgebäude inklusive Lüftungsanlage mit WRG aber ohne Anlagentechnik zur Wärmebereitung und Speicherung, mit einer idealen Heizung dynamisch simuliert (Basisgebäude). Das Solltemperaturprofil dieser Simulationen berücksichtigt bereits die erhöhte Raumtemperatur während der Starkwindphasen jedes Starkwindzyklus. Auf diese Weise erhält man den Endenergiebedarf für jedes Basisgebäude, separat für alle 12 Windzyklen. Der als zeitlich konstant angenommene Wärmebedarf für die Bereitung von Brauchwarmwasser wird auf den jeweiligen Raumwärmebedarf der einzelnen Zyklen addiert.

Für die Ermittlung der Speicherkapazität ist neben dem jeweiligen Speichermedium der nutzbare Temperaturhub erforderlich. Der Temperaturhub ist die Temperaturdifferenz zwischen der maximal möglichen Speichertemperatur und der minimalen Temperatur, mit der das Gebäude noch aus dem Speicher beheizt werden kann. Da es sich bei den Windheizungsgebäuden um hocheffiziente Gebäude bezüglich der Endenergie handelt, kann davon ausgegangen werden, dass die Aufrechterhaltung der gewünschten Raumtemperaturen auch mit niedrigen Speichertemperaturen noch möglich ist. Das genaue Zusammenspiel zwischen Speicher- und Gebäudetemperatur wird im Rahmen der Grobanalyse nur abschätzend behandelt, da ohne eine dynamische Simulation keine detaillierte Untersuchung dieser Interaktion möglich ist. Bei den klassischen Wasser- und PCM-Speichern wird ein nutzbarer Temperaturhub von 25 °C auf 85 °C (60 K; zuzüglich Latentwärme beim PCM-Speicher) und bei den Hochtemperaturspeichern von 20 °C auf 700 °C angesetzt. Für Bauteilspeichersysteme wird die flächenbezogene spezifische Wärmekapazität des aktivierten Bauteils bis zur ersten Dämmlage ermittelt. Diese Kapazität wird mit der Fläche und dem als maximal zulässig angenommenen Temperaturhub des jeweiligen Bauteils multipliziert. Für Bauteilspeichersysteme wird eine Maximaltemperatur von 35 °C bzw. 45 °C bei überdämmten Systemen angesetzt. Bei einer Raumtemperatur von 20 °C entspricht dies einem Temperaturhub von 15 K bzw. 25 K. Da im Bürofall die minimale Raumtemperatur 21 °C beträgt, ist hier der nutzbare Temperaturhub entsprechend um 1 K geringer. Bei dieser Betrachtung wird davon ausgegangen, dass das jeweilige Speichersystem vollständig und ideal entsprechend des vorherrschenden Wärmebedarfs entladen werden kann. Diese Annahme ist vor allem bei Bauteilspeichersystemen eine Einschränkung. Neben der klassischen Bauteilaktivierung, die im Betonkern stattfindet, wird in dieser Studie auch eine Bauteilaktivierung durch Systeme betrachtet, die an der Oberfläche des Beton- bzw. Mauerwerkskerns eingeputzte werden. Diese Systeme sind zur Wärmespeicherung in Bauteilen weniger gut geeignet als eine klassische BTA, da sie durch den Wärmeeintrag an der Oberfläche einen größeren Anteil der Wärme direkt in den Raum abgeben. Diese Systeme werden dennoch betrachtet da sie, anders als konventionelle BTA-Systeme, in Sanierungsfällen nachgerüstet werden können. Im Rahmen der hier beschriebenen Grobanalyse findet keine energetische Unterscheidung zwischen der Aktivierung im Bauteilinneren oder an dessen Oberfläche statt. Ebenso findet keine Unterscheidung statt, ob es sich um ein hydraulisches oder ein direktelektri-

ches System handelt. Diesbezüglich wird lediglich ein Unterschied bei den Kosten angesetzt.

Die so ermittelten Speicherkapazitäten werden mit dem Bedarf jedes Windzyklus verglichen und hieraus die resultierenden Bedarfsmengen von Windstrom und Restwärme berechnet. Zum einen wird aus diesem Verhältnis die Windstromdeckung abgeschätzt, die ein wesentlicher Parameter zur Qualifizierung als „Windheizungsgebäude“ ist. Zum anderen wird die Differenz der Kosten jeder Windheizungsvariante zum Referenzfall berechnet. Hierfür werden die für die Windheizungs-TGA notwendigen Investitionskosten (inkl. Wartung) und die Kosten für Windstrom und Restwärme (nach jeweiligem Erzeuger; inkl. Preissteigerung) ermittelt. Diese Kosten werden um die wegfallenden Investitionskosten und die Energiekosten des Referenzfalls reduziert (inkl. Wartung und Energiepreissteigerung). Die so ermittelten Windstromdeckungen und Windstromanteile sind systematisch etwas zu hoch, da eine perfekte Speicherausnutzung angenommen wird. Entsprechend ist auch das ermittelte finanzielle Ergebnis auf Grund einer erhöhten Nutzung von kostenlosem / billigem Windstrom etwas günstiger als in der späteren Detailanalyse zu erwarten ist. Es liegt die Annahme zu Grunde, dass mit den angesetzten Wartungsaufwendungen alle Komponenten über den Betrachtungszeitraum von 25 Jahren betriebsbereit bleiben und keine Reinvestitionen erforderlich sind. Ggf. anfallende Entsorgung-Mehrkosten werden nicht berücksichtigt. Für die Wirkungsgrade der verschiedenen, in Abschnitt 3.3 identifizierten, Erzeuger werden in dieser Phase feste Werte nach Tabelle 16 angesetzt.

Tabelle 16:

Wirkungsgrade bzw. Jahresarbeitszahlen für die unterschiedlichen Erzeuger für die Restwärmedeckung im Rahmen der Grobanalyse.

Erzeugersystem	Wirkungsgrad [%]	Jahresarbeitszahl [-]
Öl-Brennwertkessel (bezogen auf Heizwert, H_i)	106	-
Pellet-Kessel (Brennwert-Technik)	106	-
Außenluft-Wärmepumpe	-	2,5
Sole-Wärmepumpe	-	4,5
Massivabsorber-Wärmepumpe	-	3,2
Eisspeicher Wärmepumpe	-	4,0

4.2 Bewertungskriterien

In dieser Stufe der Analyse werden noch nicht alle Bewertungskriterien angesetzt die später zur Qualifikation eines Windheizungsgebäudes herangezogen werden sollen. In dieser Phase soll lediglich die grundsätzliche Eignung der einzelnen Technologiekonzepte als Windheizungsgebäude und deren finanzielles Potential überprüft werden. Als Ausschlusskriterium bezüglich der Windheizungseignung wird festgelegt, dass eine Windheizungsvariante in der Grobanalyse eine Windstromdeckung von mindestens 80 % aufweisen soll. Die Windstromdeckung beschreibt welcher Anteil des um die solare Deckung (anteilig Brauchwarmwasser im Sommer) reduzierten jährlichen Endenergiebedarfs für Raumheizung, Brauchwarmwasserbereitung und Hilfsenergie einer Windheizungsvariante durch Windstrom gedeckt werden kann, der während eines Starkwindereignisses in Wärme umgewandelt und eingespeichert wird. Die Windstromdeckung vergleicht somit Bezug an elektrischem Strom während und außerhalb eines Starkwindereignisses. Die Aufgabe der hier beschriebenen Studie ist es nicht nur ein möglichst energieeffizientes Gebäude zu entwickeln, sondern auch ein Gebäude das seinen Wärmebedarf hauptsächlich durch die netzdienliche Aufnahme von Überschussstrom decken kann. Die Windstromdeckung ist hierfür eine wesentliche Bewertungsgröße.

Zudem sollte ein Windheizungsgebäude aus ökonomischer Sicht mindestens gleichwertig wie ein Gebäude das den Mindestanforderungen nach EnEV [22] genügt sein, also Differenzkosten kleiner gleich Null aufweisen. Um den aus den Annahmen und Vereinfachungen resultierenden Unsicherheiten Rechnung zu tragen werden in der anschließenden Detailanalyse trotzdem Varianten weiter betrachtet, die in der Grobanalyse nach der Kapitalwertmethode Lebenszyklus-Mehrkosten bis maximal 150 €/m² aufweisen.

4.3 Ergebnisse Grobanalyse

Generell kann festgestellt werden, dass deutlich mehr Varianten das Kriterium der Windstromdeckung erfüllen als das ökonomische Kriterium. Auch zeichnet sich ab, dass für Bürogebäude keine wirtschaftlich zielführenden Windheizungsvarianten gefunden werden können. Per Definition erfüllen alle Varianten mit Windperiodenspeicher (Warmwasserspeicher ausgelegt zur Überbrückung der Periode zwischen zwei Starkwindereignissen) und Hochtemperatur-Steinspeicher (HTSP, ebenfalls als Windperiodenspeicher dimensioniert) das 80 %-Kriterium. Auch die meisten Varianten mit BTA und dem kleinen Auslegungs-Wasserspeicher bieten theoretisch noch ausreichenden Kapazitäten. Lediglich massearme Übergabesysteme wie Radiatoren und Fußbodenheizungen fallen in der Kombination mit dem Auslegungsspeicher heraus. Auch zeigt sich, dass im Sanierungsfall das Aktivieren nur der Decken bzw. nur der Innenwände nicht ausreichend ist. Hier ist entweder die Aktivierung beider Bauteile oder die Überdämmung der aktivierten Massen zur Vergrößerung des Temperaturhubs erforderlich. Der mittelgroße Warmwasserspeicher zur Überbrückung des Bedarfs für Brauchwarmwasserbereitung zwischen zwei Starkwindereignissen (Teilperiodenspeicher) bietet insoweit keine Vorteile, da er nicht genug Kapazität besitzt, um den Wegfall eines aktivierten Bauteils und damit eine Kostenreduktion zu rechtfertigen. Seine Energiekostenreduktion auf Grund der erhöhten Speicherkapazität gleicht dabei die erhöhten Investitionskosten nicht aus. Auch der PCM-Speicher ist unter den gewählten Betriebsrandbedingungen kostentechnisch nicht zielführend, da er im gesamt nutzbaren Temperaturbereich zwischen 25 und 85 °C kaum höhere Speicherkapazitäten als ein klassischer Wasserspeicher aufweist. Dies zeigt eine Vergleichsrechnung mit dem PCM Rubitherm RT44HC in Gleichung (2) und Tabelle 17. Hier wird ersichtlich, dass wegen der geringeren spezifischen Wärmekapazität des PCMs verglichen mit Wasser kaum mehr Speicherkapazität ergibt, wobei sich die volumenbezogenen Kosten des PCM-Speichers verglichen mit einem Wasserspeicher etwa verfünffachen.

$$c_{gesamt} = (\Delta T * c_{spez} + c_{enthalpie}) * \rho \quad (2)$$

Tabelle 17:
Vergleichsrechnung der nutzbaren thermischen Gesamtspeicherkapazität eines Wasser- und eines PCM-Speichers.

Speicher	C_{gesamt} Nutzbare Gesamtwärmespeicherkapazität [kJ/l]	ΔT Nutzbare Temperaturdifferenz [K]	C_{spez} Spezifische Wärmekapazität [kJ/(kgK)]	$C_{\text{enthalpie}}$ Wärmespeicherkapazität (Enthalpie) [kJ/kg]	ρ Dichte [(kg/l)]
Wasser	252	60	4,2	-	1,0
PCM	263	60	2,0	255	0,7

Auch die Bauteilaktivierung über bauteilintegrierte direktelektrische Systeme scheidet aus Kostengründen aus, da hier die flächenbezogenen Kosten etwa um den Faktor 3 höherliegen als bei einem entsprechenden hydraulischen System. Im Rahmen des Forschungsprojekts „Windheizung 2.0“ wurde unter anderem die seit vielen Jahrzehnten im Markt etablierte Technologie der elektrischen Speicherheizungen („Nachtspeicheröfen“) bezüglich ihrer Eignung für das Windheizungskonzept untersucht. Diese Systeme sind zur Nutzung von überschüssigem, nächtlichem Kohle- und Atomstrom zur Raumheizung tagsüber konzipiert. Ihr thermisches Rückhaltevermögen ist somit auf etwa einen Tag hin optimiert, dies ist deutlich zu kurz für einen Windheizungs-Einsatz. Diese Systeme werden deswegen an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Prinzipiell sind derartige Hochtemperaturspeichersysteme jedoch wegen der einfachen Installation, der geringen Investitionskosten und des geringen Platzbedarfs potentiell sehr interessant. Aus diesem Grund wird ein noch in der Konzeptphase befindlicher zentraler, in die Zuluft integrierter Hochtemperatursteinspeicher (vgl. Abschnitt 5.3.5) im Rahmen einer zusätzlichen Seitenstudie bewertet. Da die zu deckenden Restwärmemengen relativ gering sind, fallen auch die effizienteren aber auch teureren Erzeugersysteme wie Pellet-Kessel und alle Wärmepumpen außer Außenluft-Wärmepumpen aus der Bewertung heraus. In den folgenden Untersuchungen werden folglich nur der elektrische Durchlauferhitzer und eine Außenluftwärmepumpe als Erzeuger zur Restwärmedeckung weiter betrachtet. Als klassische Speichertechnologien werden Warmwasserspeicher darunter der Auslegungsspeicher (übliche Auslegung für Solarthermie bei gegebener Kollektorfläche; gewöhnliche Speichergröße) und der Windperiodenspeicher (ausgelegt zur Überbrückung von Brauchwarmwasser- und Heizenergiebedarf zwischen zwei Starkwindereignissen) weiter betrachtet.

Generell zeigt sich im Rahmen der Kostenanalyse eine gewisse aber nicht sehr große Abhängigkeit mit dem gewählten Preissteigerungsszenario. Diese geringe Abhängigkeit ist darin begründet, dass bei hohen Energiepreissteigerungen auch eine hohe Verzinsung herrscht, welche die erhöhten Einsparungen bei den Energiekosten durch eine parallele Erhöhung des Werts der Investitionen kompensiert. Die Kosten für den Windstrom sind ein sehr entscheidender Erfolgsfaktor. Bei einem kostenlosen Windstrom gibt es noch zahlreiche ökonomisch sinnvolle Kombinationen, bei einem reduzierten Windstrompreis von

10,7 ct/kWh ergeben sich kaum mehr wirtschaftliche Lösungen. In Tabelle 18 sind für die 6 unterschiedlichen Preisszenarien die TGA-Varianten zusammengestellt, die den in Abschnitt 4.2 beschriebenen Bewertungskriterien entsprechen. Hierbei handelt es sich ausschließlich um Einfamilienhäuser (Neubau und Sanierung). Trotz des ungünstigen Abschneidens der Bürogebäude bezüglich ihrer Windheizungseignung werden in der Detailanalyse einige Varianten betrachtet, um die genauen Gründe und das thermisch-energetische Verhalten im Bürofall besser verstehen zu können (siehe Abschnitt 5.3, Tabelle 22).

Tabelle 18:
Übersicht aller nach der Grobanalyse in Frage kommenden TGA-Varianten für Einfamilienhäuser für die 6 Preissteigerungsszenarien.

Steigerung			Preisszenario					
			hoch	mittel	gering	hoch	mittel	gering
Windstrom kostenlos			ja	ja	ja	nein	nein	nein
TGA-Variante								
Erzeuger	Speicher	Übergabe						
Durchlauferhitzer	Auslegung	BTA Decke (überdämmt)	x	x	x	x		
Durchlauferhitzer	Auslegung	BTA (überdämmt) Innenwände & Decke	x	x				
Durchlauferhitzer	Windperiode	Fußbodenheizung	x	x	x			
Durchlauferhitzer	Windperiode	BTA Decke	x	x				
Durchlauferhitzer	Windperiode	BTA Innenwände	x	x				
Durchlauferhitzer	Windperiode	BTA Decke (überdämmt)	x	x	x			
Durchlauferhitzer	Windperiode	BTA Innenwände (überdämmt)	x	x	x			
Durchlauferhitzer +Wärmepumpe	Auslegung	BTA Decke (überdämmt)	x	x	x			
Durchlauferhitzer	Windperiode	Radiator	x	x	x			
Durchlauferhitzer	Auslegung	OFA Decke & Innenwände	x	x	x			
Durchlauferhitzer	Windperiode	OFA Innenwände	x	x	x	x		
Durchlauferhitzer	Windperiode	OFA Decke	x	x	x	x		
Durchlauferhitzer	Windperiode	OFA Decke & Innenwände	x	x	x			
Durchlauferhitzer +Wärmepumpe	Auslegung	OFA Decke	x	x	x			
Durchlauferhitzer +Wärmepumpe	Windperiode	OFA Decke	x	x				
Durchlauferhitzer +Wärmepumpe	Windperiode	OFA Innenwände	x	x	x			

5 Ergebnisse der Detailanalyse

5.1 Durchführung der Analysen

Die Detailanalyse dient dazu, die im Verlauf der Grobanalyse als potentiell windheizungstauglich erkannten Varianten im Detail zu bewerten. Diese detaillierten Betrachtungen beziehen sich auf den Windstromdeckungsanteil, den Energiebedarf und dessen Zusammensetzung, das auftretende thermisch Raumklima und den ökologischen Auswirkungen der jeweiligen Variante bezüglich ihres Treibhauspotentials und ihren Verbrauchs an nicht erneuerbarer Primärenergie. Im Rahmen der Detailanalyse wird jede einzelne Windheizungsvariante zusammen mit der jeweiligen Anlagentechnik modelliert und dynamisch simuliert. Diese besteht aus einem Durchlauferhitzer, ggf. einem weiteren Wärmeerzeuger, einem Wasserspeicher (nur bei Einfamilienhaus), einem bzw. mehreren Übergabesystemen und der entsprechenden Regelung. Die verwendeten bzw. entwickelten Regelungsstrategien sind detailliert in Abschnitt 3.4 dokumentiert.

Da die Simulationen, die sowohl das Luftströmungsmodell als auch detaillierte Modelle der TGA einschließen, sehr zeitintensiv sind, wird lediglich die zu betrachtende 6 - monatige Heizperiode von Oktober bis März und zusätzlich eine 14 - tägige Einschwingzeit simuliert. Während der Sommerperiode, in der die Heizung als inaktiv angenommen wird, wird lediglich der Endenergiebedarf für die Brauchwarmwasser-(BWW)-Bereitung ermittelt. Da es in der Sommerperiode deutlich weniger Starkwindereignisse gibt wird angenommen, dass der BWW-Bedarf ausschließlich durch die Solarthermie und durch Reststrom gedeckt wird. Da hier, abgesehen von der Speichergroße, das TGA-System kaum einen Einfluss hat, wird die BWW-Endenergie für beide Speichergroßen für jedes Gebäude jeweils einmal berechnet. Zur Berechnung der jährlichen Endenergiebedarfe werden diese Energiemengen den simulierten winterlichen Heizenergiemengen als feste Werte zugeschlagen. In der Heizperiode sind die Solarthermie-Erträge durch die ggf. unterschiedliche Bedeckung der Kollektoren mit Schnee mit sehr großen Unsicherheiten behaftet. Zudem sind hier relativ geringe Erträge zu erwarten. Diese sind annähernd unbeeinflusst von der Speichergroße und folglich für alle Varianten nahezu identisch. Aus diesem Grund werden die Solarthermie-Erträge für die Heizperiode nicht berücksichtigt. Anders als in der Grobanalyse wird für die Fälle der Einfamilienhäuser die gezapfte Menge an Brauchwarmwasser explizit in der Simulation der TGA bzw. des Speichers berücksichtigt.

Die Hilfsenergiemengen werden in der Detailanalyse berücksichtigt. Da die konstant erforderliche Hilfsenergie fast ausschließlich außerhalb der Starkwindereignisse bezogen werden muss und keine elektrischen Speicher betrachtet werden, kann es in der Detailanalyse keine Windheizungsvarianten mit einer vollständigen Windstromdeckung geben. Die angesetzten Hilfsenergiemengen sind einer Berechnung der Gebäude nach DIN V 18599 [3] entnommen und werden den mit Hilfe der Simulationen errechneten Energiemengen als feste Werte nach Tabelle 19 zugeschlagen.

Tabelle 19:
Angesetzte Hilfsenergiemengen für die Detailanalyse.

	Hilfsenergiebedarf [kWh/a]						Gesamt
	Heizung*		BWW			Lüftung*	
	Erzeugung	Verteilung	Erzeugung	Speicherung	Verteilung		
Einfamilienhaus, Neubau, Referenz	337	202	97	15	63	252	966
Einfamilienhaus, Neubau, Windheizung		39			63	668	770
Einfamilienhaus, Sanierung, Referenz	300	106	67	11	38	193	716
Einfamilienhaus, Sanierung, Windheizung		29			33	337	399
Büro, Neubau, Referenz	214	523				8.735	9.473
Büro, Neubau, Windheizung		122				22.345	22.467
Büro, Sanierung, Referenz	225	597				8.735	9.558
Büro, Sanierung, Windheizung		145				22.345	22.490

*Betrieb während der Heizperiode nach DIN V 18599 [3]. Normwerte geben den aktuellen Marktdurchschnitt wieder. Im Einzelfall sind bei einer umfassenden Systemoptimierung noch geringere Verbräuche z. B. für die Ventilatoren der Lüftungsanlage oder die Umwälzpumpen der Heizanlage möglich, die zu einem noch höheren Deckungsgrad für Windstrom führen würden.

5.2 Bewertungskriterien

In der Detailanalyse werden nicht wie in der Grobanalyse feste Grenzwerte zum „Bestehen“ der Windheizungseignung festgelegt. Die reduzierte Anzahl von Varianten erlaubt es vielmehr die Ergebnisse der einzelnen Kriterien jeder Variante zu diskutieren und die Vor- und Nachteile der jeweiligen Systemkombinationen darzustellen. Die folgenden sechs Bewertungskriterien werden im Rahmen der Detailanalyse eingesetzt.

Endenergiebedarf und dessen Zusammensetzung:

Die durch die Simulationen ermittelten Energiemengen werden für den Sommer- und Winterzeitraum derart zusammengefasst, dass neben dem solaren BWW aus der Sommerperiode der Energiebedarf für die Beheizung, das BWW (während des Winters) und die Hilfsenergie jeweils getrennt für die Deckung über Wind- und über Reststrom vorliegt. Da die Anlagentechnik für die Detailanalyse mit berechnet wird, liegt nun nichtmehr nur der Restwärmebedarf sondern der daraus resultierende Reststrombedarf vor. Der Energiebedarf eines Windheizungsgebäudes und dessen Zusammensetzung ist aus mehreren Gründen ein wichtiger Faktor. Zum einen ist er ein zentraler Eingangsparameter für alle anderen in der Detailanalyse verwendeten Bewertungskriterien. Auch der Energiebedarf eines Windheizungsgebäudes ist den Anforderungen der EnEV unterworfen. Wäre der Endenergiebedarf zu hoch wäre es auf Grund des ungünstigen Primärenergiefaktors für elektrischen Strom nicht mehr möglich die

Grenzwerte der EnEV bezüglich des Primärenergiebedarfs einzuhalten. Ein zu hoher Endenergiebedarf wäre vor allem dann für den Nutzer eines entsprechenden Gebäudes kritisch, wenn ein dem Windheizungskonzept zu Grunde liegender entsprechender Windheizungstarif nicht mehr zu den entsprechenden Konditionen bzw. gar nicht mehr verfügbar ist. In diesem Fall würden dem Nutzer Strom- bzw. Wärmekosten entstehen, die im Rahmen dieser Studie nicht mehr wirtschaftlich darstellbar sind.

Windstromdeckung

Die Windstromdeckung beschreibt welcher Anteil des um die solare Deckung (anteilig Brauchwarmwasser im Sommer) reduzierten jährlichen Endenergiebedarfs für Raumheizung, Brauchwarmwasserbereitung und Hilfsenergie einer Windheizungsvariante durch Windstrom gedeckt werden kann, der während eines Starkwindereignisses in Wärme umgewandelt und eingespeichert wird. Die Windstromdeckung stellt den Anteil des Bezugs an elektrischem Strom während eines Starkwindereignisses im Verhältnis zum Gesamtstrombedarf dar. Die Aufgabe im Rahmen der hier beschriebenen Studie ist es nicht nur ein möglichst energieeffizientes Gebäude zu entwickeln, sondern auch ein Gebäude das seinen Wärmebedarf hauptsächlich durch die netzdienliche Aufnahme von Überschussstrom decken kann. Die Windstromdeckung die sich aus den im Rahmen der Detailanalyse simulierten, Wind- und Reststrommengen zusammensetzt, ist hierfür eine geeignete Messgröße.

Die Kosten bzw. die resultierende Wirtschaftlichkeit ist für viele Bauherren bzw. Investoren ein entscheidendes Kriterium sich für den Bau eines Windheizungsgebäudes bzw. für die Sanierung auf einen entsprechenden Standard zu entscheiden. Die Bewertung der Differenzkosten zum Referenzfall mit EnEV 2014 Standard erfolgt nach der Kapitalwertmethode über einen Bewertungszeitraum von 25 Jahren. Die im Rahmen der Detailanalyse durchgeführten Kostenermittlungen sind identisch mit denen der Grobanalyse, lediglich die erforderliche Wind- und Reststrommengen, inklusive des Bedarfs für BWW, werden den inklusive Anlagentechnik durchgeführten Simulationsrechnungen der Windheizungsvarianten entnommen und entsprechend angepasst. Analog zur Differenzkostenbewertung der Grobanalyse werden auch bei der detaillierten Betrachtung die sechs in Tabelle 15, Abschnitt 3.6 beschriebenen Preissteigerungsszenarien berechnet und für jede einzelne Variante dargestellt.

Ökologische Bewertung

Für die ökologische Bewertung werden folgende Bewertungsgrößen berücksichtigt:

- das Treibhauspotenzial (GWP), als Beitrag zur Klimaerwärmung (zunehmende Erwärmung der Troposphäre) durch anthropogene Treibhausgase,
- der nicht-erneuerbare Primärenergiebedarf, als Beitrag zur Nutzung fossiler, energetischer Ressourcen, der sowohl den Energiebedarf an den jeweiligen

Energieträgern als auch die Energiemengen aus vorgelagerten Prozessketten, der Umwandlung und der Verteilung der Energieträger berücksichtigt.

Diese stellen international akzeptierte und diskutierte Größen dar (DIN EN 15978 [39]) und unterliegen wissenschaftlich anerkannten Wirkungsmodellen. Ein hoher Beitrag zur Klimaerwärmung (GWP) drückt sich häufig auch mit einem hohen Beitrag zur Nutzung nicht-erneuerbarer primärenergetischer Ressourcen aus. Dies ist insbesondere bei den hier vorliegenden Systemen bzw. Konzepten der Fall, deren Energiebedarfe vorrangig durch fossile Energie gedeckt sind. Das ist der Fall, da es sich dann um einen aus fossilen Energieträgern erzeugten Reststrom handelt, mit dessen Produktion ein signifikanter CO₂-Ausstoß verbunden ist.

Thermische Behaglichkeit

Zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit liegen nach jeder Simulation einer Variante die berechnete Raumluft- und Operativtemperatur in jeder definierten Zone als Stundenmittelwert vor. In den Einfamilienhäusern werden die Temperaturen raumweise berechnet, im Bürobau je Etage für zusammengefasste Büros, sowie für die Besprechungsräume und das Archiv. Ziel ist die Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit mit dieser Menge an Daten für das gesamte Gebäude. Mit den simulierten Raumluft- und Operativtemperaturen, sowie weiteren angenommenen, im nächsten Absatz dokumentierten, Parametern kann das menschliche Wärmeempfinden für den Körper als Ganzes vorausgesagt werden. Das vorausgesagte mittlere Votum (engl. *predicted mean vote*), der PMV-Index, nach DIN EN ISO 7730 [40], wird hierfür als Indikator stündlich berechnet und weiterführend ausgewertet, wie häufig dieser in den entsprechenden Kategorien über alle Zonen lag. Die Gesamtbewertung der thermischen Bedingungen des Innenraumklimas erfolgt somit auf Basis der empfohlenen Bewertung nach DIN EN 15251, Kapitel 10.3 [23]. Der prozentuale Anteil der Zeit, in der der PMV-Index innerhalb Kategorien I, II oder III lag, wird berechnet und über alle bewerteten Räume zusammengefasst. Räume mit abweichendem gewünschtem Temperaturkorridor (Badezimmer und Schlafzimmer im Wohnungsbau), sowie Flure und Treppenhäuser im Bürobau werden bei der Bewertung nicht berücksichtigt. Bei Bürogebäuden wird nur die Nutzungszeit von 7 – 18 Uhr bewertet. Kategorie I beschreibt ein hohes Maß an Erwartungen, empfohlen für Räume, in denen sich sehr empfindliche und anfällige Personen mit besonderen Bedürfnissen aufhalten. Kategorie II ist der geforderte Standard zur Untersuchung. Beide Kategorien können für die betrachteten Gebäude somit als optimal angesehen werden. Kategorie III beschreibt ein annehmbares, moderates Maß an Erwartungen und ist grenzwertig zu betrachten, da sie nur für Bestandsgebäude zulässig ist. Werte außerhalb (Kategorie IV) sollten nur für einen begrenzten Teil des Jahres vorhanden sein und sind hier kritisch zu bewerten. Eine Kategorie gilt noch als erfüllt, wenn 95 % des Gebäudevolumens während 95 % der Nutzungszeit die geltenden Kriterien erfüllt.

Neben den durch die Simulation bestimmten Eingangsgrößen für den PMV-Index (Raumluft- und Strahlungstemperatur) werden die Raumlufffeuchte auf 40 % (im Winter), die Luftgeschwindigkeit auf 0,1 m/s, der Aktivitätsgrad auf 1,2 met, die mechanisch verrichtete Arbeit auf 0, sowie der Bekleidungsfaktor auf 0,95 clo als weitere Einflussfaktoren festgelegt. Die Grenzen der Einteilung des PMV-Index sind nach dem Beispiel empfohlener Kategorien nach DIN EN 15251, Kapitel A.1 [23] für maschinell geheizte Gebäude bestimmt. Ein PMV zwischen - 0,2 und + 0,2 entspricht Kategorie I, zwischen - 0,5 und + 0,5 Kategorie II und zwischen - 0,7 und 0,7 Kategorie III.

5.3 Ergebnisse Detailanalyse

5.3.1 Einfamilienhaus - Neubaufall

Als Ergebnis der Grobanalyse werden für den Neubaufall des Einfamilienhauses die folgenden in Tabelle 20 dargestellten anlagentechnischen Varianten untersucht. Die untersuchten Varianten für den Sanierungsfall des Einfamilienhauses sind in Tabelle 21 dargestellt, die des Bürogebäudes in Tabelle 22.

Tabelle 20:
Übersicht über die in der Detailanalyse betrachteten Varianten des Einfamilienhaus Neubaufalls.

Technologie										
Durchlauferhitzer	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Außenluft-Wärmepumpe (Restwärme)										x
Auslegungsspeicher (üblicher WW-Speicher)	x								x	x
Windperiodenspeicher (großer WW-Speicher)		x	x	x	x	x	x			
Bauteilaktivierung Decke		x							x	x
- überdämmt	x									
Bauteilaktivierung Innenwände			x							
- überdämmt										
Aktivierung Deckenoberflächen				x						
Aktivierung Innenwandoberflächen					x					
Fußbodenheizung							x			
Radiatoren								x		
Nicht geeignet für / nicht untersucht mit Holzbauweise (H)	H	H	H						H	H

Grundlegende Unterschiede zwischen Windheizungs- und Referenzgebäude

In Anhang 4 sind die Ergebnisse der Detailanalyse für das Einfamilienhaus Neubau für die Referenz und alle betrachteten Windheizungsvarianten dargestellt. Hier kann man erkennen, dass alle Windheizungsfälle deutlich weniger Endenergie benötigen als der EnEV-Referenzfall. Auch weist der Referenzfall mit dem Öl-Brennwertkessel als Wärmeerzeuger technologiebedingt keinen Windstrombedarf und somit keine Windstromdeckung auf. Bedingt durch die Unterschiede im Endenergiebedarf und der Nutzung verschiedener Energieträger, ergeben sich für alle Windheizungsvarianten im Vergleich zur Referenz geringere Umweltwirkungen über den Lebenszyklus. Die Umweltwirkungen im Referenzfall sind dabei ausschließlich durch den Gebäudebetrieb bestimmt. Die Umweltwirkungen für die Varianten der Windheizungsgebäude setzen sich, wie in Abschnitt 3.7 definiert, aus einem Anteil für die Gebäudekonstruktion (Mehr- bzw. Minderaufwand im Vergleich zur Referenz) und einem Anteil für den Gebäudebetrieb zusammen. Wegen der hohen Korrelation der beiden berücksichtigten ökologischen Bewertungskriterien (siehe Abschnitt 5.2) Treibhauspotenzial (GWP) und Primärenergiebedarf nicht-erneuerbar, werden diese in den nachfolgenden Ergebnisdiskussionen zusammenfassend unter dem Begriff „ökologische Kriterien“ geführt. Die Referenz mit ihrem konstanten Solltemperaturprofil und der guten Regelbarkeit der permanent verfügbaren Wärmequelle weist ein sehr gutes thermisches Raumklima auf. In allen Windheizungsvarianten steht immer ausreichend Wärme zur Verfügung, ggf. durch die Restwärmedeckung außerhalb von Windstromzeiten. Aus diesem Grund treten bei keiner Betrachtung bzw. Variante innerhalb dieser Studie grenzwertige oder kritische Unterkühlungen auf. Auf Grund der begrenzten Regelbarkeit kommt es allerdings bei einigen Varianten zu Überwärmungseffekten. Die Differenzkosten der Referenz sind gleich Null, da die Referenz selbst die Bemessungsgrundlage der Berechnung der Kostendifferenz darstellt. Generell erreichen die meisten Windheizungsvarianten nur bei kostenlosem Windstrom die Kostengleichheit mit der Referenz. Es fällt auf, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen betrachteten Bauweisen Ziegel, Beton und Holz sehr gering und den Einflüssen der Unterschiedlichen TGA-Varianten untergeordnet sind, solange diese Technologie mit der jeweiligen Bauweise überhaupt sinnvoll realisiert werden kann. Aus diesem Grund werden in den weiteren Betrachtungen die unterschiedlichen Bauweisen zusammengefasst bewertet. Die jeweiligen Variantennummern werden in Klammern dargestellt. „(1 - 3)“ bezeichnet z.B. die Windheizungsvarianten mit dem Radiator-Heizsystem mit den Nummer 1 bis 3.

Vergleich von Windheizungsvarianten mit großem Wasserspeicher und Radiatoren bzw. Fußbodenheizung

Zuerst werden zwei Windheizungsvarianten betrachtet, bei denen sowohl die Wind- als auch die Restwärme von einem direktelektrischen Durchlauferhitzer bereitgestellt wird und der Windstrom in einem großen Warmwasserspeicher (Windperiodenspeicher), ausgelegt zur Überbrückung des Brauchwarmwasser- und Heizenergiebedarfs zwischen zwei Starkwindereignissen, eingelagert wird. Hierbei handelt es sich um 2 Systeme mit konventioneller Übergabe, um Radi-

atorheizkörper (1-3) und Fußbodenheizungen (4-6). Wie alle Varianten mit Windperiodenspeicher weisen beide Systemvarianten eine hohe Windstromdeckung bzw. einen geringen Reststrombedarf auf. Bezüglich des Endenergiebedarfs fällt auf, dass die Varianten mit Radiatoren zwar einen etwas höheren Reststrombedarf, in Summe aber einen geringeren Endenergiebedarf aufweisen als die Varianten mit Fußbodenheizung. Die etwas höhere Windstromdeckung resultiert aus den geringen Vorlauftemperaturen der Fußbodenheizung, welche den nutzbaren Temperaturhub im Speicher und damit die nutzbare Speicherkapazität vergrößern. In der Komfortbewertung ist zu erkennen, dass die Varianten mit Fußbodenheizung auf Grund der höheren Systemträgheit geringfügig wärmer sind, was den insgesamt höheren Endenergiebedarf erklärt. Da für beide Windheizungsvarianten im Gebäudebetrieb fast ausschließlich Windstrom mit geringem Beitrag zu den Umweltwirkungen bezogen wird (siehe Bild 21

Bild 21 und Bild 22, Abschnitt 3.7), sind die wesentlichen ökologischen Einflussfaktoren der Mehraufwand für die Konstruktion eines Windheizungsgebäudes sowie die absolute Höhe des Reststrombedarfs. Der Beitrag des Mehrbedarfs der Gebäudekonstruktion an den Umweltwirkungen über den Lebenszyklus ist bei diesen Varianten etwa doppelt so hoch wie der Beitrag des Reststrombedarfs. Aus ökologischer Sicht ergeben sich ebenfalls nur leicht verringerte Umweltwirkungen für die Varianten mit Fußbodenheizung im Vergleich zu den Varianten mit Radiatoren. Damit können beide Windheizungsvarianten (sowohl in Ziegel-, Beton- und Holzbauweise umgesetzt) als ökologisch annähernd gleichwertig charakterisiert werden. Thermisch gesehen sind alle diese Varianten als optimal zu betrachten, da die grenzwertige (orangene) Kategorie III seltener als 5 % der Nutzungszeit vorliegt [23]. Kostentechnisch sind diese beiden Varianten als gleichwertig zu sehen.

Bewertung der Windheizungsvarianten mit großem Wasserspeicher und Bauteilaktivierung in den Decken bzw. Innenwänden

Vergleicht man die Ergebnisse der Windheizungsvarianten mit Fußbodenheizung (4 - 6) mit den Windheizungsvarianten mit Bauteilaktivierungen (BTA) in den Decken (7 - 8) und in den Innenwänden (9 - 10) stellt man fest, dass die Unterschiede ebenfalls sehr gering sind. Dies ist darin begründet, dass auch hier der Energiegehalt des großen Windperiodenspeichers zur Verfügung steht. Zusätzlich kann die BTA, ähnlich einer Fußbodenheizung, im Wesentlichen als flächiges Übergabesystem genutzt werden. Auf Grund höherer Trägheit der BTA im Vergleich zur Fußbodenheizung, fällt die Höhe des Endenergiebedarfs (fast ausschließlich durch Windstrom gedeckt) bei diesen Varianten noch etwas höher aus. Dieser Effekt ist analog zu dem Vergleich zwischen Radiatoren und Fußbodenheizung (1 - 3 / 4 - 6). Zudem fällt auf, dass die BTA-Systeme etwas mehr zur Überwärmung tendieren als andere Übergabesysteme. Der Grund hierfür ist, dass durch die während der Starkwindphasen erhöhte Raumsolltemperatur relativ große Energiemengen in den Bauteilen eingespeichert werden. Die daraus resultierende, unregelmäßige Wärmeabgabe in den Raum kann vor allen in den Zeiten direkt nach einer Windstrom-Einspeicherung nicht immer vollständig genutzt werden, führt also zu Übertemperaturen. Als Folge dieser

Überwärmungen müssen die Varianten mit Innenwand-BTA als grenzwertig, die Decken-BTAs sogar als kritisch bezüglich des thermischen Komforts betrachtet werden. Diese Einschränkung der Systemvarianten mit BTA kann bei Vorhandensein eines Windperiodenspeichers durch eine regelungstechnische Optimierung verhindert werden, da in diesem Fall das Einspeichern von Wärme in die Räume bzw. deren Bauteile nicht erforderlich ist. Auch ist auffällig, dass unter der Annahme von kostenlosem Windstrom, also wenn die Höhe des Windstrombedarfs keine finanziellen Auswirkung hat, die BTA-Systeme ökonomisch günstiger ausfallen als die bisher betrachteten Übergabesysteme. Dies liegt daran, dass sowohl die flächenbezogenen Investitionskosten als auch die Flächensumme der aktivierten Bauteile geringer sind als bei der Fußbodenheizung.

Bewertung der Windheizungsvarianten mit großem Wasserspeicher und oberflächennaher Bauteilaktivierung an den Decken bzw. Innenwänden

Ähnliche Ergebnisse gelten für die Windheizungsvarianten mit Übergabesystemen an Decken und Innenwänden, die nicht in ihrem Kern sondern an der Oberfläche aktiviert werden (11 - 16) und ebenfalls über einen Windperiodenspeicher verfügen. Sowohl der Gesamt-Endenergiebedarf als auch die Summe der Überhitzungsstunden sind bei den Varianten mit Oberflächenaktivierung etwas geringer als bei den Systemvarianten mit kernaktivierten Bauteilen (BTA). Auf Grund des oberflächennahen Wärmeeintrags in das Bauteil bei der Oberflächenaktivierung, geht ein höherer Anteil dieser Wärme direkt an die Raumluft. Somit ist die zulässige Obergrenze für die Raumtemperatur schneller erreicht und die Regelung deaktiviert die Beladung des Bauteils früher. Die Beladung des Windperiodenspeichers wird deswegen nicht vorzeitig gestoppt. Die geringere Ladung des Bauteils wirkt sich nicht negativ auf die Windstromdeckung aus, da die notwendige Wärmemenge für die zu überbrückende Periode bereits im Windperiodenspeicher zur Verfügung steht. Derartige Systeme sind allerdings aufwendiger und damit teurer in der Herstellung als bauteilintegrierte Systeme, und liefern somit finanziell gesehen ein etwas ungünstigeres Ergebnis, verglichen mit einer Fußbodenheizung. Oberflächenlösungen sind aber für Sanierungsfälle die einzige Möglichkeit zur Herstellung einer BTA-Lösung. Die Unterschiede zur normalen BTA bezüglich der ökologischen Bewertung sind nicht signifikant.

Bewertung der Windheizungsvarianten mit kleinem Wasserspeicher und Bauteilaktivierung in den Decken

Stellt man die bereits betrachtete Lösung der aktivierten Decken mit einem Windperiodenspeicher (7 - 8) einem identischen System mit einem kleinen Auslegungsspeicher (17 - 18) gegenüber, zeigen sich bei allen Bewertungskriterien deutliche Unterschiede. Der gesamte Endenergiebedarf ist etwas geringer als bei den Varianten mit Windperiodenspeicher da die Wärmeverluste des kleinen Speichers geringer sind, allerdings ist ein signifikant höherer Reststromanteil erkennbar. Entsprechend werden für den hier untersuchten 13 -tägigen Windzyklus nur Windstromdeckungen von etwa 50 % erreicht. Hierdurch wird offen-

sichtlich, dass die Nutzung von Bauteilaktivierung allein, entgegen den Abschätzungen aus der Grobanalyse, nicht ausreicht den Wärmebedarf eines Windheizungsgebäudes über die veranschlagte Überbrückungsperiode (knapp 2 Wochen) zu decken. Dies ist zum einen darin begründet, dass in der Anfangsphase nach dem Laden der Decke zu viel Wärme an die Räume abgegeben wird, die gegen Ende der Überbrückungszeit entsprechend fehlt. Zum anderen wird die Decke durch das erforderliche Nachheizen mit Reststrom (außerhalb der Starkwindereignisse) erwärmt und somit vorgeladen, so dass bei einem Starkwindereignis dann nicht mehr der vollständige Temperaturhub zum Beladen zur Verfügung steht. Bei Vergleich der ökologischen Bewertungskriterien zwischen den Windheizungsvarianten mit Auslegungsspeicher (17 - 18) und Windperiodenspeicher (7 - 8) kann man die verringerten Umweltwirkungen für die Gebäudekonstruktion in Höhe von ca. einem Drittel durch die Reduktion der Warmwasserspeichergröße erkennen. Durch Reduktion der Speichergröße steigt der absolute Reststrombedarf allerdings auf das ca. siebenfache an und erhöht damit proportional die Umweltwirkungen, die durch den Gebäudebetrieb verursacht werden. In Summe ergeben sich für die Windheizungsvarianten mit Auslegungsspeicher deswegen knapp dreifach höhere Umweltwirkungen über den Lebenszyklus als bei Systemvarianten mit großem Windperiodenspeicher. Das Überwärmungsverhalten ist vergleichbar mit den Varianten mit Deckenaktivierung und großem Speicher. Durch die Trägheit des Systems bezüglich des Nachheizens wird das Gebäude minimal kühler, Komforteinschränkungen bezüglich Unterkühlung sind allerdings auch hier nicht zu erwarten. Finanziell gesehen werden die Einsparungen bei der Investition durch den Wegfall des Windperiodenspeichers durch die erhöhten Reststromkosten kompensiert.

Bewertung der Windheizungsvarianten mit kleinem Wasserspeicher und überdämmter Bauteilaktivierung in den Decken

Um die geringe Windstromdeckung der zuletzt betrachteten TGA-Variante (17 - 18) zu verbessern, wird die aktivierte Decke zur Erhöhung ihrer Speicherkapazität unterseitig mit 2 cm Kalziumsilikat überdämmt, um einen größeren Temperaturhub realisieren zu können (19 - 20). Verglichen mit der nicht überdämmten Deckenaktivierung steigt die Windstromdeckung um 10 % an, erreicht aber immer noch nur Werte von etwa 60 %. Auf Grund der gewählten Erhöhung der Deckentemperatur ergeben sich etwas stärkere Überhitzungen und ein höherer Endenergiebedarf als ohne Überdämmung. Die etwas erhöhte Windstromdeckung, und der damit verringerte Reststrombedarf, wirkt sich ökologisch vorteilhaft auf die Umweltwirkungen im Gebäudebetrieb aus und verringert gleichsam die Umweltwirkungen über den Lebenszyklus. Der konstruktive Mehraufwand für die zusätzliche Überdämmung mit Kalziumsilikat erhöht die Umweltwirkungen, verursacht durch die Gebäudekonstruktion, nur unwesentlich. Die zusätzlichen Investitionskosten für die Deckendämmung werden für die hier untersuchten Decken-Beladetemperaturen durch die Reduktion der Reststromkosten nicht ausgeglichen. Eine Erhöhung der Dicke der Dämmung der BTA bringt ebenso keinen Vorteil, da zwar bei gleichbleibendem thermischen Komfort die Decke weiter aufgeheizt werden kann, allerdings reduziert

die erhöhte Dämmung wiederum die passive Entladung der Decke und erfordert daher noch höhere Nachheiztemperaturen. Aktive Entladungssteuerungen werden in dieser Studie nicht betrachtet.

Es ist naheliegend, dass bei der Wahl einer niedrigeren Bauteilbeladung die Überwärmungen, der Endenergiebedarf und die Windstromdeckung vergleichbar mit der normalen BTA ausfallen werden. Auf Grund des geringeren Wärmeübergangs zwischen Decke und Raum ist der Wärmestrom aus der Decke bereits bei einer höheren Deckentemperatur nicht mehr ausreichend zur Erhaltung der Solltemperaturen im Raum. Die mögliche Überbrückungszeit erhöht sich folglich trotz der höheren Speichertemperatur nicht signifikant.

Bewertung der Windheizungsvarianten mit kleinem Wasserspeicher, Bauteilaktivierung in den Decken und einer Außenluftwärmepumpe

Abschließend wird für den Einfamilienhaus-Neubau eine Windheizungsvariante untersucht, die eine nicht überdämmte Deckenaktivierung mit kleinem Auslegungsspeicher (17 - 18) zur Restwärmedeckung mit einer Außenluftwärmepumpe ergänzt (21 - 22). Durch diese Maßnahme steigt die Windstromdeckung im Vergleich zu den Windheizungsvarianten mit Durchlauferhitzer (17 - 18) auf etwa 60 % an. Bei der Betrachtung der Endenergie muss beachtet werden, dass bei den Wärmepumpen die Reststrommengen für Heizen und BWW im Winter nicht getrennt bewertet werden können, da es sich um denselben Erzeuger handelt. Bei dieser Variante zeigt sich, dass die genutzten Windstrommengen geringer sind als bei der Variante mit Durchlauferhitzer, aber ohne Wärmepumpe. Dies liegt daran, dass die Wärmepumpe im Gegensatz zu einem Durchlauferhitzer das Zapfwasser nicht direkt erwärmen kann, da sie zwingend in Kombination mit einem Pufferspeicher betrieben werden muss. Dadurch ist der obere Teil des Pufferspeichers, der stets auf BWW-Temperatur gehalten werden muss, bei Beginn einer Starkwindperiode bereits signifikant vorgewärmt und kann somit durch den reduzierten Temperaturhub weniger Wärme aus Windstrom aufnehmen. Trotzdem ist der Bedarf an Reststrom auf Grund der günstigen Arbeitszahl der Wärmepumpe gegenüber der entsprechenden Windheizungsvariante mit Durchlauferhitzer (17 - 18) reduziert. Der konstruktive Mehraufwand durch Nutzung einer Wärmepumpe ist im Rahmen der ökologischen Bewertung von untergeordneter Bedeutung. In absoluter Höhe sind die Umweltwirkungen für die Gebäudekonstruktion in beiden Windheizungsvarianten vergleichbar. Unterschiede in den Umweltwirkungen über den Lebenszyklus sind auch hier maßgeblich von der absoluten Höhe des Reststrombedarfs bestimmt. Bei Nutzung der Wärmepumpe beträgt der Reststrombedarf nur noch knapp 50 % des Reststrombedarfs der vergleichbaren Windheizungsvarianten mit Durchlauferhitzer (17 - 18). Dies führt folglich zu einer entsprechenden Reduktion in den Umweltwirkungen über den Gebäudebetrieb bzw. Lebenszyklus. Aus raumklimatischer Sicht hat die Wärmepumpe keine Auswirkungen verglichen mit den identischen Varianten ohne Wärmepumpe (17 - 18). Kostenmäßig ist die hier untersuchte Wärmepumpenvariante relativ günstig verglichen mit den anderen Windheizungsvarianten. Entgegen den bisher betrachteten Varianten zeigt sich bei der Nutzung einer Wärmepumpe zur

Restwärmedeckung ein relativ geringer Unterschied zwischen den 6 Preissteigerungsszenarien.

5.3.2 Einfamilienhaus - Sanierungsfall

Beim Einfamilienhaus im Fall der Sanierung werden Varianten (siehe Tabelle 21) mit Durchlauferhitzer zur Wärmeerzeugung während Starkwindperioden und verschiedenen Warmwasserspeichergrößen in Kombination mit unterschiedlich aktivierten (teils überdämmten) Bauteilen analysiert. Ebenfalls werden Varianten untersucht, bei denen der Wärmebedarf in der Überbrückungsperiode zwischen zwei Starkwindereignissen über eine Außenluftwärmepumpe gedeckt werden soll. Speziell wurde darauf geachtet, dass die Aktivierung der Bauteile nur oberflächennah erfolgt, da nur diese Ausführung im Rahmen einer Sanierungsmaßnahme nachgerüstet werden kann.

Tabelle 21:
Übersicht über die in der Detailanalyse betrachteten Varianten des Einfamilienhaus Sanierungsfalls.

Technologie												
Durchlauferhitzer	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Außenluft-WP (Restwärme)										x	x	x
Auslegungsspeicher (üblicher Warmwasserspeicher)	x	x	x						x	x		
Windperiodenspeicher (großer Warmwasserspeicher)				x	x	x	x				x	x
Bauteilaktivierung Decke	x		x							x		
- überdämmt												
Bauteilaktivierung Innenwände		x	x									
- überdämmt												
Aktivierung Deckenoberflächen						x			x		x	
Aktivierung Innenwandoberflächen								x	x			x
Fußbodenheizung				x								
Radiatoren					x							
Nicht geeignet für / nicht untersucht mit Holzbauweise (H), Ziegelbauweise (Z)	H	H	H						H	H		
		Z										

In Anhang 4 sind die Ergebnisse der Detailanalyse für das Einfamilienhaus im Sanierungsfall für die Referenz und alle betrachteten Windheizungsvarianten dargestellt. Generell lassen sich die meisten am Neubaufall des Einfamilienhauses abgeleiteten Erkenntnisse auch auf den Sanierungsfall übertragen. Der resultierende Endenergiebedarf der Windheizungsvarianten liegt deutlich unter dem Endenergiebedarf des EnEV-Referenzfalls. Dies ist im Wesentlichen durch den gehobenen Dämmstandard und die Wärmerückgewinnung der mechanischen Lüftung bedingt. Im Vergleich zur Referenz ergeben sich wie bereits im Neubaufall für alle Windheizungsvarianten des sanierten Einfamilienhauses ge-

ringere Umweltwirkungen über den Lebenszyklus. Dies ist durch die Unterschiede im Endenergiebedarf und dessen Deckung durch teilweise regenerativ erzeugten Strom bedingt. Die thermische Behaglichkeit gemessen an den PMV-Kategorien liegt im Referenzfall innerhalb der geforderten Kategorie II (siehe Randbedingungen; Temperaturbereiche in Abschnitt 3.2) für ein normales Maß an Erwartungen, empfohlen für neue und renovierte Gebäude [23]. Auch hier sind bei der Referenz die Differenzkosten, als Bemessungsgrundlage der Windheizungsvarianten gleich Null. Deutliche Unterschiede in Hinblick auf die Bauweisen, Ziegel, Beton, oder Holz sind auch im Fall Sanierung des Einfamilienhauses nicht erkennbar, so dass auch hier die Bauweisen zur Interpretation der Simulationsergebnisse weitestgehend zusammengefasst werden können.

Vergleich von Windheizungsvarianten mit großem Wasserspeicher und Radiatoren bzw. Fußbodenheizung

Wie beim Neubau werden zuerst die beiden TGA-Varianten mit Durchlauferhitzer, Windperiodenspeicher und konventionellem Heizungsübergabesystemen, den Radiatorheizungen (31 - 33) und der Fußbodenheizung (34 - 36) betrachtet. Die hohe Windstromdeckung resultiert aus der Auslegung des Windperiodenspeichers, welcher entsprechend die Reststromphase zwischen den Starkwindereignissen überbrücken soll. Dennoch ist deutlich erkennbar, dass bei Varianten mit Radiatorheizkörpern der Deckungsanteil geringer ausfällt. Dies ist auf die höheren erforderlichen Vorlauftemperaturen des Übergabesystems zurückzuführen. Während die Fußbodenheizung noch mit niedrigeren Temperaturen im Wasserspeicher betrieben werden kann, muss bei der Radiatorheizung das Wasser aus dem Speicher bereits früher nachgeheizt werden, um die Soll-Vorlauftemperatur aufrecht zu erhalten. Ein geringfügig höherer Endenergiebedarf der Holzbauweisen ist auf die geringere thermische Speicherfähigkeit der indirekt oder direkt beladenen Bauteile sowie auf die daraus resultierenden etwas wärmeren Innenraumtemperaturen, gezeigt am PMV-Index zurückzuführen. Auch eintreffende Solarstrahlung über die Fenster erwärmt hier schneller die Raumluft, da weniger Wärme über die leichten Innenwände gespeichert werden kann. Dennoch liegt auch bei der Holzbauweise die thermische Behaglichkeit in Kategorie II, der Anteil an Kategorie III liegt unterhalb der maximal zulässigen 5 % Überschreitungzeit. Die Differenzkosten der Windheizungsvariante mit Windperiodenspeicher und Fußbodenheizung liegen unter der Annahme einer hohen Strompreissteigerung und kostenlosem Windstrom gleichauf mit der Referenz. Wesentliche ökologische Einflussfaktoren sind die absolute Höhe des Reststrombedarfs und der Mehraufwand für die Gebäudekonstruktion. Der ökologische Mehraufwand für die Gebäudekonstruktion im Vergleich zur Referenz stellt sich bei beiden Systemvarianten (Radiatoren, Fußbodenheizung) (31 - 36) in ähnlicher Größenordnung dar. Im Gebäudebetrieb ergeben sich Unterschiede in den Umweltwirkungen. Die Systemvariante mit Radiatoren hat im Vergleich zur Systemvariante mit Fußbodenheizung einen ca. dreifach höheren Reststrombedarf und daraus resultierend einen ca. dreifach höheren Beitrag des Gebäudebetriebs zu den Umweltwirkungen im Lebenszyklus. Deswegen stellt sich auch aus ökologischer Sicht die Variante mit Fußbodenheizung hierbei als vorteilhafter dar.

Bewertung der Windheizungsvarianten mit großem Wasserspeicher und oberflächennaher Bauteilaktivierung an den Decken bzw. Innenwänden

Folgend werden die Varianten mit Durchlauferhitzer und Windperiodenspeicher betrachtet, bei denen anstelle der Fußbodenheizung die Innenwand- oder Deckenoberflächen als Heizübergabesystem aktiviert werden (37 – 42). Windstromdeckungsanteil, Endenergiebedarf, ökologische Kriterien und thermische Behaglichkeit sind vergleichbar wie bei der Windheizungsvariante mit Fußbodenheizung (34 - 36). Jedoch im Hinblick auf die Differenzkosten, schneiden diese Varianten besser ab, da die Summe der aktivierten Flächen und damit die Investitions- und Wartungskosten deutlich geringer sind. Bei kostenlosem Windstrom fallen geringere Kosten als im Referenzfall an. Speziell in den betrachteten Varianten bei denen die aktivierte Deckenoberfläche in erster Linie als Übergabesystem dient (40 – 41) und vorgreifend (50 - 51) ist der interzonale Luftaustausch nicht ausreichend, um auch die Zimmer im Dachgeschoss zu beheizen. Es musste ein Viertel der Dachfläche aktiviert werden, damit auch diese Zimmer aktiv beheizt werden können.

Bewertung der Windheizungsvarianten mit kleinem Wasserspeicher und oberflächennaher Bauteilaktivierung an den Decken bzw. Innenwänden

Ersichtlich anders fallen (analog zum Einfamilienhaus-Neubau) die Varianten mit Auslegungsspeicher anstelle des Windperiodenspeichers aus. Der Auslegungsspeicher hat ein für die Anlagentechnik übliches und deutlich kleineres Volumen, verglichen mit dem Windperiodenspeicher der zur Überbrückung von Brauchwarmwasser- und Heizenergie der Periode zwischen zwei Starkwinderignissen ausgelegt ist. Deshalb dienen hier primär die durch das Heizwärmeübergabesystem aktivierten Bauteile als Wärmespeicher. Von aktivierten Decken und Innenwandoberflächen im Ziegel- und Betonbau (43 - 44), über überdämmte Innenwände (45), zu überdämmten Innendecken (46 - 47), bis hin zu überdämmten Innenwänden und Decken (48 - 49) erhöht sich die Windstromdeckung von 36 % bis auf 54 %. Mit diesen Windheizungsvarianten kann auch bei dem sanierten Einfamilienhaus der Zeitraum zwischen zwei Starkwindereignissen durch die aktivierte Speichermasse der Bauteile nicht komplett überbrückt werden, es muss mit Reststrom nachgeheizt werden. Im Vergleich zum Neubaufall kommt hinzu, dass für die aktivierte Decke bei dem gewählten Gebäude nur die Innendecke zwischen Erd- und Dachgeschoss aktiviert wird. Diese beheizt somit beide Etagen. Die Kellerdecke des unbeheizten Kellers wird nicht aktiviert. Auch für die thermisch zu aktivierenden Innenwände, steht im Dachraum nur eine Innenwand zur Verfügung. Des Weiteren wird durch die oberflächennahe Aktivierung der Bauteile die Beladung etwas früher gestoppt als bei einer Aktivierung im Bauteilkern, da die maximal zulässige Temperatur im Raum schneller erreicht wird. Deutlich erkennbar ist auch hier, bei Varianten bei denen die Wärme direkt in den Bauteilen eingespeichert wird, der direkte Zusammenhang zwischen Windstromdeckung und thermischer Behaglichkeit. Je mehr Bauteile (Decken und Wände; überdämmt und nicht überdämmt) bzw. umso stärker diese beladen werden, desto länger liegt der PMV-Index in der grenzwertigen Kategorie III und darüber. Die Variante mit oberflä-

chenaktivierten Decken und Wänden im Ziegelbau liegt noch in Kategorie II, im Betonbau mit 6 % Überschreitung in Kategorie III. Die Varianten mit gedämmten Innenwänden, oder Decken liegen in Kategorie III. Die Varianten mit überdämmten Innenwänden und Decken erreichen mit 6 % und 12 % die kritische Kategorie IV. Aufgrund der geringeren Speichergröße der Auslegungsspeicher-Varianten und der hierdurch bedingten Reduktion des Materialeinsatzes, verringern sich die Umweltwirkungen für die Gebäudekonstruktion. Durch den daraus resultierenden ca. drei- bis vierfach höheren Reststromanteil sind allerdings auch erhöhte Umweltwirkungen im Gebäudebetrieb verbunden. In Summe ergeben sich für die Systemvarianten mit Auslegungsspeicher deswegen knapp vierfach höhere Umweltwirkungen über den Lebenszyklus als bei Systemvarianten mit großem Windperiodenspeicher.

Bewertung der Windheizungsvarianten mit großem Wasserspeicher, oberflächennaher Bauteilaktivierung an den Decken bzw. Innenwänden und einer Außenluft-Wärmepumpe

Weitere, in der Detailanalyse betrachtete Varianten mit oberflächenaktivierten Bauteilen heizen in der Reststromphase mit einer Außenluftwärmepumpe anstelle direkt-elektrisch per Durchlauferhitzer nach. Die Windheizungsvarianten mit Wärmepumpe (50 – 55) sind daher vergleichbar mit den Varianten (37 - 42) – jeweils in Kombination mit Windperiodenspeicher und aktivierten Decken oder Innenwänden. Die resultierende Windstromdeckung bei Nutzung der Außenluftwärmepumpe ist etwas niedriger als bei der direktelektrischen Nachheizung, da hier der obere Teil des großen Windperiodenspeichers als Pufferspeicher auf Brauchwarmwassertemperatur gehalten werden muss. Der Endenergiebedarf ist bei allen Systemvarianten mit Wärmepumpe vergleichbar, da der Windperiodenspeicher zur Überbrückung der Reststromphase ausgelegt ist und dieser direktelektrisch durch einen Durchlauferhitzer in der Windperiode beladen wird. Der konstruktive Mehraufwand durch Nutzung einer zusätzlichen Wärmepumpe ist auch hier von untergeordneter Bedeutung. Unterschiede in den Umweltwirkungen über den Lebenszyklus sind maßgeblich von der absoluten Höhe des Reststrombedarfs bestimmt. Dieser ist für die Systemvarianten mit Windperiodenspeicher und zusätzlicher Wärmepumpe (50 - 55) größer als für die vergleichbaren Systemvarianten ohne Wärmepumpe und erhöht gleichsam die Umweltwirkungen im Gebäudebetrieb.

Bewertung der Windheizungsvarianten mit großem Wasserspeicher, überdämmter Bauteilaktivierung an den Decken bzw. Innenwänden und einer Außenluft-Wärmepumpe

Abschließend werden die Windheizungsvarianten mit Außenluftwärmepumpe (56 - 57) zur Deckung der Reststromphase in Kombination mit dem kleineren Auslegungsspeicher und überdämmter Innendecke, den identischen Varianten (46 - 47) ohne Wärmepumpe gegenüber gestellt. Für diese Windheizungsvarianten mit zusätzlicher Wärmepumpe reduziert sich der Reststrombedarf deutlich durch die Arbeitszahl der Wärmepumpe. Dies spiegelt sich ebenfalls in einer höheren Windstromdeckung von 60 % und in einem reduzierten Endenergie-

giebedarf wieder. Folglich ergeben sich Reduktionen in den Umweltwirkungen über den Lebenszyklus im Vergleich zu den ähnlichen Systemvarianten ohne Wärmepumpe (46 - 47).

5.3.3 Bürogebäude

Tabelle 22:
Übersicht über die in der Detailanalyse betrachteten Varianten des Bürogebäudes.

Technologie		
Durchlauferhitzer	x	x
Bauteilaktivierung Decke	x	x
- überdämmt		
Nicht geeignet für / nicht untersucht mit Holzbauweise (H)	H	H

Die Ergebnisse der Grobanalyse ergeben für das Bürogebäude keine wirtschaftliche Variante zur weiteren Bewertung im Rahmen der Detailanalyse. Da im Bürobau häufig zur Kühlung bereits eine BTA eingesetzt wird, sollen diese Varianten dennoch in Hinblick auf ihre Eignung als Windheizungsgebäude sowohl für den Neubau- als auch für den Sanierungsfall untersucht werden (vgl. Tabelle 22). Diese Ergebnisse sind in Anhang 4 dargestellt. Für die Wärmeerzeugung während der Starkwindereignisse kommt ein Durchlauferhitzer zum Einsatz der über hydraulische BTA überdämmt oder nicht überdämmt aktivierte Deckenbauteile belädt. Der Brauchwarmwasserbedarf des Bürogebäudes wird, wie in der Grobanalyse, auch im Rahmen der Detailanalyse des Bürogebäudes wegen der angenommenen dezentralen Bereitstellung nicht berücksichtigt. Da zur Windstromspeicherung ausschließlich die Decken verwendet werden entfallen beim Bürogebäude auch die Warmwasserspeicher.

Abweichend zu den Untersuchungen am Einfamilienhaus, werden bei der Simulation des Bürogebäudes in der Detailanalyse nicht allein Innenbauteile aktiv beladen. Vor-Simulationen haben gezeigt, dass die Büros im obersten Stockwerk deutlich zu kalt werden, da diese dann nur noch passiv von der Decke darunter, bzw. indirekt durch den Fußboden, beheizt werden würden. Die indirekte Beheizung durch interzonalen Luftwechsel ist hier, anders als bei den Einfamilienhäusern, durch die langen Treppenhäuser und Korridore (gegebenenfalls mit zusätzlichen Brandschutztüren) deutlich eingeschränkt. Aus diesem Grund wird beim Bürogebäude auch für das Flachdach eine Bauteilaktivierung vorgesehen und die dadurch auftretenden erhöhten Transmissionswärmeverluste, aufgrund der Beheizung eines Außenbauteils, in Kauf genommen.

Die ermittelte Windstromdeckung beim Bürobau im Sanierungsfall ist gering und reicht von 23 % im Ziegelbau mit oberflächenaktivierten Decken bis maximal zu 38 % bei der Betonbauvariante mit überdämmt Decken. Bei den Neubauvarianten reicht hier die Windstromdeckung von 29 % bis 46 %.

Die Zusammensetzung des Endenergiebedarfs erklärt teilweise diese geringen Windstromdeckungsanteile. Der Anteil für Hilfsstrom, welcher kontinuierlich gedeckt werden muss, also auch zwischen zwei Starkwindereignissen, beträgt etwa ein Drittel des Gesamtbedarfs. Verglichen mit dem Wohnungsbau, ist hier wegen den höheren geforderten Luftwechselraten der deutlich höhere Strombedarf zur mechanischen Lüftung, maßgebend. Des Weiteren ist der zugelassene Temperaturkorridor für die Aufenthaltsräume kleiner und reicht nur von 21 °C bis 24 °C. Es darf demnach bei einem Starkwindereignis in einem Büro höchstens 3 K wärmer werden, bevor die Beladung eines Bauteils spätestens abgeschaltet wird.

Durch den hohen Reststromanteil und der damit verbundenen hohen Umweltwirkungen im Gebäudebetrieb, ist auch hier der konstruktive Mehraufwand aus ökologischer Sicht von untergeordneter Bedeutung. Im Vergleich zur jeweiligen Referenz ergeben sich jedoch auch hier über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, aufgrund des höheren Dämmstandards, verringerte Umweltwirkungen (Reduzierung um knapp die Hälfte).

Der PMV-Index wurde hier im Bürobaubereich nur zur Nutzungszeit, während der Anwesenheit von Personen bestimmt. Kritisch zu betrachten ist hier die thermische Behaglichkeit. Der Raumkomfort liegt, gemessen am PMV-Index, in allen Varianten über der Kategorie III. Dies ist nicht allein auf das technische Konzept der Heizungstechnik, das Beladen der Bauteile während der Starkwindereignisse zurück zu führen. Infolge des hohen Dämmstandards, der Wärmerückgewinnung und der großen Fensterflächen mit innenliegendem textilen Sonnenschutz steigen hier die Raumtemperaturen auch ohne aktiven Betrieb der Heizung deutlich auf Werte von über 26 °C an. Vergleichs-Simulationen mit idealer Heizung und 21 °C Soll-Operativtemperatur, also ohne Beladen der Bauteile sind ebenfalls in Hinblick auf die thermische Behaglichkeit kritisch. Im Sanierungsfall Bürogebäude-Betonbau ohne Bauteilbeladung liegt der PMV-Index 11,7 % der Zeit oberhalb Kategorie III, beim Neubau 14 %. Bei Beladung der Bauteile, also den Windheizungsvarianten, liegt die Überschreitung der Kategorie III beim Fall Sanierung ebenfalls bei 11,7 % und beim Neubau bei 16,9 %. Ein Großteil der thermischen Unbehaglichkeit ist demnach hier nicht den beladenen Bauteilen verschuldet.

Die Kosten liegen bei den in der Detailanalyse untersuchten Varianten über den Kosten der Referenzfälle. Im Vergleich zwischen der Sanierung und dem Neubau sind die Differenzkosten zum Referenzszenario beim Neubau mit Werten zwischen + 100 und + 200 €/m² etwa doppelt so hoch.

5.3.4 Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

Um den Einfluss diverser Annahmen bzgl. der Randbedingungen auf das Ergebnis der Simulationen des Gebäudebetriebs bzw. der Detailanalyse zu identifizieren, wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Als Bezugsvariante für diese Sensitivitätsanalyse werden die beiden Windheizungsvarianten ohne Wärmepumpe, mit Auslegungsspeicher und Bauteilaktivierung in den Decken ohne

(17) und mit Überdämmung (19) am Neubaufall des Einfamilienhauses in Ziegelbauweise verwendet. Diese Sensitivitätsanalyse betrifft die folgenden Parameter.

Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung

Da dieser Studie bereits ein relativ hoher Wirkungsgrad von 90 % für die mechanische Lüftungsanlage zu Grund liegt, wird im Rahmen der Sensitivitätsanalyse eine Anlage mit reduzierter Effizienz von 80 % untersucht.

Luftdichtheit der Gebäudehülle

Bzgl. der Luftdichtheit der Gebäudehülle liegt die Annahme zu Grunde, dass entsprechend den Mindestanforderungen an ein Passivhaus [41] ein n_{50} -Wert von $0,6 \text{ h}^{-1}$ erreicht wird. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wird zusätzlich ein verbesserter Wert der Luftdichtheit (n_{50}) von $0,3 \text{ h}^{-1}$ und ein n_{50} -Wert von $1,5 \text{ h}^{-1}$ untersucht, was der Mindestanforderung nach EnEV für Gebäude mit Lüftungsanlage [22] entspricht.

Höhe des gesamten Gebäude-Luftwechsels

Der Gesamt-Außenluftwechsel der in dieser Studie angesetzt wird, setzt sich aus der Infiltration, dem nutzungsbedingten Fensterluftwechsel und der Luftwechselrate der mechanischen Lüftungsanlage zusammen. In Summe beträgt der Gesamtluftwechsel $0,5 \text{ h}^{-1}$. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wird der Luftwechsel der mechanischen Lüftungsanlage um $0,2 \text{ h}^{-1}$ erhöht sowie verringert um einen Gesamtluftwechsel von $0,3 \text{ h}^{-1}$ bzw. $0,7 \text{ h}^{-1}$ zu erreichen.

Erhöhter Wärmedämmstandard

Als weiterer Parameter wird ein erhöhter Wärmedämmstandard untersucht, bei dem die Dicke der Dämmschicht aller Bauteile der wärmetauschenden Hüllfläche um 5 cm erhöht wird. Hierbei wird der auf die wärmetauschende Hüllfläche bezogene Transmissionswärmeverlust $H'T$ von $0,22$ auf $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ reduziert. Die Brutto-Mehrkosten für das Gebäude werden an Hand der geänderten U-Werte mit Hilfe der in Abschnitt 3.6 beschriebenen Methode auf 2.900 € geschätzt.

Erhöhte Speicherfähigkeit der Decken, ggf. mit Wegfall des Wasserspeichers

Des Weiteren wird untersucht, welche Auswirkung eine größere Dicke der aktivierten Betondecken hat und ob durch diese höhere Speicherkapazität in den Decken ggf. der kleine Auslegungsspeicher und die damit verbundenen Investitionskosten eingespart werden können. Durch den Wegfall des Wasserspeichers kann weder durch Windstrom noch durch Solarthermie erwärmtes Brauchwarmwasser (BWW) vorgehalten werden. Folglich muss das gesamte BWW durch einen Durchlauferhitzer mit Reststrom bereitete werden. Um den Kapazitätsgewinn der dickeren Decke und den Einfluss der BWW-Bereitung

nicht zu vermischen, wird in einem ersten Schritt die Deckendicke erhöht. In einem zweiten Schritt wird anschließend der kleine Auslegungsspeicher aus dem System entfernt. Die Kosten für den Mehraufwand bezüglich Material und Arbeitszeit werden unter Zuhilfenahme von [42] (B25-Beton / 120 €/m³) zu 2.160 € abgeschätzt.

Reduktion des tolerierten Temperaturkorridors

Auch werden die Auswirkungen eines gegenüber Temperaturschwankungen weniger toleranten Nutzers durch die Reduktion des zulässigen Temperaturkorridors von 5 K auf 2 K betrachtet.

Kalksandstein-Bauweise

Um zusätzlich zu den drei untersuchten Bauweisen des Gebäudes speziell den Einfluss der Bauschwere der Innenwände zu untersuchen, werden in einer Variante die Ziegelinnenwände durch Kalksandstein mit einer Rohdichte von 2.000 kg/m³ ersetzt. Da die Umweltauswirkung der einzelnen Bauweisen (Beton, Ziegel, Holz) in dieser Studie nicht bewertet wird, wird auch für diese Kalksandstein-Variante baukonstruktiv kein ökologisches Profil berechnet. Die einzelnen Parametervariationen sind in Tabelle 23 nochmals übersichtlich zusammengestellt. Die Erkenntnisse aus der Sensitivitätsanalyse dienen zur Abschätzung der Schwankungsbreite der Ergebnisse im Rahmen der Detailanalyse.

Tabelle 23:
Übersicht über die in der Sensitivitätsanalyse betrachteten Parameter und deren Varianten-Bezeichnung.

Parameter	Bezeichnung bei Bauteilaktivierung	Bezeichnung bei überdämmtter Aktivierung	Wert des Parameters	
			Studie	Sensitivitätsanalyse
Effizienz Wärmerückgewinnung	s1	s11	90 %	80 %
Erhöhte Luftdichtheit	s2	s12	0,6 h ⁻¹	0,3 h ⁻¹
Reduzierte Luftdichtheit	s3	s13	0,6 h ⁻¹	1,5 h ⁻¹
Verringerte mech. Luftwechsel (resultierender mech. Luftw.)	s4	s14	0,5 h ⁻¹ 0,358 h ⁻¹	0,3 h ⁻¹ 0,158 h ⁻¹
Erhöhter Luftwechsel (resultierender mech. Luftw.)	s5	s15	0,5 h ⁻¹ 0,358 h ⁻¹	0,7 h ⁻¹ 0,558 h ⁻¹
Verbesserter U-Wert	s6	s16	H'T = 0,22 W/(m ² K)	H'T = 0,20 W/(m ² K)
Dickere Deckenaktivierung	s7	s17	d = 20 cm	d = 25 cm
Dickere Deckenaktivierung ohne Auslegungsspeicher	s8	s18	d = 20 cm	d = 25 cm
Reduzierter Temperaturkorridor	s9	s19	5 K	2 K
Innenwände Kalksandstein	s10	-	$\rho_{IW} = 1200 \text{ kg/m}^3$	$\rho_{IW} = 2000 \text{ kg/m}^3$

In Anhang 5 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die einzelnen Bewertungskriterien zusammengefasst dargestellt. Als Vergleichswerte sind die entsprechenden beiden Varianten ohne und mit Deckenüberdämmung (17, 19) dargestellt.

Veränderungen der Lüftungswärmeverluste

Die erhöhten bzw. verringerten Lüftungswärmeverluste, die sich aus der Änderung der Wärmerückgewinnung (s1, s11), der Luftdichtheit (s2, s3, s12, 13) und der mechanischen Luftmenge (s4, s5, s14, s15) ergeben, erhöhen bzw. reduzieren erwartungsgemäß den Gesamtenergiebedarf. Eine Erhöhung des Gesamt-Endenergiebedarfs einer Variante geht einher mit einer Erhöhung des Reststrombedarfs und einer sinkenden Windstromdeckung, da die verfügbare Speicherkapazität in der Baukonstruktion unverändert bleibt. Eine Reduktion des Gesamtenergiebedarfs hat entsprechend eine Erhöhung der Windstromdeckung zur Folge (bei identischer Anlagentechnik). Parallel führen höhere Lüftungsverluste zu einer Reduktion der Überwärmungen. Die ökologischen Bewertungskriterien im Rahmen der Sensitivitätsanalyse für Varianten ohne konstruktive Veränderungen variieren ausschließlich entsprechend der absoluten Höhe des Reststrombedarfs. Auch die Differenzkosten verändern sich in diesen Fällen ausschließlich entsprechend dem Reststrombedarf. Insgesamt unterscheiden sich diese Varianten in Bezug auf den Basisfall nur geringfügig.

Erhöhter Wärmedämmstandard

Die Verbesserung der U-Werte reduziert den Endenergiebedarf und führt ansonsten zu keiner signifikanten Veränderung der einzelnen Bewertungskriterien.

Erhöhte Speicherfähigkeit der Decken, ggf. mit Wegfall des Wasserspeichers

Die Erhöhung der Dicke der aktivierten Decken führt zu einer Erhöhung der Windstromdeckung und des Endenergiebedarfs sowie zu einer Reduktion des Reststrombedarfs. Durch die größere Menge eingespeicherter Energie nehmen die Überwärmungen geringfügig zu. Auf Grund der zusätzlichen Investition erhöhen sich die Differenzkosten in Bezug zur betrachteten Referenzvariante. Wird die Variante mit der dickeren Bauteilaktivierung anschließend ohne einen Wasserspeicher betrachtet, steigt der Reststrombedarf für BWW, aufgrund des Wegfalls der solaren Brauchwassererwärmung, signifikant an. Hierdurch sinkt die Windstromdeckung und die Differenzkosten steigen. Beim thermischen Komfort gibt es keine signifikanten Änderungen. Die ökologischen Bewertungskriterien im Rahmen der Sensitivitätsanalyse für Varianten mit konstruktiven Veränderungen in der Gebäudekonstruktion variieren entsprechend dieser konstruktiven Veränderung und in Abhängigkeit des Verhaltens im Gebäudebetrieb (Reststrombedarf). Generell lassen sich nur leichte Unterschiede in den Umweltwirkungen über den Lebenszyklus für alle untersuchten Varianten der Sensitivitätsanalyse feststellen. Die ökologischen Ergebnisse liegen hier weitestgehend nah an der jeweiligen Ausgangsvariante (17, 19).

Reduktion des tolerierten Temperaturkorridors

Die Reduktion des zulässigen Temperaturkorridors von 5 K auf 2 K reduziert die Windstromdeckung und erhöht folglich den Reststrombedarf und die Umweltwirkungen. Die Häufigkeit von Überwärmungen wird deutlich reduziert, da die Beladung der Bauteile deutlich früher gestoppt wird.

Kalksandstein-Bauweise

Die schweren Kalksandstein-Innenwände (s10, s19) zeigen trotz ihrer Fähigkeit Temperaturspitzen abzumildern (höhere thermische Speicherkapazität) nur eine minimale Reduktion der Überwärmungen. Auf Grund der erhöhten thermischen Speicherkapazität des Raums durch die Kalksandstein-Innenwände wird die Beladung der BTA, wegen der langsamer steigenden Operativtemperatur im Raum, etwas später abgeschaltet. Somit wird mehr Wärme in die Bauteile eingelagert. Dies kompensiert einen Teil der raumklimatisch günstigen Wirkung der schweren Kalksandstein-Innenwände.

5.3.5 Ergebnisse der Analysen des Hochtemperatur-Steinspeichers

Im Rahmen dieser Studie wurde unter anderem die seit vielen Jahrzehnten im Markt etablierte Technologie der elektrischen Speicherheizungen („Nachtspeicheröfen“) bezüglich ihrer Eignung für das Windheizungskonzept untersucht. Diese Systeme sind zur Nutzung von überschüssigem, nächtlichem Kohle- und Atomstrom zur Raumheizung tagsüber konzipiert. Ihr thermisches Rückhaltevermögen ist somit auf etwa einen halben Tag hin optimiert, was deutlich zu kurz für einen Windheizungs-Einsatz ist. Voraussichtlich sind diese Systeme jedoch wegen ihrer einfachen Installation und der geringen Investitionskosten potentiell sehr interessant. Durch die hohen Temperaturen von bis zu 700 °C, die im inneren Kern solcher Speichersysteme vorgehalten werden können, sind vor allem sehr kompakte Speicherlösungen möglich. Im Rahmen dieser Studie soll mit Hilfe einfacher Modelle eine mögliche Lösung für zentrale Hochtemperatur-Steinspeicher (HTSP) simuliert werden, um deren grundsätzliche Eignung für Windheizungsgebäude abzuschätzen.

Die Größe des Speicherkerns wird entsprechend dem Wärmebedarf während der kältesten Überbrückungsperiode dimensioniert. Durch eine Optimierung des Oberflächen-Speicherkernvolumen-Verhältnisses und der Dicke der Speicherdämmung wird die Höhe der Speicherverluste an den Heizwärmebedarf des Gebäudes angepasst. Somit sind auch die „Speicherverluste“ aus Gebäudesicht nicht verloren, sondern stellen Wärme für die Beheizung des Gebäudes bereit. Diese Anforderungen und die resultierenden Speicherparameter sind in Tabelle 24 zusammengefasst dargestellt. Die Integration des Speichers in die Lüftungsanlage ermöglicht es die nutzbare Wärme über die Oberfläche des Speichers mit Hilfe der Zuluft im Gebäude zu verteilen. Die Wärme die zusätzlich zu den Speicherverlusten des HTSP zur Temperierung des Gebäudes erforderlich ist, muss aktiv aus dem Speicher entladen werden. Dies kann z.B. wie bei einer klassischen Speicherheizung über einen geregelten Luftstrom erfolgen. Dieser, das gesamte Gebäude beeinflussende, aktive Teil der Zuluftheizung wird im Rahmen der Simulation über einen Führungsraum geregelt.

Bei dem Einfamilienhaus Neubau ist dies das zentral angeordnete, innen liegende Treppenhaus, bei dem die Solltemperatur um 1 K auf 21 °C erhöht werden muss, um in allen Räumen des Gebäudes ein ausreichend warmes Raumklima bereit zu stellen. Im Sanierungsfall des Einfamilienhauses dient der innenliegende Korridor, welcher nicht direkt mechanisch belüftet sondern nur überströmt wird, als Führungsraum. Im Bürogebäude ist die Regelung der Zuluftheizung per Führungsraum ungeeignet. Hier sind Lüftungstechnisch Gebäudezonen etagenweise und der Orientierung entsprechend bilanziert. Die interzonale Luftverteilung, welche im Einfamilienhaus zum Ausgleich der Temperaturen in den Räumen führt, ist beim Bürogebäude durch lange Korridore und geschlossene Büro- oder Brandschutztüren an Treppenhäusern nicht geeignet. Eine zonenweise Regelung, durch zonenbedingtes Beimischen der über den HTSP erwärmten Luft ist erforderlich. Die mechanische Lüftung ist nur während der Nutzungszeit aktiv vorgesehen - Im Bürogebäude ist die Lüftung daher nachts aus. Bei den Simulationsrechnungen wird außerhalb der Nutzungszeit der me-

chanische Luftwechsel auf 10 % reduziert angesetzt, um kritische Überhitzungen des Aufstellungsraums des HTSP zu verhindern.

Um die Kosten für den Hochtemperatur-Dämmstoff des Speichers zu reduzieren, wird der Dämmstoff in 2 Lagen aufgeteilt. Die innere Lage, die Primärdämmung besteht aus einem Hochleistungsdämmstoff, der auch bei Materialtemperaturen um 700 °C noch eine ausreichend geringe Wärmeleitfähigkeit von 0,03 W/(mK) besitzt. Die sekundäre Dämmebene, in der die Materialtemperaturen bereits deutlich niedriger sind, wird mit einer Brandschutz-Mineralwolle ausgeführt, die bei einer Temperatur von 500 °C noch eine Wärmeleitfähigkeit von 0,107 W/(mK) aufweist. Ein entsprechendes HTSP-System ist in Bild 24 dargestellt. Da ein zuluftintegrierter HTSP keine Brauchwarmwasserbereitung erlaubt wird angenommen, dass dieser Wärmeanteil mit Hilfe eines Wärmepumpenboilers ohne solare Unterstützung gedeckt wird. Für den Wärmepumpenboiler wird eine Jahresarbeitszahl von 2,5 und Investitionskosten in Höhe von 2.000 € angesetzt. Die jährlichen Wartungskosten werden analog zu einer Außenluftwärmepumpe bewertet.

Tabelle 24:

Anforderungen und die daraus abgeleiteten technischen Parameter von Hochtemperatur-Steinspeichern für die in dieser Studie betrachteten Typgebäude für einen 13-tägigen Überbrückungszeitraum. Bei einer weiteren Steigerung der Gebäudeeffizienz ist eine entsprechende Reduzierung der Anschlussleistung zu erwarten (vgl. Kapitel 5.3.6).

	Einfamilienhaus		Büro	
	Neubau	Sanierung	Neubau	Sanierung
Erf. Speichermenge (Wärme) [kWh]	1.450 **	760 **	6.680	8.200
(flächenbezogen [kWh/(m²)])	(3,34)	(4,75)	(3,95)	(4,85)
Nutzbare Wärmeverluste [kW]	4,5	2,4	21	26
Erforderliche Anschlussleistung [kW] *	160	85	750	920
Höhe Steinpaket [cm]	200	150	200	200
Tiefe Steinpaket [cm]	100	82	211	234
Breite Steinpaket [cm]	100	82	211	234
Dicke Primärdämmung [cm]	2	4	2	2
Dicke Sekundärdämmung [cm]	10	18	2	2

* : Bei einer vollständigen Beladung des Speichers für eine 2 - wöchige Überbrückungsperiode und einer maximalen Beladezeit von 9 Stunden.

** : Der Unterschied der erforderlichen absoluten Speicherkapazitäten zwischen Neubau und Sanierung des Einfamilienhauses ergibt sich bei dieser Berechnung aus der Kombination der unterschiedlich angenommenen Wohnflächen und der Änderung im energetischen Standard. In erster Näherung ist die erforderliche Speicherkapazität proportional zum spezifischen Heizwärmebedarf.

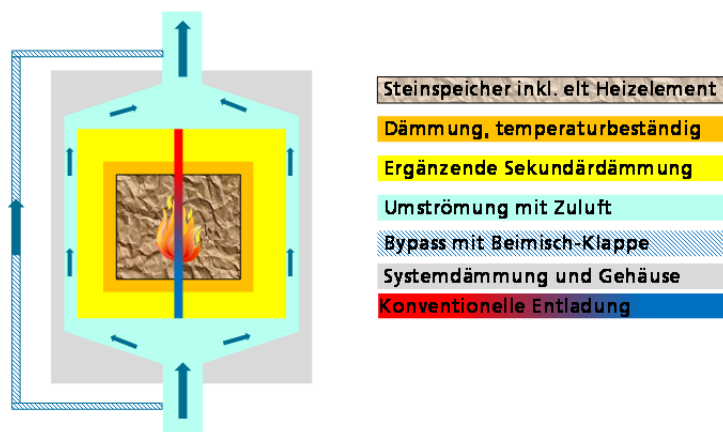


Bild 24:

Schematische Darstellung eines zentralen, in die Zuluft einer Lüftungsanlage integrierten Hochtemperatur-Steinspeichers mit zweilagigem Dämmaufbau.

Da es sich bei dem im Folgenden zu bewertenden zentralen HTSP um ein neues technisches Konzept handelt, gibt es für derartige Speichersysteme noch keine validierten Simulationsmodelle. Zur Umsetzung der HTSP-Speicher in WUFI-Plus werden zwei virtuelle Räume in den Zuluftstrang der Lüftungsanlage eingefügt. Der erste dieser beiden Räume, also derjenige der früher vom Luftstrom durchquert wird, beinhaltet den HTSP um die aktuellen Speicherverluste durch Umströmung mit Zuluft zu modellieren. Da WUFI-Plus keine 3D-Bauteile direkt modellieren kann, wird der Speicher selbst als beidseitig gedämmte Wand innerhalb der Raumluft modelliert. Die beiden Dämmebenen werden entsprechend den Festlegungen in Tabelle 24 modelliert. Die Fläche der Wand wird so festgelegt, dass mit diesem Wandaufbau der korrekte Wärmeverlustkoeffizient inklusive der Wärmebrücken erreicht wird. Die Dicke des Kernmaterials wird so festgelegt, dass sich zusammen mit der Wandfläche das erforderliche Kernvolumen nach Tabelle 24 ergibt. In der zweiten virtuellen Zone wird die aktive Entladung des HTSP eingebracht bevor der Zuluftstrom in die Zuluftzonen der Gebäude eingebracht wird.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse für den simulierten Hochtemperatur-Steinspeicher (HTSP) findet sich in Anhang 6. Hier kann man erkennen, dass alle Windheizungsvarianten eine relativ hohe Windstromdeckung aufweisen. Da der HTSP in dieser Studie idealisiert so beladen wird, dass er immer genug Wärme für die kommende Überbrückungsperiode enthält, wird der Heizbedarf definitionsgemäß immer zu 100 % aus Windstrom gedeckt. Die Hilfsenergie und der Brauchwarmwasserbedarf, letzterer über eine Wärmepumpe erzeugt, werden immer vollständig mit Reststrom bedient. Auf Grund der Deckung des gesamten Brauchwarmwasserbedarfs über eine Wärmepumpe ist der Endenergiebedarf für die Fälle des Einfamilienhauses um etwa $\frac{1}{4}$ geringer als bei der Windheizungsvariante mit Warmwasserspeicher zur Deckung des Bedarfs in der Periode zwischen zwei Starkwindereignissen (Windperiodenspeicher) und Fußbodenheizung, bei der der Brauchwarmwasserbedarf direkt elektrisch gedeckt wird. Das Raumklima ist vergleichbar mit den Windheizungsvarianten mit wasserbasierten Windperiodenspeicher. Dasselbe gilt für die Kostenseite der Einfamilienhäuser mit HTSP. Bei der Anwendung im Bürogebäude zeigen diese Abschätzungen keine wirtschaftlichen Lösungen. Eine Bewertung des ökologischen Einflusses wird für diese Seitenstudie nicht durchgeführt, da es sich bei dem HTSP um ein Technologiekonzept handelt und somit keine belastbaren Grundlagendaten für eine entsprechende Bewertung vorliegen.

Die Ergebnisse aus dieser Vorstudie zu HTSP lassen erwarten, dass diese Speichersysteme durchaus für den Einsatz im Rahmen von Windheizungsgebäuden aus platztechnischer Sicht sowie unter ökonomischen Aspekten geeignet sind.

5.3.6 Ergebnisse für die Seitenstudie mit Passivhausstandard

Im Rahmen der Studie werden bisher KfW 40 bzw. KfW 55 Gebäude betrachtet. Im aktuellen Kapitel soll ergänzend untersucht werden, ob eine weitere Erhöhung des Wärmedämmstandards zu einer höheren Windstromdeckung führt. Hierzu wird ein Gebäude in Passivhaus-Bauweise betrachtet. Als Vergleichsvarianten dient im Folgenden die bisherige Windheizungsvariante (17). Die Annahmen zu den Randbedingungen sind einer realen Passivhaus-Projektierung entnommen. Im Einzelnen werden die folgenden Parameter variiert:

Die Luftwechselannahmen sind in 4 Punkten unterschiedlich. Erstens wird bei der Passivhausprojektierung der nutzungsbedingte Fensterluftwechsel von $0,1 \text{ h}^{-1}$ nicht angesetzt. Zweitens wird die mechanische Lüftungsanlage mit einem etwas geringeren Außenluftwechsel von $0,3 \text{ h}^{-1}$ statt $0,358 \text{ h}^{-1}$ betrieben. Drittens wird für die Wärmerückgewinnung das bestmögliche am Markt verfügbare, Passivhaus zertifizierte Gerät mit einem Wirkungsgrad von 94 % statt 90 % angesetzt. Viertens wird der Infiltrationsluftwechsel basierend auf einer extrem dichten Gebäudehülle mit einem n_{50} -Wert von $0,3 \text{ h}^{-1}$ abgeschätzt, wodurch sich ein mittlerer Infiltrationsluftwechsel von $0,021 \text{ h}^{-1}$ ergibt. Dies entspricht in etwa einer Halbierung der bisherigen Annahmen zu den Infiltrationsverlusten. Die einzelnen Änderungen im Bereich der Lüftung sind in Tabelle 25 zusammengefasst.

Tabelle 25:
Vergleich der Luftwechselannahmen zwischen dem KfW 40-Gebäude und der Passivhausvariante.

	KfW 40	Passivhaus
Infiltration	$0,6 \text{ h}^{-1} * 0,07 = 0,042 \text{ h}^{-1}$	$0,3 \text{ h}^{-1} * 0,07 = 0,021 \text{ h}^{-1}$
Fensterluftwechsel	$0,1 \text{ h}^{-1}$	0 h^{-1}
Mechanische Lüftung	$0,358 \text{ h}^{-1}$	$0,300 \text{ h}^{-1}$
Wärmerückgewinnungsgrad	90 %	94 %

Ergänzend zu den geänderten Luftwechselannahmen werden niedrigere U-Werte für die Außenbauteile angesetzt, die einer Passivhausprojektierung eines Beispielgebäudes entsprechen. Zudem wird in der Passivhaus-Projektierung der pauschale Wärmebrückenzuschlag von $0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nicht angesetzt. Diese Änderungen sind in Tabelle 26 zusammengefasst. Eine detaillierte Zusammenstellung der Aufbauten der veränderten Bauteile finden sich in Anhang 7.

Tabelle 26:
Vergleich der angesetzten U-Werte der Außenbauteile für das KfW 40-Gebäude und der Passivhausvariante.

U-Werte [W/(m²K)]	KfW 40 (inkl. WB-Zuschlag)	Passivhaus
Außenwand	0,15	0,11
Dach	0,13	0,08
Kellerwand	0,25	0,14
Bodenplatte	0,25	0,14
Fenster	0,85	0,85

Ergänzend zu den bisherigen Annahmen wird ein geänderter Windzyklus untersucht, der auch kürzere Starkwindereignisse berücksichtigt. Hieraus ergibt sich ein reduzierter Überbrückungszeitraum von maximal 7 Tagen (95 %-Quantil) bei einer gleich langen mittleren Starkwind- bzw. Beladezeit von 9 Stunden (vgl. Abschnitt 3.1).

Als weitere Variation wird die Position der Rohrschlangen der BTA von der Bauteilmitte hin zu einer Position 2 cm unterhalb der Betonoberkante bzw. der Trittschalldämmung verändert. Dies hat einerseits Vorteile im Bauablauf, da die Verrohrungen nur noch auf die fertige Bewehrung aufgelegt werden müssen, zum anderen ist hierdurch zu erwarten, dass die Wärmeabgabe gleichmäßiger nach oben und nach unten verteilt werden kann. Zudem werden hier die Kosten für die BTA auf 45,14 €/m² reduziert. Diese Kosten sind einem realen Angebot für exakt diese Geometrie entnommen.

Zusätzlich wird auch die Bodenplatte des Gebäudes aktiviert, um zusätzliche Speicherkapazitäten erschließen zu können. Die Aktivierung erfolgt jeweils in derselben Schicht wie bei den Decken.

Als zusätzliche Vergleichsreferenz für diese Varianten dient ein Passivhaus das konventionell mit einer Außenluft-Wärmepumpe in Kombination mit einer Fußbodenheizung beheizt wird (p0). Die Kombination dieser 5 Änderungen bildet die Basis-Passivhausvariante (p1). Ausgehend von dieser Kombinationsvariante werden 5 Variationen betrachtet, in denen jeweils eine dieser Veränderungen rückgängig gemacht ist, um den Einfluss der jeweiligen Veränderung auf das Gesamtergebnis abschätzen zu können. Die einzelnen Varianten sind in Tabelle 27 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 27:
Variantenübersicht des Passivhaus-Abgleichs.

Nr.	Bezeichnung	Änderung				
		Lüftung	U-Werte	Windzyklus	Aktivierung Bodenplatte	BTA- Position
p0	Passivhaus-Referenz	x	x	-	-	-
p1	Passivhaus	x	x	x	x	x
p2	- EnEV-Lüftung		x	x	x	x
p3	- alte U-Werte	x		x	x	x
p4	- langer Windzyklus	x	x		x	x
p5	- ohne Bodenplatte	x	x	x		x
p6	- BTA mittig	x	x	x	x	

Wegen des deutlich geringeren Energiebedarfs des Passivhauses müssen die maximalen Beladetemperaturen der Decken gesenkt werden, da sonst deutliche Überwärmungen in dem Passivhaus auftreten. Um geringe und vergleichbare Überwärmungen wie das KfW 40-Windheizungsgebäude mit der gleichen Anlagentechnik (17) zu erhalten, muss der obere Sollwert der Rücklauftemperatur der Deckenaktivierung von 40 °C abgesenkt werden. In Bild 25 kann man am Beispiel der Passivhausvariante (p4) mit dem langen Starkwindzyklus erkennen, dass mit einem steigenden Sollwert der Rücklauftemperatur der BTA, also mit einer höheren Wärmebelastung, die grüne Kurve der Windstromdeckung ansteigt. Ab einem Sollwert von etwa 30 °C beginnt diese Kurve abzufallen. Dies zeigt, dass ab diesem Punkt die passiv aus dem Bauteil an die Räume abgegebene Wärme nicht mehr vollständig nutzbar ist. Ab diesem Punkt steigen auch die Zeiten mit Überhitzungen an. Für die weiteren Betrachtungen wird daher ein Rücklauftemperatur-Sollwert von 30 °C für die Simulation der Passivhausvarianten festgelegt.

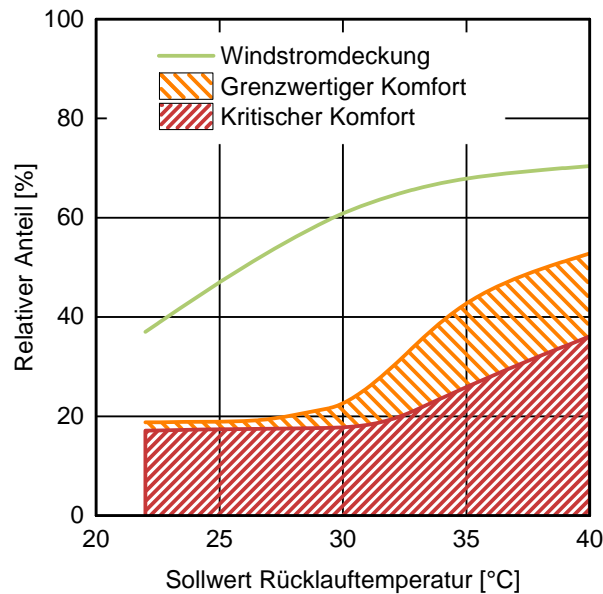


Bild 25:
 Zusammenhang zwischen dem Sollwert der Rücklauftemperatur der Bauteilaktivierung in der Decke und dem Ansteigen der Windstromdeckung (grün) sowie dem Anstieg von Zeiten mit grenzwertigem bzw. kritischem Raumkomfort (orange, rot) auf Grund von Überwärmungen.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Passivhaus-Varianten findet sich in Anhang 8. Das EnEV-Referenzgebäude ist hier der Vollständigkeit halber mit dargestellt, da es auch bei den Passivhaus-Varianten als Berechnungsgrundlage für die Kostendifferenz und die ökologische Differenz der Konstruktion dient. Bezüglich der Windstromdeckung zeigt sich, dass die meisten der Passivhaus-Varianten eine höhere Windstromdeckung aufweisen als die bisher betrachtete Windheizungsvariante (17) mit vergleichbarer Anlagentechnik.

Passivhaus – Referenz

Da kein Windstrom genutzt wird, weist die Passivhaus-Referenz (p0) keine nennenswerte Windstromdeckung auf. Der Endenergiebedarf für Raumwärme und Brauchwarmwasser ist sehr gering da die gesamte Wärme über eine Wärmepumpe bereitgestellt wird und kein direkt elektrisch in Wärme gewandelter Windstrom verwendet wird. Bei dem für diese Simulationen verwendeten Wärmepumpen- bzw. Anlagenmodell ist eine Trennung zwischen Heizwärme und Brauchwarmwasser nicht möglich, aus diesem Grund wird der gesamte Wärmebedarf in Anhang 8 als „Heizen“ dargestellt.

Passivhaus mit 13 -tägigem Starkwindzyklus

Die Passivhaus-Variante (p4), bei der der Starkwindzyklus wie bei den KfW 40/55-Windheizungsvarianten unverändert bei 13 Tagen bleibt, zeigt sich eine nahezu identische Windstromdeckung verglichen mit Windheizungsvariante (17), allerdings mit einem deutlich geringeren Gesamt-Endenergiebedarf.

Der Endenergiebedarf für die Raumheizung ist bei der Passivhausvariante (p4) deutlich geringer, wodurch eine hohe Windstromdeckung bezogen auf den Anteil der Raumheizung entsteht. Der Brauchwarmwasser-Bedarf mit seiner geringeren Windstromdeckung ist auch bei der Passivhausvariante (p4) in seiner Höhe unverändert. Dadurch ist der Anteil der Brauchwarmwasserbereitung bezogen auf den Gesamtenergiebedarf beim Passivhaus höher als bei der Variante (17) und hat somit einen größeren Einfluss. In Summe ergibt sich hieraus eine annähernd identische Windstromdeckung der Passivhausvariante (p4) im Vergleich zur Variante (17).

Bei den anderen Passivhausvarianten (p1, p2, p3, p5 und p6) steigt durch die verkürzte Überbrückungsperiode zwischen zwei Starkwindereignissen auch die Windstromdeckung des Brauchwarmwassers an (die Größe des Auslegungsspeichers bleibt unverändert). Somit steigt auch die Gesamt-Windstromdeckung an.

Bezüglich des Gesamt-Endenergiebedarfs kann man erkennen, dass die Windheizungs-Passivhausvarianten (p1 – p6) verglichen mit der Windheizungsvariante (17) einen um ca. 50 % reduzierten Bedarf haben und auch entsprechend geringere Umweltwirkungen aufweisen. Die Passivhaus-Referenzvariante, die konventionell mit einer Wärmepumpe beheizt wird, weist den niedrigsten Endenergiebedarf auf. Die aufwendigere Anlagentechnik verursacht allerdings auch die höchsten Mehrkosten. Kostentechnisch gehören die Windheizungs-Passivhaus-Varianten mit zu den günstigsten, die in der gesamten Studie bewertet werden. Je nach Szenario sind sie kostengünstiger als das Referenz-EnEV-Gebäude. Bei mehreren Windheizungs-Passivhaus-Varianten kann eine quasi vollständige Deckung des Heizwärmebedarfs durch Windstrom realisiert werden. Die Simulationen des thermischen Komforts zeigen jedoch Potentiale zur Verbesserung, die ggf. durch eine weitere Optimierung der Regelungsstrategien der Bauteilbelastung erschlossen werden können.

Veränderte Position der Bauteilaktivierung

Die Bauteilaktivierung direkt unterhalb der Trittschalldämmung (p1) (= Aktivierung in der „thermischen Mitte“, das bedeutet möglichst identische Wärmedurchgangswiderstände zwischen der thermisch aktivierten Ebene und der Deckenoberseite bzw. Deckenunterseite) zeigt raumklimatisch ein besseres Verhalten als bei Verlegung der Bauteilaktivierung in der geometrischen Deckenmitte (p6). Die Platzierung der BTA direkt unterhalb der Trittschalldämmung erscheint folglich aus raumklimatischer Sicht sinnvoll.

Wegfall der Aktivierung der Bodenplatte

Die Passivhaus-Variante ohne Aktivierung der Bodenplatte (p5) zeigt zwar eine etwas geringere Windstromdeckung, auf Grund der geringeren Wärmeverluste zum Erdreich ergibt sich allerdings auch ein geringerer Endenergiebedarf. Unter Berücksichtigung der höheren Investitionskosten erscheint die Aktivierung der Bodenplatte daher nicht sinnvoll.

Zusammenfassend kann für die Seitenstudie mit Passivhausstandard festgehalten werden, dass alle Passivhausvarianten einen deutlich geringen Endenergiebedarf aufweisen als das KfW 40-Windheizungsgebäude mit der gleichen Anlagentechnik (17). Daraus ergeben sich auch ein kleineres Treibhauspotenzial und geringerer Bedarf an Primärenergie. Die Verkürzung des Windheizungszyklus (Reduzierung von 13 auf 7 Tage) bei den Varianten (p1-p3, p5, p6) führt zu einer deutlichen Erhöhung der Windstromdeckung. Hervorzuheben ist, dass die Varianten (p1) und (p6) quasi 100% mit Windstrom beheizt werden können, lediglich der Energiebedarf für die Warmwasserbereitung reduziert die Windstromdeckungsanteile. Der Bau und Betrieb eines Passivhauses mit Windheizungstechnik liegt etwa bei den gleichen Kosten wie ein vergleichbares Gebäude nach EnEV 2014. Im Vergleich zu einem Passivhaus mit Luftwärmepumpe ist ein Passivhaus Windheizungsgebäude über den betrachteten Lebenszyklus kostengünstiger. Bezüglich des thermischen Komforts besteht Optimierungspotenzial, das ggf. durch eine weitere Verbesserung der Regelungsstrategien der Bauteilbeladung gelöst werden kann.

6 Musterbauplan

In diesem Abschnitt wird der in Anhang 10 befindliche, für das deutsche Klima gültige, „Musterbauplan“ für Windheizungsgebäude näher erläutert. In diesem Musterbauplan werden die wesentlichen Erkenntnisse aus der Detailanalyse (siehe Abschnitt 5.3) zusammengefasst, um potentiellen Planern und Bauherren eine Entscheidungshilfe an die Hand zu geben, ob ihr Gebäude windheizungs-tauglich ist bzw. welche Veränderungen notwendig wären, um dies zu erreichen. Der Musterbauplan ist in drei Bereiche unterteilt. Diese Bereiche geben Empfehlungen für das Gebäude, der technischen Gebäudeausrüstung und stellen einige erste Auslegungshilfen in der Form von Kennlinien zur Verfügung.

6.1 Generelle Eignung

Grundlegende Eignung von Gebäuden und Bauweisen

In dem ersten Bereich geht es um grundlegende Festlegungen bezüglich des Gebäudes und der Anlagentechnik. Welche Gebäudetypen kommen überhaupt in Frage und wie müssen diese ausgeführt sein? Wohngebäude eignen sich sowohl im Neubau als auch in der Sanierung für eine Windheizungs-nutzung. Bürogebäude können wegen des hohen Hilfsenergiebedarfs und des kleineren zulässigen Temperaturkorridors als Windheizungsgebäude nicht wirtschaftlich betrieben werden. Generell sind alle üblichen Bauweisen für ein Windheizungsgebäude geeignet. Leichte Bauweisen wie z.B. Holzkonstruktionen erfordern allerdings das Vorhandensein eines zentralen Windperiodenspeichers (z.B. Wasserspeicher oder HTSP), welcher zur Speicherung des Energiebedarfs für Brauchwarmwasser und Heizung zwischen zwei Starkwindereignissen ausgelegt ist, da dem Gebäude die Bauteilmasse zur Wärmespeicherung fehlt. Sollen bei schweren Bauweisen die Bauteile selbst als Speicher dienen, können hierfür sowohl Geschossdecken als auch Innenwände genutzt werden. Generell wirken sich schwere Bauteile positiv in Bezug auf den thermischen Komfort aus.

Die Beheizung von Außenbauteilen empfiehlt sich nicht, da durch die erhöhten Bauteiltemperaturen auch die Temperaturdifferenz zur Außenluft und damit die Transmissionswärmeverluste erhöht werden. Decken bieten gegenüber von Innenwänden zwei Vorteile. Zum einen skalieren sie sich analog zur Raumgröße, zum anderen können sie nicht durch Schränke oder andere große Möbelstücke verdeckt und somit vom Raum thermisch abgekoppelt werden. Das Überdämmen von aktivierten Innenbauteilen, bei ausschließlich passiver Entladung, ist nicht zweckmäßig, da der Gewinn an Speicherkapazität (höhere mögliche Bauteiltemperaturen) durch die Verringerung des Wärmeübergangs zwischen Bauteil und Raum bei der rein passiven Entladung dieses Bauteilspeichers wieder kompensiert wird. Den zusätzlichen Investitionskosten steht in diesem Fall kein entsprechender Mehrwert entgegen. Auch das gleichzeitige Aktivieren sehr vieler Bauteilmassen wie z.B. der Decken und der Innenwände bringt keinen Mehrwert, da durch die erhöhte Wärmeabgabe an den Raum der Beladevorgang vorzeitig gestoppt werden muss, damit die maximal zulässige Raumtem-

peratur nicht überschritten wird. Die Bauteile werden somit nicht vollständig beladen.

Grundlegende Anforderungen an das Gebäude

Generell sollte ein Windheizungsgebäude einen sehr hohen wärmetechnischen Standard aufweisen. Für Wohnneubauten wird hierbei ein Wärmeschutzniveau entsprechend der Anforderungen des KfW 40 Effizienzhauses, nämlich 55 % des Höchstwertes des spezifischen Transmissionswärmeverlustes $H'T_{REF}$, gefordert und für sanierte Wohngebäude ein Wärmeschutzniveau des KfW 55 Effizienzhauses, d.h. 70 % des Höchstwertes des spezifischen Transmissionswärmeverlustes $H'T_{REF}$. Generell gilt, dass das Windheizungs-System umso wirtschaftlicher wird desto geringer der Endenergiebedarf des Gebäudes ist. Im Folgenden wird die Eignung der einzelnen Technologien für Erzeuger, Speicher und Übergabesystem dargestellt. Grundsätzlich sollte ein Windheizungsgebäude über eine Lüftungsanlage mit Zu- und Abluft und einer Wärmerückgewinnung mit einem Rückgewinnungsgrad von mindestens 80 % verfügen. Auch benötigt jedes Gebäude einen sehr leistungsfähigen, direktelektrischen Wärmeerzeuger, um den Wärmebedarf für die Überbrückungsperiode zwischen zwei Starkwindereignissen von knapp 2 Wochen innerhalb des Starkwindereignisses (ca. 9 Stunden) im Gebäude einspeichern zu können. Würde dies über eine Wärmepumpe erfolgen, erfordert dies eine sehr hohe Überdimensionierung der Wärmepumpenleistung, wodurch das Konzept nicht mehr wirtschaftlich wäre. Auch ein direktelektrisches Flächenheizsystem wie z.B. elektrische Heizmatten ist unter den aktuellen Rahmenbedingungen wirtschaftlich nicht darstellbar. Somit verbleibt als einziger Wärmeerzeuger während des Starkwindereignisses ein elektrischer Durchlauferhitzer. Durchlauferhitzer werden gegenüber in den Speicher integrierten Heizschaltern bevorzugt, da sie bei kürzeren Starkwindereignissen, die nicht zu einer vollständigen Ladung des Speichers ausreichen, eine bessere Temperaturschichtung im Speicher erlauben.

Technologien zur Restwärmedeckung

Die zu deckenden Restwärmemengen (konventionell, ohne Windstrom erzeugt) zwischen zwei Starkwindereignissen sollten bei Windstromgebäuden relativ gering sein, weswegen sehr effiziente aber auch teure Wärmeerzeuger wie Sole-Wasser-Wärmepumpen oder Pelletkessel wirtschaftlich nicht darstellbar sind. Mögliche Lösungen sind die Deckung der Restwärmemenge mit Hilfe des ohnehin vorhandenen Durchlauferhitzers oder die Investition in eine relativ kostengünstige Außenluft-Wärmepumpe. Die Außenluft-Wärmepumpe hat den zusätzlichen Vorteil, dass das Gebäude auch unter konventionellen Gesichtspunkten, also auch wenn kein Windstrom (mehr) zur Verfügung steht, relativ energieeffizient beheizt werden kann.

Zentrale (Wasser-)Speicher

Ein Windheizungsgebäude sollte zur Deckung des Brauchwarmwasserbedarfs im Sommer, wenn in der Regel weniger Starkwindstrom zur Verfügung steht, mit einer Solarthermie-Anlage inklusive eines entsprechenden Wasserspeichers ausgestattet sein. Die Nutzung eines deutlich größeren Wasserspeichers (Windperiodenspeicher) der so dimensioniert ist, dass annähernd der gesamte Wärmebedarf für den Zeitraum zwischen 2 Starkwindperioden gespeichert werden kann, stellt ebenfalls eine wirtschaftliche Lösung dar. Dieser Windperiodenspeicher hat zudem den Vorteil, dass der Nutzer keine Überwärmungen des Gebäudes als Folge der Aufheizung von Bauteilen tolerieren muss. Die Nutzung von PCM-Speicher stellt sich wegen der deutlich höheren speicherkapazitätsbezogenen Kosten wirtschaftlich nicht dar. Die Nutzung von elektrischen Speicherheizungen („Nachtspeicheröfen“) ist wegen des deutlich zu geringen Wärmerückhaltevermögens der derzeit am Markt verfügbaren Systeme auch aus technischer Sicht nicht zielführend. Erste Potentialabschätzungen bezüglich angepasster, zentraler oder dezentraler Speicherheizung mit einem deutlich längeren Wärmerückhaltevermögen erscheinen allerdings vielversprechend. Bei der Verwendung zentraler Speichersysteme wie z.B. einem Windperiodenspeicher oder einem zentralen (hydraulisch eingebundenen) Hochtemperatur-Steinspeicher ist ein Übergabesystem für die Wärme an die Räume des Gebäudes notwendig. Konventionelle Heizkörpersysteme sind prinzipiell geeignet, erfordern jedoch höhere Vorlauftemperaturen, was vor allem bei Wasserspeichern den nutzbaren Temperaturhub und damit die Speicherkapazität reduziert. Besser geeignet sind daher Flächenheizsysteme wie Fußboden-, Wand oder auch Deckenheizsysteme, da sie geringere Vorlauftemperaturen benötigen. Bauteilaktivierungen sind wegen ihrer geringen Investitionskosten auch eine sehr günstige Variante für eine Flächenheizung.

6.2 Technologie-Kombinationen

Im zweiten Teil des Musterbauplans wird die Interaktion der anlagentechnischen Systeme in Form einer Matrix dargestellt, bei der die Speichersysteme (falls notwendig inkl. Wärmeerzeuger) den Übergabe- bzw. Flächenspeichersystemen gegenüber gestellt sind. Hier wird die Eignung der jeweiligen Kombination auf einer Skala von --- (vollkommen ungeeignet) bis +++ (sehr gut geeignet) bewertet. Dies geschieht getrennt für den Neubau (Tabelle 28) und den Sanierungsfall (Tabelle 29), da einige Technologien nicht nachträglich installiert werden können und daher im Bestand nicht umsetzbar sind. Da sich der Hochtemperatur-Steinspeicher noch in der Konzeptphase befindet, ist seine Bewertung mit einer höheren Unsicherheit belegt als bei den Varianten die auf gängigen Technologien basieren.

Tabelle 28:
Technologiematrix für das Einfamilienhaus Neubau.

Neubau	Wasserbasierter Speicher (Standarddimensionierung) + Restwärme: elektrischer Durchlauferhitzer	Wasserbasierter Speicher (Auslegung Windperiode) + Restwärme: elektrischer Durchlauferhitzer	Wasserbasierter Speicher (Standarddimensionierung) + Restwärme: Außenluft-Wärmepumpe	Wasserbasierter Speicher (Auslegung Windperiode) + Restwärme: Außenluft-Wärmepumpe	PCM-Speicher	Elektrische Nachtspeicherheizung	Hochtemperatursteinspeicher (zentral, Auslegung Windperiode) - in Entwicklung
Radiator	--	++	--	+	---	---	+ - +++ ^{*1}
Fußbodenheizung	--	+++	--	++	---	---	+ - +++ ^{*1}
BTA-Betondecke	+	+++	+++	++	---	---	+ - +++ ^{*1}
BTA-Betondecke (überdämmt)	--	---	--	---	---	---	---
Oberflächentemperierung Betondecke	--	++	++	+	---	---	+ - +++ ^{*1}
Oberflächentemperierung Holzdecke	--	+++	-	++	---	---	+ - +++ ^{*1}
BTA Innenwände (Beton)	--	++	++	+	---	---	+ - +++ ^{*1}
BTA Innenwände (Ziegel / KS)	--	++	++	+	---	---	+ - +++ ^{*1}
BTA Innenwände (Beton; überdämmt)	---	---	---	---	---	---	---
BTA Innenwände (Ziegel / KS; überdämmt)	---	---	---	---	---	---	---
Oberflächentemperierung Innenwände (Leichtbau)	---	++	--	+	---	---	+ - +++ ^{*1}
BTA Betondecke und Innenwände (Beton / Ziegel / KS)	-	-	--	--	---	---	-
BTA Betondecke und Innenwände (Beton / Ziegel / KS; überdämmt)	--	---	---	---	---	---	---
Oberflächenaktivierung Decken und Innenwände (alle Bauweisen)	--	-	--	--	---	---	-
Hochtemperatursteinspeicher (zentral, Auslegung Windperiode) - in Entwicklung							+ - +++ ^{*2}

^{*1}: Hydraulische Einbindung

^{*2}: Zuluftintegriert

6.3 Auslegungshilfen

Energiemenge und Anschlussleistung

Der letzte Teil des Musterbauplans enthält Auslegungskennlinien für eine Abschätzung der elektrischen Anschlussleistungen sowie der benötigten Speichermengen für ein Windheizungsgebäude. Aus den Simulationsrechnungen ist für ein typisches deutsches Winterklima das Verhältnis des Endenergiebedarfs zwischen der gesamten Heizperiode und der kritischsten Überberückungsperiode bekannt. Mit Hilfe dieses Verhältnisses kann aus dem Endenergiebedarf (abzüglich der Hilfsenergie und ggf. des BWW-Bedarfs) des geplanten Windheizungsgebäudes ermittelt werden, wieviel Wärme für die Überbrückung des Zeitraums zwischen zwei Starkwindereignissen maximal notwendig ist. Diese Energiemenge muss innerhalb weniger Stunden im Gebäude gespeichert werden, um den zweiwöchigen Wärmebedarf des Gebäudes zwischen zwei Starkwindereignissen decken zu können. Die hieraus resultierenden Leistungen des elektrischen Hausanschlusses sind höher als die Anschlussleistung die im Normalfall vorhanden ist. Bild 26 zeigt die Ermittlung der notwendigen Leistung des elektrischen Hausanschlusses.

Speicher-Volumen und -Massen

Die maximal für eine Überbrückungsperiode erforderliche Wärmemenge kann in ein entsprechendes Speichervolumen umgerechnet werden. Bild 27 zeigt das erforderliche Speichervolumen für einen großen Wasserspeicher mit Windperiodenauslegung. Da im Fall einer Bauteilaktivierung als Speichersystem die mittlere Rohdichte der zu beladenden Bauteile unterschiedlich ist, kann für diese Fälle die Umrechnung nicht pauschal auf ein notwendiges Volumen erfolgen. Da die meisten Baustoffe jedoch mineralischen Ursprungs sind und somit eine spezifische Wärmekapazität von $850 \text{ J}/(\text{kgK})$ aufweisen, ist die Umrechnung des Endenergiebedarfs in eine thermisch zu aktivierende Bauteilmasse möglich, wie in Bild 28 dargestellt ist.

Hochtemperatur-Steinspeichers (HTSP)

Im Fall eines Hochtemperatur-Steinspeichers (HTSP) ist ebenfalls die überschlägige Ermittlung der abhängigen Masse des Speicherkerns möglich. Das resultierende erforderliche Volumen hängt vom Volumenanteil der Luftkanäle im Speicherkern ab. In Bild 29 sind diese Umrechnungen beispielhaft für die Speicherkernmasse bzw. für das Kernvolumen mit Luftleitungsanteilen von 0 % und 40 % dargestellt.

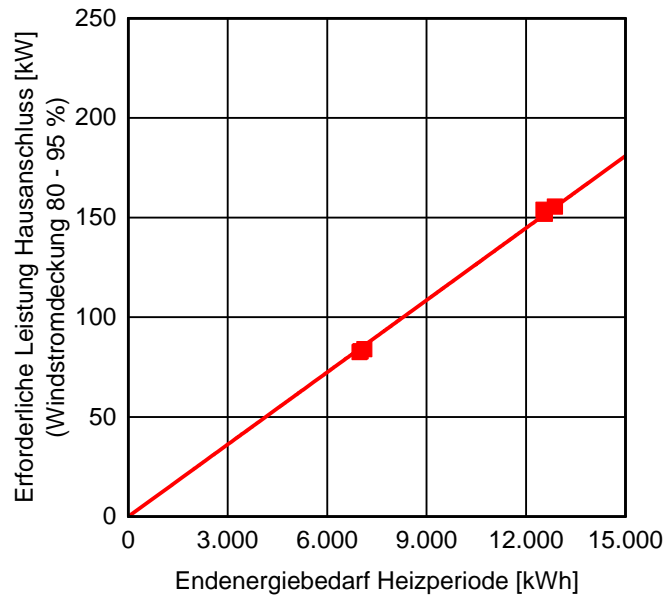


Bild 26:
Auslegungskennlinie für einen elektrischen Windheizungs-Hausanschluss in Abhängigkeit vom Endenergiebedarf (Wärme) während der Heizperiode.

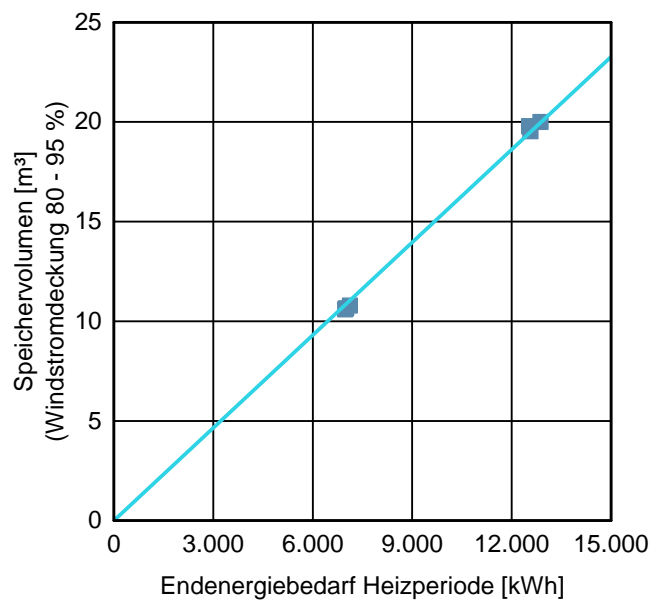


Bild 27:
Auslegungskennlinie für einen wasserbasierten Windperiodenspeicher in Abhängigkeit vom Übergabesystem und dem Endenergiebedarf (Wärme) während der Heizperiode.

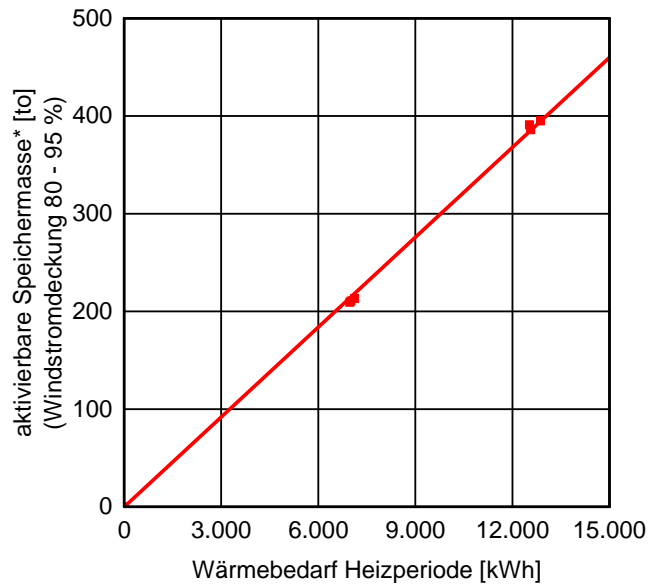


Bild 28:
Auslegungskennlinie für die erforderliche aktivierte Bauteilmasse in Abhängigkeit vom Endenergiebedarf (Wärme) während der Heizperiode.

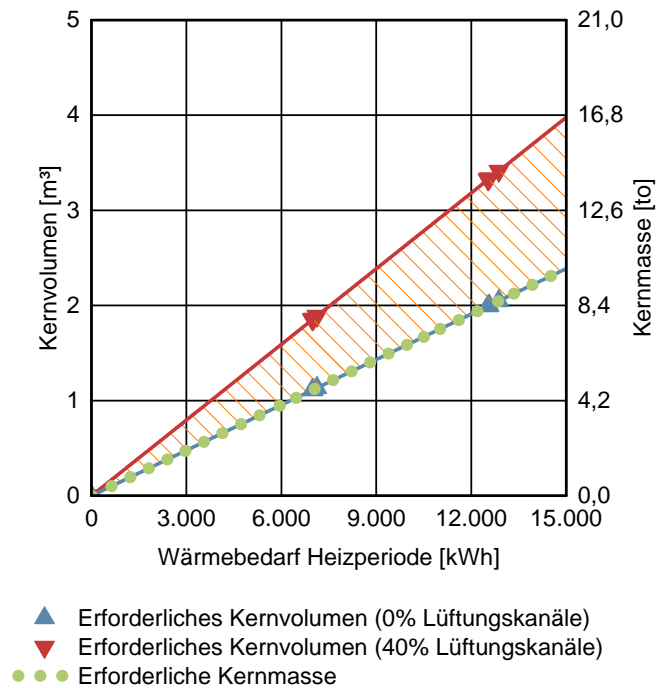


Bild 29:
Auslegungskennlinie für einen Hochtemperatur-Steinspeicher (HTSP) in Abhängigkeit vom Endenergiebedarf (Wärme) während der Heizperiode.

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Im Rahmen der durchgeführten Studie wird untersucht, inwieweit es möglich ist, Gebäude überwiegend mit Überschussstrom während Starkwindereignissen zu beheizen und wie derartige Gebäude (Windheizungs-Gebäude) konzipiert sein müssen, um wirtschaftlich am Markt angeboten werden zu können. Anhand einer Analyse der Starkwindereignisse in Deutschland aus den vergangenen Jahren (Starkwindereignis: Windgeschwindigkeit $> 10,8$ m/s und Dauer von mindestens 5 Stunden), werden zunächst die wesentlichen Eckdaten für die zu erwartende Häufigkeit und die Dauer von Starkwindereignissen ermittelt. Hierbei zeigt sich, dass in Deutschland während der Heizperiode mit 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit spätestens alle 13 Tage mit einem Starkwindereignis von im Mittel etwa 9 Stunden Dauer zu rechnen ist. Das Windheizungs-Gebäude muss daher idealerweise in der Lage sein, innerhalb von 9 Stunden so viel Energie aufzunehmen und zu speichern, dass es damit seinen Bedarf zur Raumheizung und Brauchwarmwasserbereitung bis zum nächsten Starkwindereignis überbrücken kann. So wird vermieden, dass in der Zwischenzeit auf konventionell erzeugten Strom zurückgegriffen werden muss. Damit während des Starkwindereignisses möglichst viel Energie im Gebäude gespeichert werden kann, wird anstelle einer festen Raumsolltemperatur ein zulässiger Temperaturkorridor definiert, der es erlaubt das Gebäude bei einem Überangebot von Strom im Netz auf ein höheres Temperaturniveau zu beheizen. Als zulässiger Temperaturkorridor werden im Rahmen der Studie 20 °C bis 25 °C für die Wohnnutzung und 21 °C bis 24 °C für die Büroanwendung festgelegt.

Im Rahmen einer umfangreichen Recherche werden zunächst typische Gebäudegeometrien für Einfamilienhäuser und für Bürogebäude selektiert (Typgebäude). Anschließend werden praxisübliche Bauteilaufbauten für drei verschiedene, häufig vorzufindende Bauweisen (Ziegel, Beton, Holz) im Neubau sowie für den Sanierungsfall definiert. Die energetischen Anforderungsniveaus beziehen sich hierbei auf die aktuelle Energieeinsparverordnung zum Zeitpunkt der Bearbeitung (EnEV 2014). Für die Windheizungsgebäude wird wärmeschutzmäßig die höchste Förderstufe der KfW Bank zu Grunde gelegt, d.h. im Wohnneubau ein Anforderungsniveau gemäß KfW40 Programm, nämlich maximal 55 % des Höchstwertes des spezifischen Transmissionswärmeverlustes $H'T_{REF}$ und für die Sanierung KfW55 Niveau, d.h. maximal 70 % des Höchstwertes des spezifischen Transmissionswärmeverlustes $H'T_{REF}$. Die erhöhten Wärmeschutz-Anforderungen an die Windheizungsgebäude ergeben sich einerseits auf Grund des höheren Primärenergiefaktors für Strom, bei der zugrundeliegenden elektrischen Direktheizung. Andererseits müssen bei einem geringeren Wärmeschutz größere Wärmemengen, zur Überbrückung des Zeitraums zwischen zwei Starkwindereignissen, eingespeichert werden, was in den verfügbaren Bauteilmassen des Gebäudes i.d.R. nicht möglich ist, bzw. unwirtschaftlich große Speicher erfordert. Weitergehend wird untersucht, wie sich die Ergebnisse der Studie verändern, wenn nicht ein KfW40-Haus untersucht wird, sondern die getroffenen baulichen Annahmen einer Passivhaus-Projektierung entsprechen. Als entsprechende Vergleichsgebäude (Referenzfälle ohne Windheizung) werden Gebäude mit identischer Geometrie, allerdings mit einem energeti-

schen Standard von 100 % EnEV (Neubau) bzw. 140 % EnEV (für die sanierten Gebäude) verwendet. Als Anlagentechnik wird für diese Vergleichsgebäude die Referenztechnologie gemäß EnEV zugrunde gelegt. Da das Windheizungskonzept voraussetzt, dass der Wärmebedarf des Gebäudes für etwa 2 Wochen innerhalb von 9 Stunden eingespeichert werden muss, also von elektrischem Strom in Wärme umgewandelt wird, setzt dies ein direktelektrisches Heizungskonzept voraus. Effizientere aber auch teurere Erzeuger wie z.B. Wärmepumpen müssten hier zu stark überdimensioniert werden, um die erforderliche Leistung in dem kurzen Zeitfenster übertragen zu können.

Im nächsten Schritt werden potentiell geeignete Wärmeerzeuger, Speicher- und Übergabesysteme zusammengestellt und für die unterschiedlichen Gebäude bzw. Bauweisen dimensioniert. Die sich aus dieser Variantenmatrix ergebenden potentiellen Kombinationen aus Gebäudetyp, Bauweise, Erzeuger, Speicher und Übergabesystem (etwa 5.000 Varianten) werden zunächst im Rahmen einer Grobanalyse auf ihre grundsätzliche Eignung hin bewertet und weiter selektiert. Hierzu werden in einem ersten Schritt gleichmäßig über die Heizperiode verteilt angenommene Starkwindereignisse definiert. Basierend auf diesem Belade-Überbrückungs-Zyklus werden anschließend dynamische Simulationsrechnungen, mit einer idealisierten Anlagentechnik, zur Ermittlung der Energiebedarfe (Raumwärme und Brauchwarmwasser) für die einzelnen Überbrückungsperioden zwischen den Starkwindereignissen durchgeführt. Dies geschieht jeweils für die 3 unterschiedlichen Bauweisen der 4 Windheizungs-Typgebäude (Wohn- und Bürogebäude, jeweils Neubau und Sanierung). Diese Energiebedarfswerte der einzelnen Überbrückungsperioden werden den theoretisch verfügbaren Speicherkapazitäten der einzelnen Anlagentechniken bzw. der thermisch aktivierten Bauteile (Decke, Wände, Boden) gegenübergestellt und hieraus die zu erwartende Windstromdeckung ermittelt. Aufbauend hierauf werden die einzelnen Gebäude-/Anlagenvarianten in Hinblick auf deren Wirtschaftlichkeit im Vergleich zum EnEV-Referenzszenario bewertet und eine Auswahl vielversprechender Varianten unter dem Fokus einer möglichst hohen Windstromdeckung und der Kostenneutralität gegenüber den Referenzfällen getroffen. Die Wirtschaftlichkeitsbewertung erfolgt hierbei anhand der Kapitalwertmethode über einen Betrachtungszeitraum von 25 Jahren mit 3 verschiedenen Szenarien der Preissteigerung. Ergänzend zu den Investitionskosten werden hierbei auch die Wartungs- und Instandsetzungskosten sowie die Energiekosten für den Betrieb der Gebäude berücksichtigt.

Als Ergebnis dieser Grobanalyse zeigt sich, dass die Wirtschaftlichkeit gegenüber einer Anforderung an die Höhe der Windstromdeckung das deutlich kritischere Bewertungskriterium ist. Wärmeerzeuger mit höheren Investitionskosten wie z.B. Pelletkessel, erdreichgekoppelte Sole-Wärmepumpen, direktelektrische Heizmatten zur Bauteiltemperierung, Wärmespeicher mit PCM und Eisspeicher lassen sich in diesem Kontext nicht wirtschaftlich darstellen. Die Verwendung von klassischen elektrischen Speicherheizungen („Nachtspeicheröfen“) wird bezüglich ihrer Eignung für das Windheizungskonzept ebenfalls untersucht. Diese Systeme sind zur Nutzung von überschüssigem, nächtlichem Kohle- und Atomstrom zur Raumheizung tagsüber konzipiert. Ihr thermisches Rückhaltevermö-

gen ist somit auf etwa einen Tag hin optimiert, was deutlich zu kurz für einen Windheizungs-Einsatz ist. Prinzipiell erscheinen derartige Hochtemperaturspeichersysteme jedoch wegen der einfachen Installation, der geringen Investitionskosten und des geringen Platzbedarfs potentiell sehr interessant. Aus diesem Grund wird ein, noch in der Konzeptphase befindlicher, zentraler Hochtemperatursteinspeicher als potentiell zukünftiges Speichersystem im Rahmen der weiteren Analysen bewertet.

Die Anwendung des Windheizungskonzeptes auf Bürogebäude ist unter wirtschaftlichen Aspekten und auch den Anforderungen der Behaglichkeit auf Basis der Simulationen eher kritisch zu bewerten. Eine Anwendung ist daher vorrangig für Wohngebäude wahrscheinlich.

Für die im Rahmen der Grobanalyse identifizierten vielversprechendsten Gebäude-/Technik-Kombinationen werden im Anschluss detaillierte Simulationsmodelle zur Abbildung des thermisch/energetischen Verhaltens in der Softwareumgebung WUFI-Plus erstellt. Hierzu wird das Gebäude inklusive der Anlagen- und Speichertechnik zur dynamischen Berechnung des gekoppelten Verhaltens von Wärmeerzeugung, Wärmespeicherung- und Übergabe an das Gebäude modelliert und anschließend umfangreiche Variantenrechnungen durchgeführt (Detailanalyse). Auf Basis dieser Simulationsergebnisse werden je Variante der Endenergiebedarf für die Beheizung inkl. Brauchwarmwasser, die entsprechende Windstromdeckung und die auftretenden Temperaturen in den Räumen ermittelt. Die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Windheizungsgebäude wird unter Zugrundelegung der bereits in der Grobanalyse getroffenen Annahmen zur Preissteigerung und unterschiedlichen Windstrom-Tarifen bewertet. Zur Beurteilung der Umweltwirkung über den gesamten Lebenszyklus wird eine Ökobilanz in Anlehnung an DIN EN ISO 14040/44 und DIN EN 15978 durchgeführt. Die thermische Behaglichkeit des Innenraumklimas wird nach DIN EN 15251 bewertet. Als Beurteilungsgrundlage für die einzelnen Windheizungskonzepte stehen somit die Bewertungskriterien Windstromdeckung, Endenergiebedarf, Umweltwirkung (Treibhauspotential und nicht erneuerbare Primärenergie), Raumklima und Wirtschaftlichkeit zur Verfügung. Hierbei werden die einzelnen Kriterien jeweils in Bezug zu den entsprechenden Referenzfällen (Mindestanforderungen nach EnEV) dargestellt.

Zur Bewertung der Auswirkungen geringfügiger Abweichungen bei den zugrunde gelegten Simulations-Randbedingungen auf die Ergebnisse der Studie, wird eine Sensitivitätsanalyse am Beispiel des Anwendungsfalles Einfamilienhaus Neubau durchgeführt. Hierzu werden die Annahmen zu den Luftwechselraten bzw. Wärmerückgewinnungsgrad der mechanischen Lüftung, zum Wärmedämmstandard, zur thermisch aktivierbaren Gebäudespeichermasse sowie zum zulässigen Temperaturkorridor variiert. Die Erkenntnisse aus der Sensitivitätsanalyse dienen zur Abschätzung der Schwankungsbreite der Ergebnisse im Rahmen der Detailanalyse.

Die wesentlichen Erkenntnisse aus der Studie werden in Form eines Musterbauplans dokumentiert. Dieser dient potentiellen Planern und Bauherren als

Entscheidungshilfe, ob ihr Gebäude windheizungstauglich ist bzw. welche baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen notwendig wären, um ein „windheizungstaugliches“ Gebäude zu erstellen. Der Musterbauplan ist in drei Bereiche unterteilt. Diese Bereiche geben Empfehlungen für das Gebäude, der technischen Gebäudeausrüstung und stellen einige erste Auslegungshilfen in Form von Kennlinien zur Verfügung.

Generell zeigt sich im Rahmen der Studie, dass Einfamilienhäuser besonders geeignet sind, sowohl im Neubau als auch im sanierten Bestand als Windheizungsgebäude ausgeführt zu werden und sich diese sowohl unter ökologischen als auch unter ökonomischen Aspekten gegenüber den Referenzfällen (EnEV-Anforderung) positiv darstellen lassen. Bürogebäude eignen sich hingegen aufgrund der geringen erreichbaren Windstromdeckungsanteile, der hohen Kosten zum Erreichen der geforderten Wärmestandards sowie der deutlich höheren Überhitzungsgefahr nur eingeschränkt als Windheizungsgebäude. Ein hoher Wärmedämmstandard, eine mechanische Lüftungsanlage mit hohem Wärmerückgewinnungsgrad bzw. ein hieraus resultierender niedriger Heizenergiebedarf ist ein wichtiger Erfolgsfaktor für ein Windheizungsgebäude (u.a. aufgrund EnEV-Anforderung bei elektrischer Direktheizung). Geringfügige Änderungen an der energetischen Qualität der Bauausführung oder den Betriebsrandbedingungen führen allerdings zu keinen grundlegenden Veränderungen der Windheizungs-Eignung, wie sich im Rahmen der Sensitivitätsanalyse zeigt.

In Hinblick auf die unterschiedlichen Bauweisen Ziegel (bzw. Kalksandstein), Beton und Holz sind prinzipiell keine Einschränkungen bzgl. deren Eignung erkennbar. Windheizungsgebäude in Holzbauweise bzw. leichten Innenbauteilen benötigen allerdings große wasserbasierte Windperiodenspeicher (Warmwasserspeicher ausgelegt zur Überbrückung der Periode zwischen zwei Starkwindereignissen) oder entsprechend dimensionierte Hochtemperatur-Steinspeicher, da die Baukonstruktion als thermischer Speicher in der Regel keine ausreichende Speicherkapazität aufweist.

Zur Speicherung der Überschussenergie aus den Starkwindereignissen im Gebäude sind generell zwei unterschiedliche Realisierungswege möglich. Einerseits kann die Wärme in großen Windperiodenspeichern (Wasserspeicher oder Steinspeicher) gespeichert werden. Die Systeme sind so auszulegen, dass sie ausreichend Kapazität aufweisen, um das Gebäude während der Zeit zwischen zwei Starkwindereignissen zu beheizen bzw. den Warmwasserbedarf zu decken. Damit die Wärmeverluste des Speichers genutzt werden können, sollte dieser möglichst innerhalb der thermischen Gebäudehülle angeordnet sein. Bei den Wasserspeichern fallen die erforderlichen Speichervolumen deutlich höher aus als bei gängigen Heizungskonzepten. Entsprechend müssen größere Stellflächen für diese Speicher bei der Gebäude- bzw. Sanierungsplanung vorgesehen werden. Die Wärmeverteilung im Gebäude kann hierbei mit den klassischen Übergabesystemen wie z.B. Radiatoren, Wand- oder Fußbodenheizungen erfolgen. Niedertemperatur-Flächenheizsysteme eignen sich aufgrund der besseren Ausnutzung der Speicherkapazität (niedrigere Vorlauftemperatur) etwas

besser. Bei diesem Technikkonzept lässt sich wirtschaftlich eine Windstromdeckung bis nahe 100 % realisieren.

Ein zweiter Ansatz besteht darin, die Wärme direkt in den Bauteilen des Gebäudes zu speichern. Hierzu empfehlen sich insbesondere die Betondecken sowie (schwere) Innenwände. Zur thermischen Aktivierung der Bauteile eignen sich bevorzugt bauteilintegrierte Systeme (Bauteilaktivierung BTA). Hierbei ist auf eine hohe Flächenleistung der BTA zu achten (hoher Volumenstrom; geringer Verlegeabstand), damit die Bauteile während der kurzzeitigen Starkwindergebnisse auch vollständig beladen werden können. Im Sanierungsfall können anstelle der bauteilintegrierten Systeme auch oberflächennahe Aktivierungssysteme angewandt werden. Hierdurch erhöht sich allerdings die Gefahr der Raumüberhitzung. Aus Komfortaspekten sollten die BTA-Systeme generell eine raumweise Regelung aufweisen. Eine sorgfältige Planung und optimierte Regelungskonzepte sind hierbei zur Einhaltung der Komfortanforderungen nötig. Das Vorhandensein nicht aktivierter schwerer Innenbauteile, mit hoher Fähigkeit zur Temperaturpufferung, trägt zur Reduktion unerwünscht großer Temperaturschwankungen bei. Da der Nutzer bei diesem Windheizungskonzept mit Bauteilspeicherung eine geringere Einflussmöglichkeit auf die gewünschte Raumtemperatur hat, sollte eine gewisse Akzeptanz in Hinblick auf größere Temperaturschwankungen (zulässiger Temperaturkorridor) gegeben sein. Außerdem ist darauf zu achten, dass während der restlichen Betriebszeit möglichst keine bzw. nur eine geringe Nachheizung ins Bauteil erfolgt, da ansonsten der „Bauteilspeicher“ während des nächsten Starkwindereignisses nicht mehr ausreichend Beladepkapazität aufweist. Eine thermische Aktivierung von Außenbauteilen ist aufgrund der zu erwartenden höheren Transmissionswärmeverluste nicht zu empfehlen. Mit den im Rahmen dieser Studie analysierten Windheizungsvarianten lässt sich für die Gebäude mit Bauteilbeladung und Auslegungsspeicher (konventionelle Auslegung für Solarthermieanlage) eine Windstromdeckung von etwa 40 % bis 60 % realisieren. Die Kombination einer elektrischen Direktheizung (während des Starkwindereignisses) und einer kleinen Wärmepumpe (z.B. kostengünstige Außenluft-Wärmepumpe) zur Deckung des Restenergiebedarfs, ist insbesondere in Verbindung mit dem Auslegungsspeicher sinnvoll und lässt sich hier auch ökonomisch darstellen. Vor allem zeigt die Wärmepumpe durch die effizientere Umwandlung von Strom in Wärme eine verringerte Abhängigkeit von schwankenden Energiekosten, insbesondere in Bezug auf die Windstromkosten.

Zur Erhöhung der thermischen Speicherkapazität werden zusätzlich Bauteilaktivierungen mit einer raumseitigen Innendämmung untersucht. Durch die höhere thermische Entkopplung zum Raum hin ist zu erwarten, dass diese Bauteile auf ein etwas höheres Temperaturniveau beladen werden können (höhere Vorlauftemperaturen), ohne dass eine unmittelbar negative Auswirkung auf das Raumklima eintritt. Hierbei zeigt sich allerdings, dass die Dämmstärke eher gering gehalten werden muss, um eine ausreichende Heizleistung aus dem thermisch beladenen Bauteil außerhalb der Beladezeiträume sicher zu stellen. Außerdem genügt bei überdämmten Systeme die resultierende Wärmeabgabe an den Raum bereits bei einer höheren verbleibenden Bauteiltemperatur nicht

mehr, um den Raum ausreichend zu erwärmen. Somit wird durch die Überdämmung der nutzbare Temperaturbereich der Bauteile nicht erhöht, sondern nur nach oben verschoben. Aus diesem Grunde steht den erhöhten Investitionskosten durch die Dämmung kein Mehrwert entgegen. Diese Aussagen gelten nicht für Konzepte bei denen die Entladung gedämmter Innenbauteile aktiv beeinflusst werden kann. Derartige aktive Entladungskonzepte werden allerdings nicht im Rahmen dieser Studie betrachtet.

Da während der einzelnen Starkwindereignisse jeweils in kurzer Zeit hohe Energiemengen in die Speichersysteme geladen werden, müssen hierzu entsprechen hohe elektrische Anschlussleistung (Hausanschluss und Ortsnetz/Siedlungsverbund) vorgesehen werden. Bei entsprechend großer Anzahl von Installationen, müssen die Netze auf diese Peakleistung abgestimmt sein.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass sich durch die hier bewerteten Windheizungsgebäude unter den, der Studie zugrunde gelegten Randbedingungen, gegenüber dem Vergleichsszenario (EnEV 2014 - Referenztechnologie, effektive Einsparung unter Berücksichtigung des Konstruktions-Mehraufwands und der Betriebsphase) eine Reduktion des CO₂-Äquivalents um ca. 75 % bis 85 % beim Windperiodenspeicher, 45 % bis 60 % bei Bauteilspeichern und 75 % bis 80 % bei Bauteilspeichern in Kombination mit einer Wärmepumpe erreichen lassen (Neubau und Sanierung). Neben der Höhe der Windstromdeckung ist hierbei insbesondere die absolute Höhe des Reststrombedarfs für die ökologischen Umweltwirkungen maßgeblich. Bei steigendem regenerativem Anteil beim Reststrom sinken die Potentiale zur Minimierung der Umweltwirkungen.

Ergänzend wird untersucht, wie sich diese Ergebnisse der Bauteilspeicherung verändern, wenn nicht ein KfW40-Haus untersucht wird, sondern die getroffenen Annahmen einer Passivhaus-Projektierung entsprechen und der Windzyklus von 13 Tagen auf 7 Tage reduziert wird. Die erreichbaren Windstromdeckungen liegen dann bei knapp 50 % bis über 70 %. Gleichzeitig ist der Endenergiebedarf der Passivhäuser deutlich geringer. Hierdurch ergibt sich auch eine Reduzierung der Umweltwirkungen. Die resultierenden Lebenszykluskosten für ein Passivhaus-Windheizungsgebäude sind etwa um 40 – 80 €/m² günstiger als für ein KfW40-Windheizungsgebäude mit identischer TGA-Ausstattung.

Zum Vergleich eines Passivhauses in konventioneller Ausführung und eines Windheizungs-Passivhauses wird als Referenz ein Passivhaus mit einer Außenluft-Wärmepumpe als Wärmequelle in Verbindung mit einer Fußbodenheizung (Passivhaus Referenz) herangezogen. Bei der Passivhaus-Variante mit Windheizung zeigt sich zwar ein höherer Endenergiebedarf, aufgrund des höheren Windstromanteiles resultiert hieraus allerdings kein Nachteil bei der ökologischen Bewertung. In Hinblick auf den Nutzkomfort sind keine wesentlichen Unterschiede zu erkennen. Hingegen zeigt sich, unter den getroffenen Annahmen, dass die Lebenszykluskosten eines Windheizungs-Passivhauses um etwa 100 €/m² geringer sind, als bei einem konventionellen Passivhaus.

Für eine zukünftige Etablierung von Windheizungsgebäuden am Markt sind neben den technisch zu lösenden Fragestellungen insbesondere die wirtschaftlichen Hemmnisse zu beseitigen. Die Investitionsmehrkosten für den höheren Dämmstandard, Speichersysteme, TGA-Konzepte, etc. sind zu minimieren. Die Kosten für den Windstrom (während der Starkwindereignisse) müssen im Vergleich zu den heutigen Strompreisen deutlich reduziert werden, um wirtschaftlich tragfähige Windheizungs-Konzepte darstellen zu können. Hierbei sind insbesondere auch Änderungen bei den aktuellen Netzentgelten und der EEG-Umlage nötig, damit dem Endkunden entsprechend günstige Windstromtarife zur Verfügung gestellt werden können. Auch volkswirtschaftlich erscheint aufgrund der in dem Konzept Windheizung 2.0 vorliegenden hohen Netzdienlichkeit, der großen Energieeffizienz sowie der angebotsorientierten und ökologischen Stromabnahme diese Günstigerstellung durchaus gerechtfertigt. Dies hat tiefgreifenden Konsequenzen im Bereich des Energiemarkts und erfordert, bezüglich ihrer Umsetzung, ein deutliches politisches Engagement. Auch würden die hier angeregten Veränderungen der deutschen Stromtarifstruktur den Markt für zahlreiche andere, v.a. dezentrale, Lösungen zur netzdienlichen Verwendung von erneuerbar erzeugtem Überschussstrom öffnen. Auch ist bisher kein entsprechendes Steuerungs-Signal verfügbar, welches eine ausschließliche Beladung während Starkwindereignissen bzw. bei der Verfügbarkeit von Überschussstrom ermöglicht.

Bei der Nutzung der Gebäudemasse als „Windperioden-Speicher“ sind weiterführende Untersuchungen zur Optimierung der Be- und Entlademechanismen und insbesondere in Hinblick auf deren Regelungsalgorithmen nötig. Hierdurch ist zu erwarten, dass der Windstromdeckungsanteil deutlich gesteigert und gleichzeitig der Raumkomfort erhöht werden kann. Wetterprognosebasierte Regelungskonzepte, die zusätzliche Nutzung weiterer regenerativer Netzüberkapazitäten (kurzzeitige Windstromspitzen, PV, etc.) oder selbstlernende/reaktive Algorithmen wären hierzu beispielhaft zu erwähnen. Darüber hinaus erscheint das Konzept eines zentralen, elektrisch beheizten Hochtemperatur-Steinspeichers vielversprechende Ansätze zu bieten. Insbesondere unter dem Aspekt des deutlich geringeren Platzbedarfes, im Vergleich zu wasserbasierten Windperiodenspeichern, könnte dies zukünftig eine sehr attraktive Speicherlösung für Windheizungsgebäude darstellen.

Das Konzept Windheizung stellt sich als wirtschaftlich interessantes Instrument zur Sektorenkopplung (Strom/Wärme) und zur Netzstabilisierung mit einem hohen Potential zur Minderung der Umweltwirkungen dar, das vor allem bei hocheffizienten Bauweisen auch für den Besitzer wirtschaftlich sein kann. Zur Breitereinführung bedarf es aber noch weiterer Entwicklungen und Optimierungen der einzelnen Technikkomponenten und der regulatorischen Randbedingungen.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Graichen, Patrick; Kleiner, Mara; Podewils, Christoph: AGORA Energiewende. URL https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2016/Jahresauswertung_2016/Agora_Jahresauswertung_2015_Slides_web_DE.pdf. Stand 7.Januar.2016
- [2] Lüking, Rolf-Michael; Hauser, Gerd: Die thermische Konditionierung von Gebäuden im Kontext eines zukünftigen Energieversorgungssystems. Stuttgart (Deutschland): Fraunhofer IRB Verlag, 2011.
- [3] DIN V 18599:2011-02: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 1 bis Teil 10.
- [4] WUFI-Plus Test 3.x.
- [5] Gerhardt, Norman; Richts, Christoph; Hochloff, Patrick; et al.; Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES: Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien. 046/09-S-2014/de
- [6] Bundesnetzagentur ; Monitoringbericht 2015
- [7] Windenergiereport, Fraunhofer IWES. 2014.
- [8] Janssen, Katrin; Faulstich, Stefan; Hahn, Barthold; et al.: Windenergie Report Deutschland 2014. Stuttgart (Deutschland): Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, 2014.
- [9] Deutscher Wetterdienst. 2014. <http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=B&DAT=Beaufort-Skala..>
- [10] Sascha Link. Fraunhofer IBP. Simulative Untersuchung von großen Pufferspeichern im Einfamilienhaus in Abhängigkeit von regionalen Wind- und Solarspitzen. 2015.
- [11] Richtwerttabelle nach Kleemann und Meliß.
- [12] Kopp, Stefan: Windenergie im Binnenland - Startseite. URL <http://www.windenergie-im-binnenland.de/>. Stand 22.06.2016
- [13] Bayerische Landesamt für Statistik: Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung: Statistischer Bericht. Version für 2014 verfügbar unter https://www.statistik.bayern.de/medien/presse/156_2015_56_f_statistische_bericht.xls. URL https://www.statistik.bayern.de/medien/presse/156_2015_56_f_statistische_bericht.xls. Stand 28.06.2016
- [14] Statistisches Bundesamt: DESTATIS: Bestand an Wohnungen – Fachserie 5 Reihe 3 – 2013. URL https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bauen/Wohnsituation/BestandWohnungen2050300137005.xlsx?_blob=publicationFile. Stand 28.06.2016
- [15] Bayerisches Landesamt für Statistik: Zensusdatenbank Zensus 2011 der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder: Gebäude nach Baujahr (Mikrozensus-Klassen) für Bayern (Bundesland). URL https://ergebnisse.zensus2011.de/#dynTable:statUnit=GEBAEUDE;absRel=ANZAHL;ags=09;agsAxis=X;yAxis=BAUJAHR_MZ. Stand 28.06.2016
- [16] Bayerisches Landesamt für Statistik: Statistische Berichte – Baufertigstellungen in Bayern 2014. URL <https://www.statistik.bayern.de/veroeffentlichungen/epaper.php?pid=42342&t=2>. Stand 28.06.2016
- [17] Bundesamt für Statistik: Statistisches Jahrbuch – Deutschland und Internationales – 2013.

- URL [Statistisches Jahrbuch – Deutschland und Internationales – 2013](#). Stand 28.06.2016
- [18] Nemeth, I. et al.: Energetische Gebäudesanierung in Bayern. Technische Universität München, 2013.
- [19] Kohler, S.: Jahrhundertaufgabe Energiewende: Wo stehen wir? Einsatz von Wärmedämmung im Sanierungs- und Neubaubereich..
- [20] Statistisches Bundesamt: Statistisches Jahrbuch 2015 - 23 - Bauen. URL https://www.destatis.de/DE/Publikationen/StatistischesJahrbuch/Bauen.pdf?__blob=publicationFile. Stand 28.06.2016
- [21] Klauß, S.: Entwicklung einer Datenbank mit Modellgebäuden für energiebezogene Untersuchungen, insbesondere der Wirtschaftlichkeit. Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V., 2010.
- [22] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV; Energieeinsparverordnung vom 24. Juli 2007 (BGBl. I S. 1519), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 24. Oktober 2015 (B.
- [23] DIN EN 15251:2012-12: Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007.
- [24] Antretter, F., Pazold, M., Künzel, H. M. and Sedlbauer, K. P. (2015) Anwendung hygrothermischer Gebäudesimulation, in Bauphysik Kalender 2015 (ed N. A. Fouad), Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany. doi: 10.1002/9783433605158.ch5.
- [25] Künzel, H. M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation. Stuttgart 20.07.1994..
- [26] Pazold, M. and Antretter, F. (2013), Hygrothermische Gebäudesimulation mit Multizonen-Gebäudedurchströmungsmodell. Bauphysik, 35: 86–92. doi: 10.1002/bapi.201310051.
- [27] Burhenne S., Radon J., Pazold M., Herkel S., Antretter, F. 2011. Integration of HVAC Models into a Hygrothermal Whole Building Simulation Tool, Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Assoc.
- [28] IB Hauser, ITG Dresden, Fraunhofer IBP, Ecofys Deutschland, IB Schiller: EnEV 2017 – Vorbereitende Untersuchungen.
- [29] Kapitalwert - Wikipedia. URL <https://de.wikipedia.org/wiki/Kapitalwert>. Stand 22.06.2016
- [30] VDI 2067 Blatt 1:2012-09: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung.
- [31] Agora Energiewende; Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien
- [32] Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V. (DGNB): DGNB Nutzungsprofil Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude, Version 2015.2, Stuttgart (2015)..
- [33] EN ISO 14040:2009: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen bzw. EN ISO 14044:2006: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen.
- [34] DIN EN 15978: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode.
- [35] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR): BNB Nutzungsdauern von

Bauteilen. Stand 03.11.2011.

- [36] BMUB: Ökobau.dat. Baustoff- und Gebäudedaten im Internetportal „Nachhaltiges Bauen“. Stand: 18.05.2016. <http://www.nachhaltigesbauen.de/baustoff-und-gebaeuedaten/oekobaudat.html>, zuletzt abgerufen am 23.05.2016..
- [37] Thinkstep AG: GaBi Software-System und Datenbanken zur Ganzheitlichen Bilanzierung. Copyright, TM. Stuttgart, Echterdingen 1992-2016..
- [38] Arbeitsgemeinschaft DLR, IWES und IFNE: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, Schlussbericht, BMU - FKZ 03MAP146, März 2012..
- [39] DIN EN 15978:2012-10: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode; Deutsche Fassung EN 15978:2011.
- [40] DIN EN ISO 7730:2006-05: Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005).
- [41] Kriterien für den Passivhaus-, EnerPHit- und PHI-Energiesparhaus-Standard, Version 9b, Stand 30.06.2015, Passivhaus Institut.
- [42] Landwirtschaft, BFL: Richtpreise für den Neu- und Umbau landwirtschaftlicher Wirtschaftsgebäude. URL <http://www.bfl-online.de/media/docs/alb06.pdf>. Stand 7.06.2016
- [43] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie: Energie-Atlas Bayern. URL <https://www.energieatlas.bayern.de/>. Stand 21.06.2016
- [44] Bundesverband WindEnergie e.V.: Bundesverband WindEnergie e.V. URL <https://www.wind-energie.de/>. Stand 21.06.2016

Anhang 1 - Dokumentation der Bauteilaufbauten

1 Materialien der Einzel-Bauteile

Tabelle 30 zeigt die für die einzelnen Bauteile der Typgebäude ausgewählten Baumaterialien.

Tabelle 30:
Zuordnung der Baumaterialien für die einzelnen Bauteile der Typgebäude

Bauteil	Einfamilienhaus								Bürobau							
	Neubau				Sanierung				Neubau				Sanierung			
	Referenz	Ziegelbau	Betonbau	Holzbau	Referenz	Ziegelbau	Betonbau	Holzbau	Referenz	Ziegelbau	Betonbau	Holzbau	Referenz	Ziegelbau	Betonbau	Holzbau
Außenwand	Z	Z	B	H	Z	Z	B	H	B	Z	B	H	B	Z	B	
Dach	H	H			H	H			B	B		H	B	B		
Kellwand	B	B			B	B			-							
Bodenplatte	B	B			B	B			B	B		B	B		-	
Decken	B	B	B	H	B	B	B	H	B	B	B	H	B	B	B	
Innenwände	Z	Z	B	H	Z	Z	B	H	H	Z	B	H	H	Z	B	
Flurwände	-								B	Z	B	H	B	Z	B	

- Z** Ziegel
- B** Beton
- H** Holz / Leichtbau / GKB (Immer ständer bzw. Fehlbodenbauweise; nie Brettstapel o.ä.)

Die U-Werte der Windheizungs-Gebäude sind in Tabelle 31 bis Tabelle 33 dargestellt.

Tabelle 31:

Kennwerte der Konstruktionen des **Einfamilienhauses Neubau** im Projekt Windheizung.

Baustandard	Bauteil	U-Wert [W/m ² K]
Neubau EnEV Niveau (H'T REF 100%)	Dach	0,20 W/m ² K
	Außenwand	0,28 W/m ² K
	Fenster	1,3 W/m ² K (g = 0,6; τ = 0,78)
	Bodenplatte/Wand gegen Erdreich	0,35 W/m ² K
	Wand/Decke ge- gen unbeheizt	0,35 W/m ² K
Neubau KfW 40 Niveau (H'T REF 55%)	Dach	0,08 W/m ² K
	Außenwand	0,1 W/m ² K
	Fenster	0,85 W/m ² K (g = 0,5; τ = 0,7)
	Bodenplatte/Wand gegen Erdreich	0,2 W/m ² K
	Wand/Decke ge- gen unbeheizt	0,2 W/m ² K

Tabelle 32:

Kennwerte der Konstruktionen des **Einfamilienhauses Sanierungsfall** im Projekt Windheizung.

Baustandard	Bauteil	U-Wert [W/m ² K]
Sanierung EnEV Niveau (H'T REF 140%)	Dach	0,35 W/m ² K
	Außenwand	0,45 W/m ² K
	Fenster	1,5 W/m ² K (g = 0,65; τ = 0,8)
	Bodenplatte/Wand gegen Erdreich	0,6 W/m ² K
	Wand/Decke ge- gen unbeheizt	0,45 W/m ² K
Sanierung KfW 55 Niveau (H'T REF 70%)	Dach	0,1 W/m ² K
	Außenwand	0,18 W/m ² K
	Fenster	1,0 W/m ² K (g = 0,55; τ = 0,75)
	Bodenplatte/Wand gegen Erdreich	0,2 W/m ² K
	Wand/Decke ge- gen unbeheizt	0,3 W/m ² K

Tabelle 33:

Kennwerte der Konstruktionen des **ZUB-Bürogebäudes** im Projekt Windheizung .

Baustandard	Bauteil	U-Wert [W/m ² K]
Neubau EnEV Niveau (H'T REF 100%)	Dach	0,20 W/m ² K
	Außenwand	0,28 W/m ² K
	Fenster	1,3 W/m ² K (g = 0,6; τ = 0,78)
	Bodenplatte/Wand gegen Erdreich	0,35 W/m ² K
	Wand/Decke ge- gen unbeheizt	0,35 W/m ² K
Sanierung EnEV Niveau (H'T REF 140%)	Dach	0,45 W/m ² K
	Außenwand	0,5 W/m ² K
	Fenster	1,5 W/m ² K (g = 0,65; τ = 0,8)
	Bodenplatte/Wand gegen Erdreich	0,6 W/m ² K
	Wand/Decke ge- gen unbeheizt	0,45 W/m ² K
Neubau KfW 40 Niveau (H'T REF 55%)	Dach	0,08 W/m ² K
	Außenwand	0,1 W/m ² K
	Fenster	0,8 W/m ² K (g = 0,48; τ = 0,65)
	Bodenplatte/Wand gegen Erdreich	0,1 W/m ² K
	Wand/Decke ge- gen unbeheizt	0,2 W/m ² K
Sanierung KfW 55 Niveau (H'T REF 70%)	Dach	0,08 W/m ² K
	Außenwand	0,2 W/m ² K
	Fenster	0,9 W/m ² K (g = 0,52; τ = 0,72)
	Bodenplatte/Wand gegen Erdreich	0,2 W/m ² K
	Wand/Decke ge- gen unbeheizt	0,3 W/m ² K

2 Bauteilaufbauten

2.1 Einfamilienhaus – Neubaufall – Ziegelbauweise

Assemblies

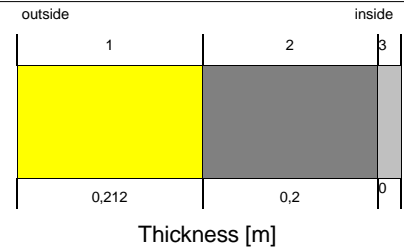
Assembly (Id.1): wh20 - EFH_NEU_BP_NeuB (Bodenplatte)

Homogenous layers

Thermal resistance: 3,83 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,25 W/m²K

Thickness: 0,432 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - DämmungPU - 057	40	1500	0,057	0,212	Yellow
2	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Dark Grey
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Light Grey

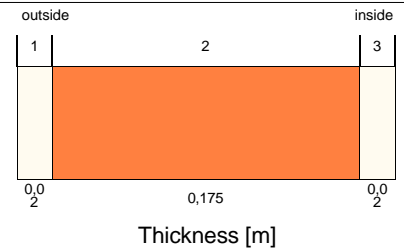
Assembly (Id.2): wh20 - EFH_IW_Z (Innenwand)

Homogenous layers

Thermal resistance: 0,407 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 1,5 W/m²K

Thickness: 0,215 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	Light Yellow
2	wh20 - Ziegel - 0,5	1200	850	0,5	0,175	Orange
3	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	Light Yellow

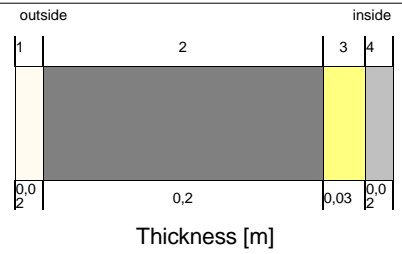
Assembly (Id.3): wh20 - EFH_De_RefB (Innendecke)

Homogenous layers

Thermal resistance: 0,889 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,92 W/m²K

Thickness: 0,27 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	
2	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	
3	wh20 – Dämmung MW -	30	840	0,04	0,03	
4	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	

Assembly (Id.4): wh20 - EFH_NEU_KW_NeuB (Kellerwand)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 3,83 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,25 W/m²K

Thickness: 0,432 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - DämmungPU - 057	40	1500	0,057	0,212	Yellow
2	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Grey
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Light Grey

Assembly (Id.7): wh20 - EFH_NEU_KD_NeuRefB (Kellerdecke)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 0,861 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,94 W/m²K

Thickness: 0,25 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Grey
2	wh20 - DämmungMW - 040	30	840	0,04	0,03	Yellow
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Light Grey

Assembly (Id.5): wh20 - EFH_NEU_AW_NeuZ (Außenwand)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 6,486 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,15 W/m²K

Thickness: 0,534 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Zementputz	1800	850	0,87	0,015	Light Yellow
2	wh20 - DämmungPU - 065	40	1500	0,065	0,201	Yellow
3	wh20 - Ziegel - 089	500	1000	0,089	0,298	Red
4	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	Light Yellow

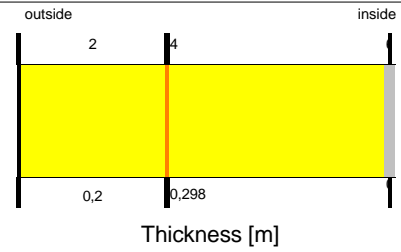
Assembly (Id.6): wh20 - EFH_NEU_Dach_NeuH (Dach)

Homogenous layers

Thermal resistance: 7,551 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,13 W/m²K

Thickness: 0,522 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Unterspannbahn	2400	1000	0,17	0,004	Blue
2	PU (heat cond.: 0,03 W/mK)	40	1500	0,03	0,2	Yellow
3	Hardwood	650	1500	0,13	0,005	Orange
4	wh20 - SparrenDämmung - 0,392	100	1100	0,392	0,298	Yellow
5	wh20 - Unterspannbahn	2400	1000	0,17	0,002	Blue
6	Gipskartonplatte	900	850	0,25	0,013	Grey

2.2 Einfamilienhaus – Neubaufall – Betonbauweise

Assemblies

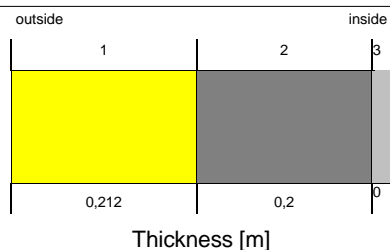
Assembly (Id.1): wh20 - EFH_NEU_BP_NeuB (Bodenplatte)

Homogenous layers

Thermal resistance: 3,83 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,25 W/m²K

Thickness: 0,432 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - DämmungPU - 057	40	1500	0,057	0,212	Yellow
2	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Dark Grey
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Light Grey

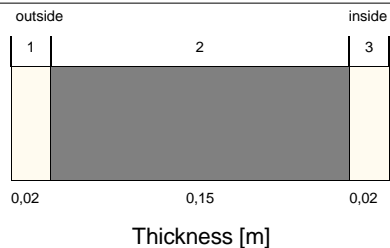
Assembly (Id.2): wh20 - EFH_IW_B (Innenwand)

Homogenous layers

Thermal resistance: 0,129 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 2,57 W/m²K

Thickness: 0,19 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	Yellow
2	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,15	Dark Grey
3	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	Yellow

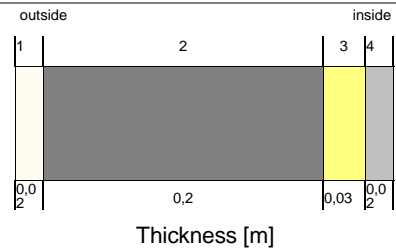
Assembly (Id.3): wh20 - EFH_De_RefB (Innendecke)

Homogenous layers

Thermal resistance: 0,889 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,92 W/m²K

Thickness: 0,27 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	Yellow
2	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Dark Grey
3	wh20 - DämmungMW - 040	30	840	0,04	0,03	Light Yellow
4	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Grey

Assembly (Id.4): wh20 - EFH_NEU_KW_NeuB (Kellerwand)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 3,83 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,25 W/m²K

Thickness: 0,432 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - DämmungPU - 057	40	1500	0,057	0,212	Yellow
2	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Dark Grey
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Light Grey

Assembly (Id.7): wh20 - EFH_NEU_KD_NeuRefB (Kellerdecke)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 0,861 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,94 W/m²K

Thickness: 0,25 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Dark Grey
2	wh20 - DämmungMW - 040	30	840	0,04	0,03	Yellow
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Light Grey

Assembly (Id.5): wh20 - EFH_NEU_AW_NeuB (Außenwand)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 6,5 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,15 W/m²K

Thickness: 0,572 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Zementputz	1800	850	0,87	0,015	Light Yellow
2	wh20 - DämmungPU - 053	40	1500	0,053	0,337	Yellow
3	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Dark Grey
4	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	Light Yellow

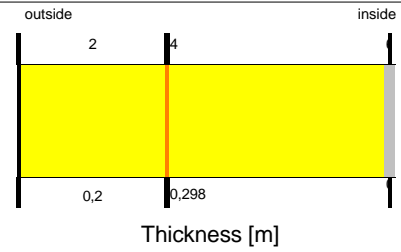
Assembly (Id.6): wh20 - EFH_NEU_Dach_NeuH (Dach)

Homogenous layers

Thermal resistance: 7,551 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,13 W/m²K

Thickness: 0,522 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Unterspannbahn	2400	1000	0,17	0,004	Blue
2	PU (heat cond.: 0,03 W/mK)	40	1500	0,03	0,2	Yellow
3	Hardwood	650	1500	0,13	0,005	Orange
4	wh20 - SparrenDämmung - 0,392	100	1100	0,392	0,298	Yellow
5	wh20 - Unterspannbahn	2400	1000	0,17	0,002	Blue
6	Gipskartonplatte	900	850	0,25	0,013	Grey

2.3 Einfamilienhaus – Neubaufall – Holzbauweise

Assemblies

Assembly (Id.1): wh20 - EFH_NEU_BP_NeuB (Bodenplatte)

<p>Homogenous layers</p> <p>Thermal resistance: 3,83 m²K/W (without R_{si}, R_{se})</p> <p>Heat transfer coefficient(U-value): 0,25 W/m²K</p> <p>Thickness: 0,432 m</p>	<p>outside 1 2 3 inside</p> <p>0,212 0,2 0</p> <p>Thickness [m]</p>
--	---

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - DämmungPU - 057	40	1500	0,057	0,212	Yellow
2	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Grey
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Light Grey

Assembly (Id.2): wh20 - EFH_IW_H (Innenwand)

<p>Homogenous layers</p> <p>Thermal resistance: 2,7 m²K/W (without R_{si}, R_{se})</p> <p>Heat transfer coefficient(U-value): 0,34 W/m²K</p> <p>Thickness: 0,15 m</p>	<p>outside 1 2 3 inside</p> <p>0,025 0,1 0,025</p> <p>Thickness [m]</p>
--	---

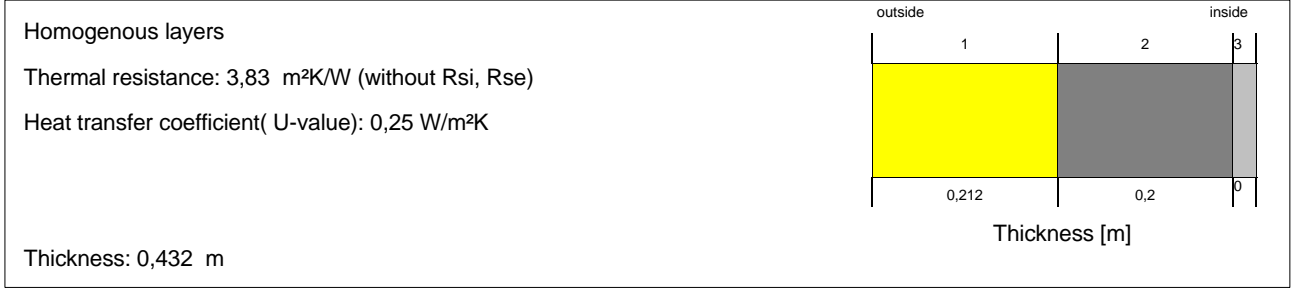
Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Gipskartonplatte	900	850	0,25	0,025	Grey
2	wh20 - DämmungMW - 040	30	840	0,04	0,1	Yellow
3	Gipskartonplatte	900	850	0,25	0,025	Grey

Assembly (Id.3): wh20 - EFH_De_H (Innendecke)

<p>Homogenous layers</p> <p>Thermal resistance: 1,209 m²K/W (without R_{si}, R_{se})</p> <p>Heat transfer coefficient(U-value): 0,71 W/m²K</p> <p>Thickness: 0,28 m</p>	<p>outside 1 2 3 4 5 inside</p> <p>0 0,2 0,02 0,03 0,02</p> <p>Thickness [m]</p>
--	--

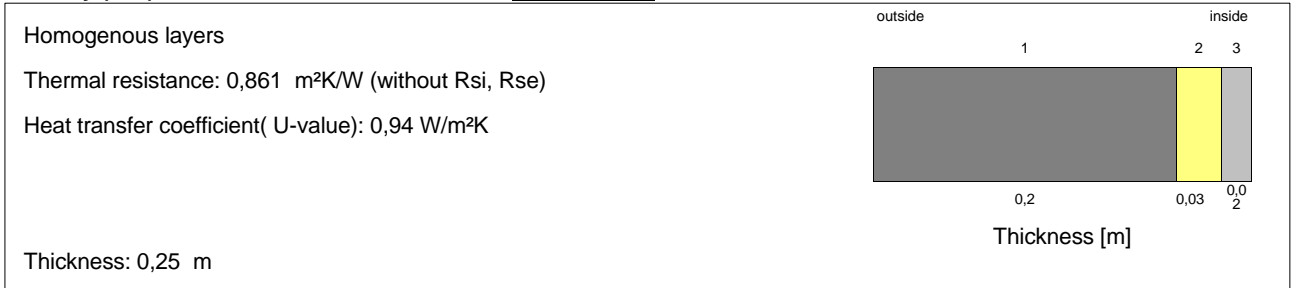
Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Oriented Strand Board (density: 630 kg/m ³)	630	1500	0,13	0,01	Orange
2	Air Layer 150 mm	1,3	1000	0,94	0,2	Cyan
3	Oriented Strand Board (density: 630 kg/m ³)	630	1500	0,13	0,02	Orange
4	wh20 - DämmungMW - 040	30	840	0,04	0,03	Yellow
5	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Grey

Assembly (Id.4): wh20 - EFH_NEU_KW_NeuB (Kellerwand)



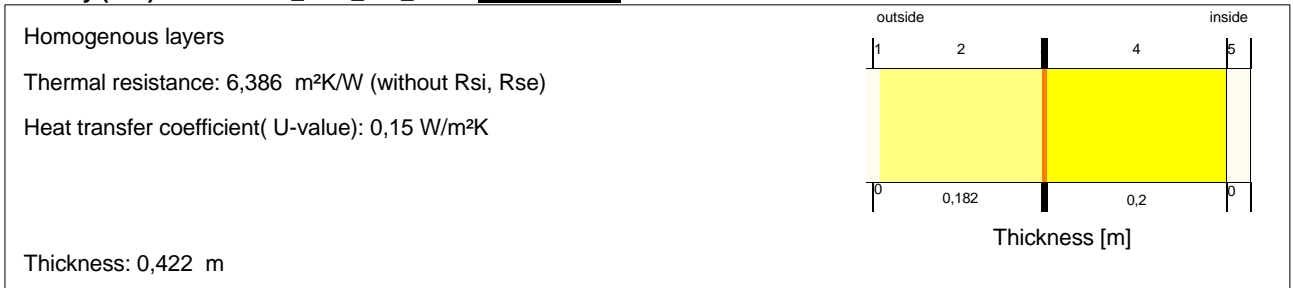
Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - DämmungPU - 057	40	1500	0,057	0,212	Yellow
2	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Grey
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Light Grey

Assembly (Id.7): wh20 - EFH_NEU_KD_NeuRefB (Kellerdecke)



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Grey
2	wh20 - DämmungMW - 040	30	840	0,04	0,03	Yellow
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Light Grey

Assembly (Id.5): wh20 - EFH_NEU_AW_NeuH (Außenwand)



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Zementputz	1800	850	0,87	0,015	Light Yellow
2	wh20 - DämmungMW - 098	30	840	0,098	0,182	Yellow
3	Oriented Strand Board (density: 630 kg/m ³)	630	1500	0,13	0,005	Orange
4	wh20 - StänderDämmung - 0,045	100	1100	0,045	0,2	Yellow
5	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	Light Yellow

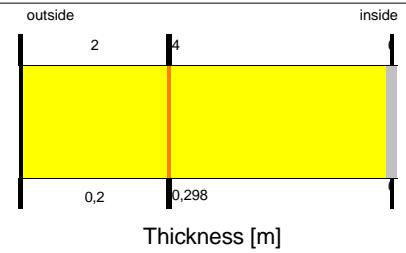
Assembly (Id.6): wh20 - EFH_NEU_Dach_NeuH (Dach)

Homogenous layers

Thermal resistance: 7,551 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,13 W/m²K

Thickness: 0,522 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Unterspannbahn	2400	1000	0,17	0,004	Blue
2	PU (heat cond.: 0,03 W/mK)	40	1500	0,03	0,2	Yellow
3	Hardwood	650	1500	0,13	0,005	Orange
4	wh20 - SparrenDämmung - 0,392	100	1100	0,392	0,298	Yellow
5	wh20 - Unterspannbahn	2400	1000	0,17	0,002	Blue
6	Gipskartonplatte	900	850	0,25	0,013	Grey

2.4 Referenz – Einfamilienhaus – Neubaufall

Assemblies

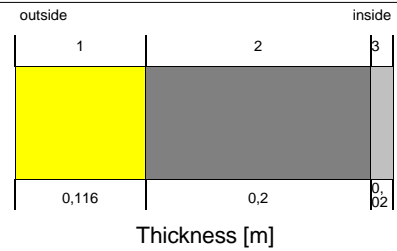
Assembly (Id.1): wh20 - EFH_NEU_BP_NeuRef (Bodenplatte)

Homogenous layers

Thermal resistance: 2,341 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,4 W/m²K

Thickness: 0,336 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - DämmungPU - 052	40	1500	0,052	0,116	Yellow
2	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Grey
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Light Grey

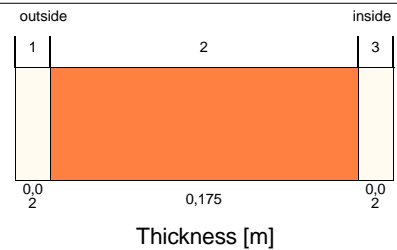
Assembly (Id.2): wh20 - EFH_IW_Z (Innenwand)

Homogenous layers

Thermal resistance: 0,407 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 1,5 W/m²K

Thickness: 0,215 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	Light Yellow
2	wh20 - Ziegel - 0,5	1200	850	0,5	0,175	Orange
3	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	Light Yellow

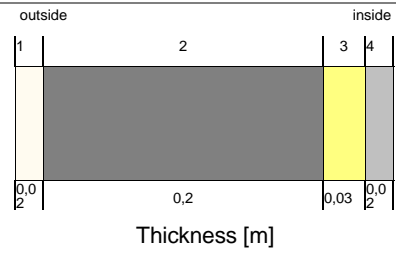
Assembly (Id.3): wh20 - EFH_De_RefB (Innendecke)

Homogenous layers

Thermal resistance: 0,889 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,92 W/m²K

Thickness: 0,27 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	Yellow
2	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Dark Grey
3	wh20 - DämmungMW - 040	30	840	0,04	0,03	Yellow
4	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Grey

Assembly (Id.4): wh20 - EFH_NEU_KW_NeuRef (Kellerwand)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 2,341 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,4 W/m²K

Thickness: 0,336 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - DämmungPU - 052	40	1500	0,052	0,116	Yellow
2	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Grey
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Light Grey

Assembly (Id.7): wh20 - EFH_NEU_KD_NeuRefB (Kellerdecke)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 0,861 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,94 W/m²K

Thickness: 0,25 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Grey
2	wh20 - DämmungMW - 040	30	840	0,04	0,03	Yellow
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Light Grey

Assembly (Id.5): wh20 - EFH_NEU_AW_NeuRef (Außenwand)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 2,857 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,33 W/m²K

Thickness: 0,333 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Zementputz	1800	850	0,87	0,015	White
2	wh20 - Ziegel - 106	500	1000	0,106	0,298	Red
3	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	White

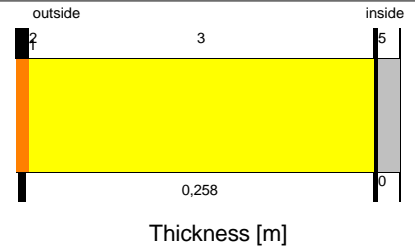
Assembly (Id.6): wh20 - EFH_NEU_Dach_NeuRef (Dach)

Homogenous layers

Thermal resistance: 3,918 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,25 W/m²K

Thickness: 0,282 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Unterspannbahn	2400	1000	0,17	0,004	Blue
2	Hardwood	650	1500	0,13	0,005	Orange
3	wh20 - SparrenDämmung - 0,068	100	1100	0,068	0,258	Yellow
4	wh20 - Unterspannbahn	2400	1000	0,17	0,002	Blue
5	Gipskartonplatte	900	850	0,25	0,013	Grey

2.5 Einfamilienhaus – Sanierungsfall – Ziegelbauweise

Assemblies

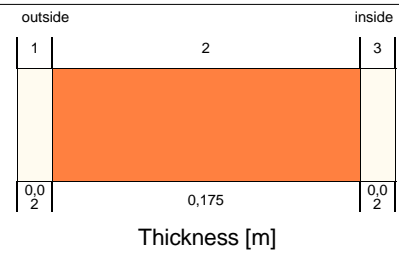
Assembly (Id.6): wh20 - EFH_IW_Z (2) (Innenwand)

Homogenous layers

Thermal resistance: 0,407 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 1,5 W/m²K

Thickness: 0,215 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Gipsputz (2)	1400	850	0,7	0,02	Light Yellow
2	wh20 - Ziegel - 0,5 (2)	1200	850	0,5	0,175	Orange
3	wh20 - Gipsputz (2)	1400	850	0,7	0,02	Light Yellow

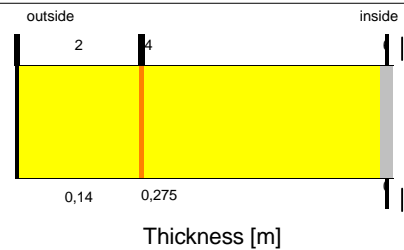
Assembly (Id.1): wh20 - EFH_SAN_Dach_SanH (Dach)

Homogenous layers

Thermal resistance: 6,531 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,15 W/m²K

Thickness: 0,439 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Unterspannbahn (2)	2400	1000	0,17	0,004	Blue
2	PU (heat cond.: 0,03 W/mK) (6)	40	1500	0,03	0,14	Yellow
3	Hardwood (6)	650	1500	0,13	0,005	Orange
4	wh20 - SparrenDämmung - 0,158 (2)	100	1100	0,158	0,275	Yellow
5	wh20 - Unterspannbahn (2)	2400	1000	0,17	0,002	Blue
6	Gipskartonplatte (5)	900	850	0,25	0,013	Grey

Assembly (Id.2): wh20 - EFH_SAN_AW_SanZ (Außenwand)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 4,204 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,23 W/m²K

Thickness: 0,485 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Zementputz (2)	1800	850	0,87	0,015	
2	wh20 - DämmungPU - 041 (2)	40	1500	0,041	0,15	Yellow
3	Solid Brick, extruded (6)	1650	850	0,6	0,3	Red
4	wh20 - Gipsputz (2)	1400	850	0,7	0,02	

Assembly (Id.10): wh20 - EFH_SAN_KD_SanB (Kellerdecke)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 2,505 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,36 W/m²K

Thickness: 0,324 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - DämmungPU - 045 (2)	40	1500	0,045	0,074	Yellow
2	wh20 - Beton (2)	2400	850	2,1	0,2	Grey
3	wh20 - DämmungMW - 040 (2)	30	840	0,04	0,03	Yellow
4	wh20 - Estrich (2)	2100	850	1,3	0,02	Grey

Assembly (Id.7): wh20 - EFH_De_RefB (Innendecken)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 0,889 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,86 W/m²K

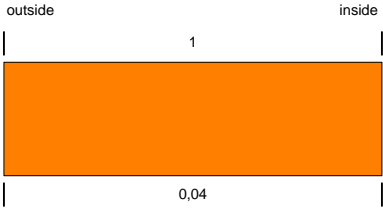
Thickness: 0,27 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	
2	wh20 - Beton (2)	2400	850	2,1	0,2	Grey
3	wh20 - DämmungMW - 040	30	840	0,04	0,03	Yellow
4	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Grey

Assembly (Id.11): IEA58 Exterior Door (Eingangstüre)

Thermal resistance: 0,305 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient (U-value): 3,28 W/m²K



Thickness: 0,04 m

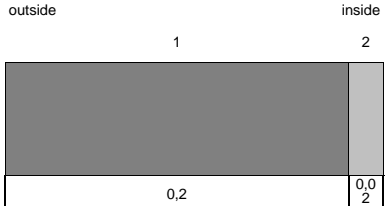
Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	IEA58 Wood (Fichte_Kie)	600	1000	0,131	0,04	

Assembly (Id.9): wh20 - EFH_SAN_BP_SanRefB (Bodenplatte & Kellerwände)

Homogenous layers

Thermal resistance: 0,111 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient (U-value): 3,56 W/m²K



Thickness: 0,22 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Beton (2)	2400	850	2,1	0,2	
2	wh20 - Estrich (2)	2100	850	1,3	0,02	

2.6 Einfamilienhaus – Sanierungsfall – Betonbauweise

Assemblies

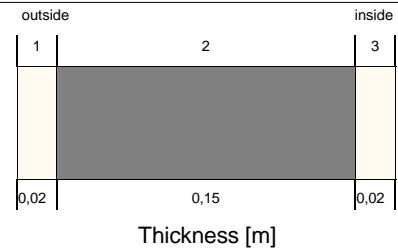
Assembly (Id.6): wh20 - EFH_IW_B (2) (Innenwand)

Homogenous layers

Thermal resistance: 0,129 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 2,57 W/m²K

Thickness: 0,19 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Gipsputz (2)	1400	850	0,7	0,02	Yellow
2	wh20 - Beton (2)	2400	850	2,1	0,15	Grey
3	wh20 - Gipsputz (2)	1400	850	0,7	0,02	Yellow

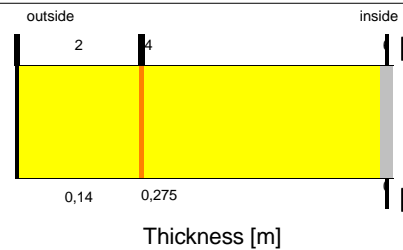
Assembly (Id.1): wh20 - EFH_SAN_Dach_SanH (Dach)

Homogenous layers

Thermal resistance: 6,531 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,15 W/m²K

Thickness: 0,439 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Unterspannbahn (2)	2400	1000	0,17	0,004	Blue
2	PU (heat cond.: 0,03 W/mK) (6)	40	1500	0,03	0,14	Yellow
3	Hardwood (6)	650	1500	0,13	0,005	Orange
4	wh20 - SparrenDämmung - 0,158 (2)	100	1100	0,158	0,275	Yellow
5	wh20 - Unterspannbahn (2)	2400	1000	0,17	0,002	Blue
6	Gipskartonplatte (5)	900	850	0,25	0,013	Grey

Assembly (Id.2): wh20 - EFH_SAN_AW_SanB (Außenwand)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 4,208 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,23 W/m²K

Thickness: 0,418 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Zementputz (2)	1800	850	0,87	0,015	
2	wh20 - DämmungPU - 045 (2)	40	1500	0,045	0,183	
3	wh20 - Beton (2)	2400	850	2,1	0,2	
4	wh20 - Gipsputz (2)	1400	850	0,7	0,02	

Assembly (Id.10): wh20 - EFH_SAN_KD_SanB (Kellerdecke)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 2,505 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,36 W/m²K

Thickness: 0,324 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - DämmungPU - 045 (2)	40	1500	0,045	0,074	
2	wh20 - Beton (2)	2400	850	2,1	0,2	
3	wh20 - DämmungMW - 040 (2)	30	840	0,04	0,03	
4	wh20 - Estrich (2)	2100	850	1,3	0,02	

Assembly (Id.7): wh20 - EFH_De_RefB (Innendecke)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 0,889 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,86 W/m²K

Thickness: 0,27 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	
2	wh20 - Beton (2)	2400	850	2,1	0,2	
3	wh20 - DämmungMW - 040	30	840	0,04	0,03	
4	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	

Assembly (Id.11): IEA58 Exterior Door (Eingangstüre)

Thermal resistance: 0,305 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Thickness: 0,04 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	IEA58 Wood (Fichte_Kie)	600	1000	0,131	0,04	

Assembly (Id.9): wh20 - EFH_SAN_BP_SanRefB (Bodenplatte & Kellerwände)

Homogenous layers

Thermal resistance: 0,111 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 3,56 W/m²K

Thickness: 0,22 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Beton (2)	2400	850	2,1	0,2	
2	wh20 - Estrich (2)	2100	850	1,3	0,02	

2.7 Einfamilienhaus – Sanierungsfall – Holzbau

Assemblies

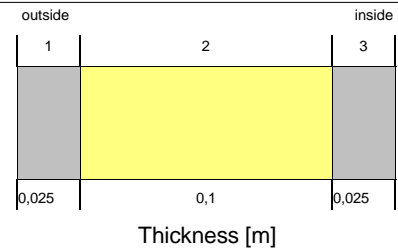
Assembly (Id.6): wh20 - EFH_IW_H (Innenwand)

Homogenous layers

Thermal resistance: 2,7 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,34 W/m²K

Thickness: 0,15 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Gipskartonplatte (5)	900	850	0,25	0,025	Grey
2	wh20 - DämmungMW - 040 (2)	30	840	0,04	0,1	Yellow
3	Gipskartonplatte (5)	900	850	0,25	0,025	Grey

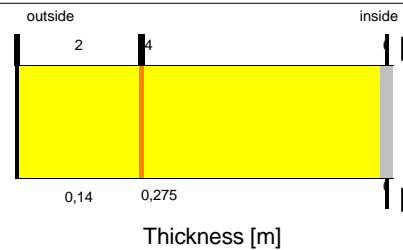
Assembly (Id.1): wh20 - EFH_SAN_Dach_SanH (Dach)

Homogenous layers

Thermal resistance: 6,531 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,15 W/m²K

Thickness: 0,439 m



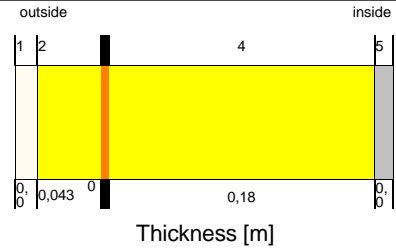
Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Unterspannbahn (2)	2400	1000	0,17	0,004	Blue
2	PU (heat cond.: 0,03 W/mK) (6)	40	1500	0,03	0,14	Yellow
3	Hardwood (6)	650	1500	0,13	0,005	Orange
4	wh20 - SparrenDämmung - 0,158 (2)	100	1100	0,158	0,275	Yellow
5	wh20 - Unterspannbahn (2)	2400	1000	0,17	0,002	Blue
6	Gipskartonplatte (5)	900	850	0,25	0,013	Grey

Assembly (Id.2): wh20 - EFH_SAN_AW_SanH (Außenwand)

Homogenous layers

Thermal resistance: 4,139 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,23 W/m²K



Thickness: 0,256 m

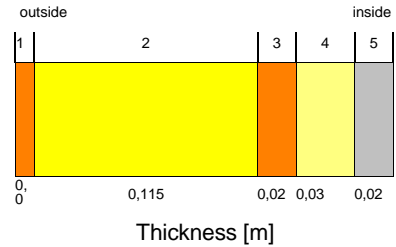
Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Zementputz (2)	1800	850	0,87	0,015	
2	wh20 - DämmungPU - 1,31 (2)	40	1500	1,31	0,043	
3	Oriented Strand Board (density: 630 kg/m ³) (5)	630	1500	0,13	0,005	
4	wh20 - StänderDämmung - 0,045 (2)	100	1100	0,045	0,18	
5	Gipskartonplatte (5)	900	850	0,25	0,013	

Assembly (Id.10): wh20 - EFH_SAN_KD_SanH (Kellerdecke)

Homogenous layers

Thermal resistance: 2,571 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,35 W/m²K



Thickness: 0,195 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Oriented Strand Board (density: 630 kg/m ³) (5)	630	1500	0,13	0,01	
2	wh20 - SparrenDämmung - 0,073 (2)	100	1100	0,073	0,115	
3	Oriented Strand Board (density: 630 kg/m ³) (5)	630	1500	0,13	0,02	
4	wh20 - DämmungMW - 040 (2)	30	840	0,04	0,03	
5	wh20 - Estrich (2)	2100	850	1,3	0,02	

Assembly (Id.7): wh20 - EFH_De_H (Innendecke)

Homogenous layers

Thermal resistance: 1,209 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,68 W/m²K

Thickness: 0,28 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Oriented Strand Board (density: 630 kg/m ³) (2)	630	1500	0,13	0,01	Orange
2	Air Layer 150 mm (2)	1,3	1000	0,94	0,2	Cyan
3	Oriented Strand Board (density: 630 kg/m ³) (2)	630	1500	0,13	0,02	Orange
4	wh20 - DämmungMW - 040	30	840	0,04	0,03	Yellow
5	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Grey

Assembly (Id.11): IEA58 Exterior Door (Eingangstüre)

Thermal resistance: 0,305 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Thickness: 0,04 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	IEA58 Wood (Fichte_Kie)	600	1000	0,131	0,04	Orange

Assembly (Id.9): wh20 - EFH_SAN_BP_SanRefB (Bodenplatte & Kellerwände)

Homogenous layers

Thermal resistance: 0,111 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 3,56 W/m²K

Thickness: 0,22 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Beton (2)	2400	850	2,1	0,2	Dark Grey
2	wh20 - Estrich (2)	2100	850	1,3	0,02	Light Grey

2.8 Referenz – Einfamilienhaus – Sanierungsfall

Assemblies

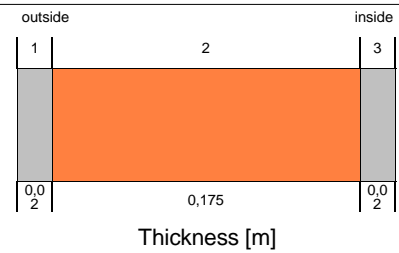
Assembly (Id.6): wh20 - EFH_IW_Z (Innenwand)

Homogenous layers

Thermal resistance: 0,407 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 1,5 W/m²K

Thickness: 0,215 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Kalkgipsmörtel, Gipsmörtel, Anhydritmörtel (2)	1400	850	0,7	0,02	Grey
2	wh20 - Ziegel - 0,5	1200	850	0,5	0,175	Orange
3	Kalkgipsmörtel, Gipsmörtel, Anhydritmörtel (2)	1400	850	0,7	0,02	Grey

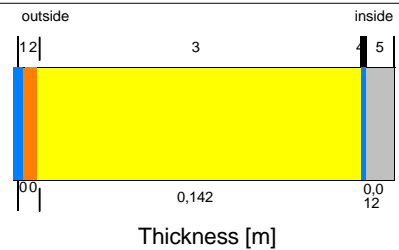
Assembly (Id.1): wh20 - EFH_SAN_Dach_SanRef (Dach)

Homogenous layers

Thermal resistance: 2,378 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,4 W/m²K

Thickness: 0,166 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Unterspannbahn	2400	1000	0,17	0,004	Blue
2	Hardwood (2)	650	1500	0,13	0,005	Orange
3	wh20 - SparrenDämmung - 0,063	100	1100	0,063	0,142	Yellow
4	wh20 - Unterspannbahn	2400	1000	0,17	0,002	Blue
5	Gipskartonplatte	900	850	0,25	0,013	Grey

Assembly (Id.2): wh20 - EFH_SAN_AW_SanRef (Außenwand)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 1,828 m²K/W (without Rsi, Rse)
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,5 W/m²K

Thickness: 0,385 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Zementputz (2)	1800	850	0,87	0,015	
2	wh20 - DämmungPU - 039 (2)	40	1500	0,039	0,05	
3	Solid Brick, extruded (6)	1650	850	0,6	0,3	
4	wh20 - Gipsputz (2)	1400	850	0,7	0,02	

Assembly (Id.10): wh20 - EFH_SAN_KD_SanRef (Kellerdecke)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 1,661 m²K/W (without Rsi, Rse)
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,5 W/m²K

Thickness: 0,286 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - DämmungPU - 045 (2)	40	1500	0,045	0,036	
2	wh20 - Beton (2)	2400	850	2,1	0,2	
3	wh20 - DämmungMW - 040 (2)	30	840	0,04	0,03	
4	wh20 - Estrich (2)	2100	850	1,3	0,02	

Assembly (Id.7): wh20 - EFH_De_H (Innendecke)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 1,209 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,71 W/m²K

Thickness: 0,28 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Oriented Strand Board (density: 630 kg/m ³) (2)	630	1500	0,13	0,01	Orange
2	Air Layer 150 mm (2)	1,3	1000	0,94	0,2	Cyan
3	Oriented Strand Board (density: 630 kg/m ³) (2)	630	1500	0,13	0,02	Orange
4	wh20 - DämmungMW - 040	30	840	0,04	0,03	Yellow
5	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Grey

Assembly (Id.11): IEA58 Exterior Door (Eingangstüre)

Thermal resistance: 0,305 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 2,1 W/m²K

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	IEA58 Wood (Fichte_Kie)	600	1000	0,131	0,04	Orange

Assembly (Id.9): wh20 - EFH_SAN_BP_SanRefB (Bodenplatte & Kellerwände)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 0,111 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 3,56 W/m²K

Thickness: 0,22 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Normalbeton nach DIN 1045 μ=150 (2)	2400	850	2,1	0,2	Grey
2	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Grey

2.9 Bürogebäude – Neubaufall – Ziegelbauweise

Assemblies

Assembly (Id.3): wh20 - RB_IW_Z (Innenwand, Typ1)

<p>Homogenous layers</p> <p>Thermal resistance: 0,407 m²K/W (without R_{si}, R_{se})</p> <p>Heat transfer coefficient(U-value): 1,5 W/m²K</p> <p>Thickness: 0,215 m</p>	
--	--

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	
2	wh20 - Ziegel - 0,5	1200	850	0,5	0,175	
3	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	

Assembly (Id.4): wh20 - RB_IW_2_Z (Innenwand, Typ2)

<p>Homogenous layers</p> <p>Thermal resistance: 0,407 m²K/W (without R_{si}, R_{se})</p> <p>Heat transfer coefficient(U-value): 1,5 W/m²K</p> <p>Thickness: 0,215 m</p>	
--	--

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	
2	wh20 - Ziegel - 0,5	1200	850	0,5	0,175	
3	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	

Assembly (Id.2): wh20 - RB_AW_NeuZ (Außenwand)

<p>Homogenous layers</p> <p>Thermal resistance: 6,456 m²K/W (without R_{si}, R_{se})</p> <p>Heat transfer coefficient(U-value): 0,15 W/m²K</p> <p>Thickness: 0,532 m</p>	
---	--

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Zementputz	1800	850	0,87	0,015	
2	wh20 - DämmungEPS - 065	30	1500	0,065	0,199	
3	wh20 - Ziegel - 089	500	1000	0,089	0,298	
4	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	

Assembly (Id.7): wh20 - RB_BP_NeuB (Bodenplatte)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 6,407 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,15 W/m²K

Thickness: 0,49 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - DämmungPU - 045	40	1500	0,045	0,25	Yellow
2	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Dark Grey
3	wh20 - DämmungVIP - 027	200	800	0,027	0,02	Light Grey
4	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Grey

Assembly (Id.8): wh20 - RB_De_B (Innendecke)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 1,111 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,69 W/m²K

Thickness: 0,26 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Dark Grey
2	wh20 - DämmungMW - 040	30	840	0,04	0,04	Yellow
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Light Grey

Assembly (Id.9): wh20 - RB_Dach_NeuB (Flachdach)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 7,614 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,13 W/m²K

Thickness: 0,536 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Bitumen	1100	1500	0,17	0,007	Grey
2	wh20 - DämmungEPS - 044	30	1500	0,044	0,329	Yellow
3	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Dark Grey

2.10 Bürogebäude – Neubaufall – Betonbauweise

Assemblies

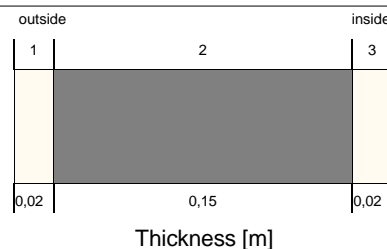
Assembly (Id.3): wh20 - RB_IW_B (Innenwand, Typ1)

Homogenous layers

Thermal resistance: 0,129 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 2,57 W/m²K

Thickness: 0,19 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	Yellow
2	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,15	Grey
3	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	Yellow

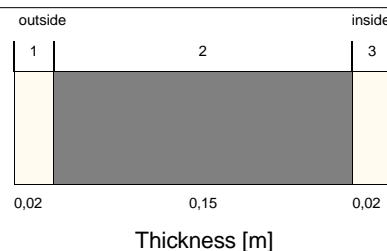
Assembly (Id.4): wh20 - RB_IW_2_B (Innenwand, Typ2)

Homogenous layers

Thermal resistance: 0,129 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 2,57 W/m²K

Thickness: 0,19 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	Yellow
2	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,15	Grey
3	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	Yellow

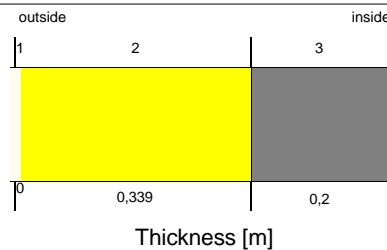
Assembly (Id.2): wh20 - RB_AW_NeuB (Außenwand)

Homogenous layers

Thermal resistance: 6,509 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,15 W/m²K

Thickness: 0,554 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Zementputz	1800	850	0,87	0,015	Yellow
2	wh20 - DämmungEPS - 053	30	1500	0,053	0,339	Yellow
3	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Grey

Assembly (Id.7): wh20 - RB_BP_NeuB (Bodenplatte)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 6,407 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,15 W/m²K

Thickness: 0,49 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - DämmungPU - 045	40	1500	0,045	0,25	Yellow
2	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Dark Grey
3	wh20 - DämmungVIP - 027	200	800	0,027	0,02	Light Grey
4	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Grey

Assembly (Id.8): wh20 - RB_De_B (Innendecke)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 1,111 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,69 W/m²K

Thickness: 0,26 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Dark Grey
2	wh20 - DämmungMW - 040	30	840	0,04	0,04	Yellow
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Light Grey

Assembly (Id.9): wh20 - RB_Dach_NeuB (Flachdach)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 7,614 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,13 W/m²K

Thickness: 0,536 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Bitumen	1100	1500	0,17	0,007	Grey
2	wh20 - DämmungEPS - 044	30	1500	0,044	0,329	Yellow
3	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Dark Grey

2.11 Bürogebäude – Neubaufall – Holzbauweise

Assemblies

Assembly (Id.3): wh20 - RB_IW_H (Innenwand, Typ1)

<p>Homogenous layers</p> <p>Thermal resistance: 2,7 m²K/W (without R_{si}, R_{se})</p> <p>Heat transfer coefficient(U-value): 0,34 W/m²K</p> <p>Thickness: 0,15 m</p>	
--	--

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Gipskartonplatte	900	850	0,25	0,025	
2	wh20 - DämmungMW - 040	30	840	0,04	0,1	
3	Gipskartonplatte	900	850	0,25	0,025	

Assembly (Id.4): wh20 - RB_IW_2_H (Innenwand, Typ2)

<p>Homogenous layers</p> <p>Thermal resistance: 2,7 m²K/W (without R_{si}, R_{se})</p> <p>Heat transfer coefficient(U-value): 0,34 W/m²K</p> <p>Thickness: 0,15 m</p>	
--	--

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Gipskartonplatte	900	850	0,25	0,025	
2	wh20 - DämmungMW - 040	30	840	0,04	0,1	
3	Gipskartonplatte	900	850	0,25	0,025	

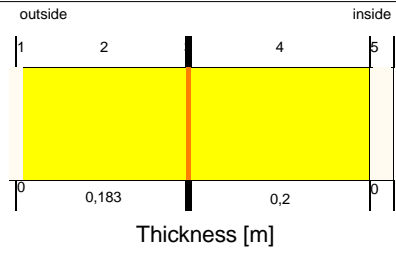
Assembly (Id.2): wh20 - RB_AW_NeuH (Außenwand)

Homogenous layers

Thermal resistance: 6,415 m²K/W (without Rsi, Rse)

Heat transfer coefficient(U-value): 0,15 W/m²K

Thickness: 0,423 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Zementputz	1800	850	0,87	0,015	
2	wh20 - DämmungEPS - 097	30	1500	0,097	0,183	
3	Oriented Strand Board (density: 630 kg/m³) (2)	630	1500	0,13	0,005	
4	wh20 - StänderDämmung - 0,045	100	1100	0,045	0,2	
5	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	

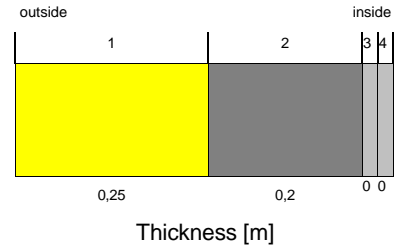
Assembly (Id.7): wh20 - RB_BP_NeuB (Bodenplatte)

Homogenous layers

Thermal resistance: 6,407 m²K/W (without Rsi, Rse)

Heat transfer coefficient(U-value): 0,15 W/m²K

Thickness: 0,49 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - DämmungPU - 045	40	1500	0,045	0,25	
2	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	
3	wh20 - DämmungVIP - 027	200	800	0,027	0,02	
4	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	

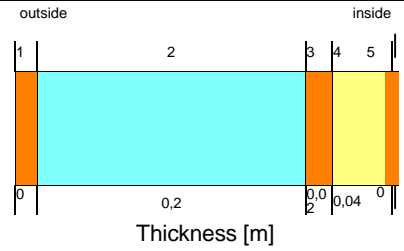
Assembly (Id.8): wh20 - RB_De_H (Innendecke)

Homogenous layers

Thermal resistance: 1,536 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,53 W/m²K

Thickness: 0,282 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Oriented Strand Board (density: 630 kg/m ³) (2)	630	1500	0,13	0,012	Orange
2	Air Layer 150 mm (2)	1,3	1000	0,94	0,2	Cyan
3	Oriented Strand Board (density: 630 kg/m ³) (2)	630	1500	0,13	0,02	Orange
4	wh20 - DämmungMW - 040	30	840	0,04	0,04	Yellow
5	Oriented Strand Board (density: 630 kg/m ³) (2)	630	1500	0,13	0,01	Orange

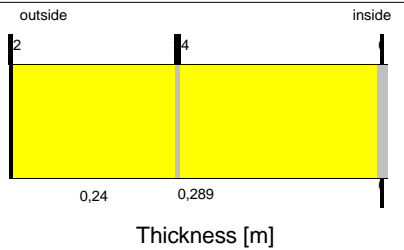
Assembly (Id.9): wh20 - RB_Dach_NeuH (Flachdach)

Homogenous layers

Thermal resistance: 7,513 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,13 W/m²K

Thickness: 0,555 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Unterspannbahn (2)	2400	1000	0,17	0,004	Blue
2	wh20 - DämmungEPS - 035	30	1500	0,035	0,24	Yellow
3	wh20 - Bitumen	1100	1500	0,17	0,007	Grey
4	wh20 - SparrenDämmung - 0,548	100	1100	0,548	0,289	Yellow
5	wh20 - Unterspannbahn (2)	2400	1000	0,17	0,002	Blue
6	Gipskartonplatte (5)	900	850	0,25	0,013	Grey

2.12 Referenz – Bürogebäude – Neubaufall

Assemblies

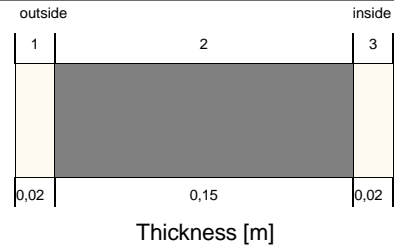
Assembly (Id.3): wh20 - RB_IW_B (Innenwand, Typ1-Korridor)

Homogenous layers

Thermal resistance: 0,129 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 2,57 W/m²K

Thickness: 0,19 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	[kg/m ³]	ρ	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Gipsputz	1400		850	0,7	0,02	Yellow
2	wh20 - Beton	2400		850	2,1	0,15	Grey
3	wh20 - Gipsputz	1400		850	0,7	0,02	Yellow

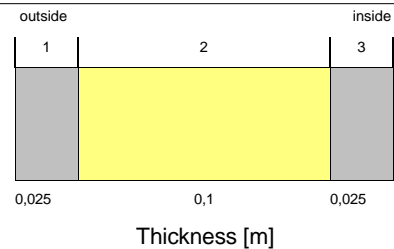
Assembly (Id.4): wh20 - RB_IW_H (Innenwand, Typ2-Bürotrennung)

Homogenous layers

Thermal resistance: 2,7 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,34 W/m²K

Thickness: 0,15 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	[kg/m ³]	ρ	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Gipskartonplatte	900		850	0,25	0,025	Grey
2	wh20 - DämmungMW - 040	30		840	0,04	0,1	Yellow
3	Gipskartonplatte	900		850	0,25	0,025	Grey

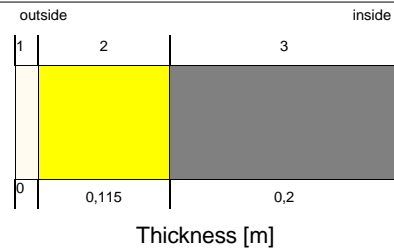
Assembly (Id.2): wh20 - RB_AW_NeuRef (Außenwand)

Homogenous layers

Thermal resistance: 2,851 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,33 W/m²K

Thickness: 0,33 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	[kg/m ³]	ρ	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Zementputz	1800		850	0,87	0,015	Yellow
2	wh20 - DämmungEPS - 042	30		1500	0,042	0,115	Yellow
3	wh20 - Beton	2400		850	2,1	0,2	Grey

Assembly (Id.7): wh20 - RB_BP_NeuRef (Bodenplatte)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 2,341 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,4 W/m²K

Thickness: 0,336 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - DämmungPU - 052	40	1500	0,052	0,116	Yellow
2	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Grey
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Light Grey

Assembly (Id.8): wh20 - RB_De_B (Innendecke)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 1,111 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,69 W/m²K

Thickness: 0,26 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Grey
2	wh20 - DämmungMW - 040	30	840	0,04	0,04	Yellow
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Light Grey

Assembly (Id.9): wh20 - RB_Dach_NeuRef (Flachdach)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 3,904 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,25 W/m²K

Thickness: 0,369 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Bitumen	1100	1500	0,17	0,007	Light Grey
2	wh20 - DämmungEPS - 043	30	1500	0,043	0,162	Yellow
3	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Grey

2.13 Bürogebäude – Sanierungsfall – Ziegelbauweise

Assemblies

Assembly (Id.3): wh20 - RB_IW_Z (Innenwand, Typ1)

<p>Homogenous layers</p> <p>Thermal resistance: 0,407 m²K/W (without R_{si}, R_{se})</p> <p>Heat transfer coefficient(U-value): 1,5 W/m²K</p> <p>Thickness: 0,215 m</p>	<p>Thickness [m]</p>
--	----------------------

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	
2	wh20 - Ziegel - 0,5	1200	850	0,5	0,175	
3	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	

Assembly (Id.4): wh20 - RB_IW_2_Z (Innenwand, Typ2)

<p>Homogenous layers</p> <p>Thermal resistance: 0,407 m²K/W (without R_{si}, R_{se})</p> <p>Heat transfer coefficient(U-value): 1,5 W/m²K</p> <p>Thickness: 0,215 m</p>	<p>Thickness [m]</p>
--	----------------------

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	
2	wh20 - Ziegel - 0,5	1200	850	0,5	0,175	
3	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	

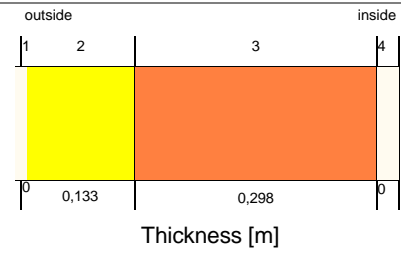
Assembly (Id.2): wh20 - RB_AW_SanZ (Außenwand)

Homogenous layers

Thermal resistance: 3,867 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,25 W/m²K

Thickness: 0,466 m



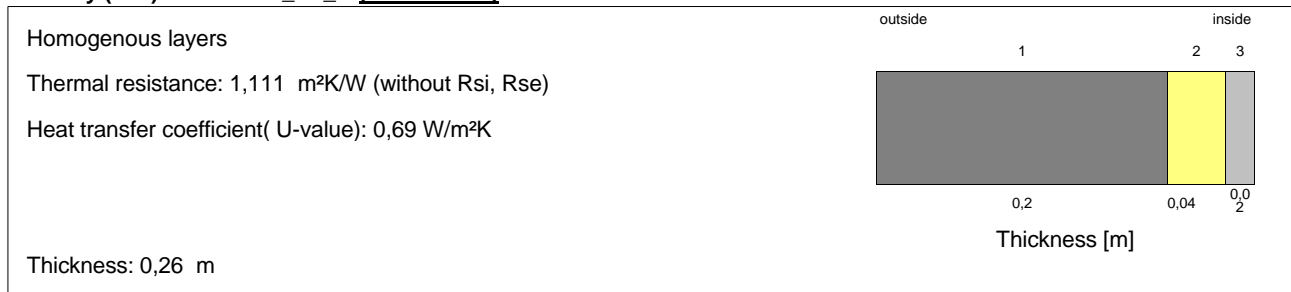
Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Zementputz	1800	850	0,87	0,015	
2	wh20 - DämmungEPS - 040	30	1500	0,04	0,133	
3	wh20 - Ziegel - 0,6	1500	850	0,6	0,298	
4	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	

Assembly (Id.7): wh20 - RB_BP_SanB (Bodenplatte)



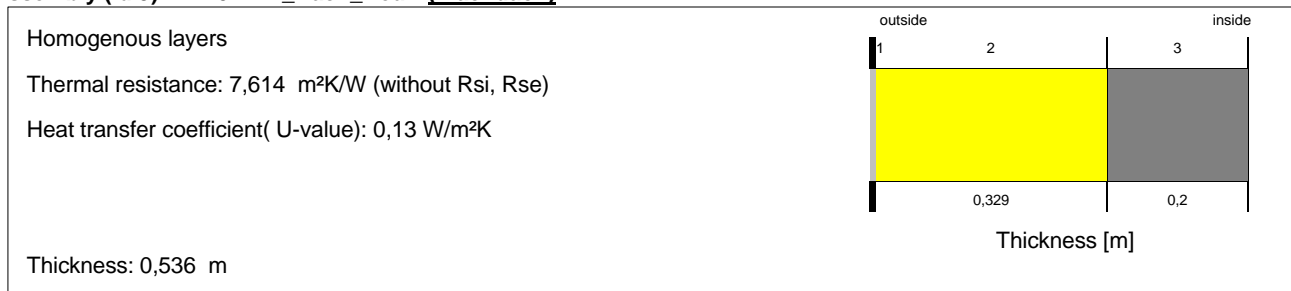
Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	
2	wh20 - DämmungVIP - 006	200	800	,0064	0,024	
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	

Assembly (Id.8): wh20 - RB_De_B (Innendecke)



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	
2	wh20 - DämmungMW - 040	30	840	0,04	0,04	
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	

Assembly (Id.9): wh20 - RB_Dach_NeuB (Flachdach)



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Bitumen	1100	1500	0,17	0,007	
2	wh20 - DämmungEPS - 044	30	1500	0,044	0,329	
3	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	

2.14 Bürogebäude – Sanierungsfall – Betonbauweise

Assemblies

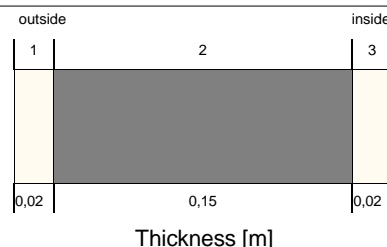
Assembly (Id.3): wh20 - RB_IW_B (Innenwand, Typ1)

Homogenous layers

Thermal resistance: 0,129 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 2,57 W/m²K

Thickness: 0,19 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	Yellow
2	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,15	Grey
3	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	Yellow

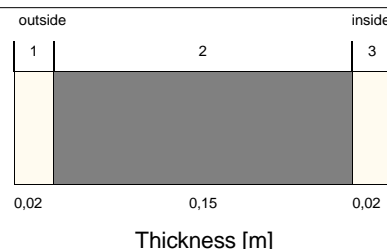
Assembly (Id.4): wh20 - RB_IW_2_B (Innenwand, Typ2)

Homogenous layers

Thermal resistance: 0,129 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 2,57 W/m²K

Thickness: 0,19 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	Yellow
2	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,15	Grey
3	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	Yellow

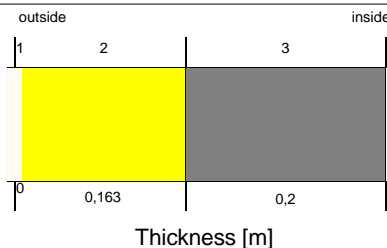
Assembly (Id.2): wh20 - RB_AW_SanB (Außenwand)

Homogenous layers

Thermal resistance: 3,787 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,25 W/m²K

Thickness: 0,379 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Zementputz	1800	850	0,87	0,015	Yellow
2	wh20 - DämmungEPS - 045	30	1500	0,045	0,164	Yellow
3	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Grey

Assembly (Id.7): wh20 - RB_BP_SanB (Bodenplatte)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 3,814 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,25 W/m²K

Thickness: 0,244 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	
2	wh20 - DämmungVIP - 006	200	800	,0064	0,024	
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	

Assembly (Id.8): wh20 - RB_De_B (Innendecke)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 1,111 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,69 W/m²K

Thickness: 0,26 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	
2	wh20 - DämmungMW - 040	30	840	0,04	0,04	
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	

Assembly (Id.9): wh20 - RB_Dach_NeuB (Dach)

Homogenous layers
 Thermal resistance: 7,614 m²K/W (without R_{si}, R_{se})
 Heat transfer coefficient(U-value): 0,13 W/m²K

Thickness: 0,536 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Bitumen	1100	1500	0,17	0,007	
2	wh20 - DämmungEPS - 044	30	1500	0,044	0,329	
3	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	

2.15 Referenz – Bürogebäude – Sanierungsfall

Assemblies

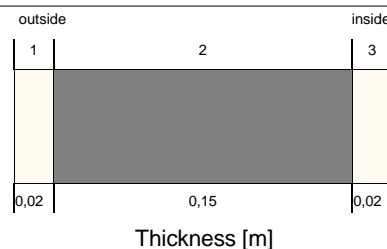
Assembly (Id.3): wh20 - RB_IW_B (Innenwand, Typ1-Korridor)

Homogenous layers

Thermal resistance: 0,129 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 2,57 W/m²K

Thickness: 0,19 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	[kg/m ³]	ρ	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Gipsputz	1400		850	0,7	0,02	Yellow
2	wh20 - Beton	2400		850	2,1	0,15	Grey
3	wh20 - Gipsputz	1400		850	0,7	0,02	Yellow

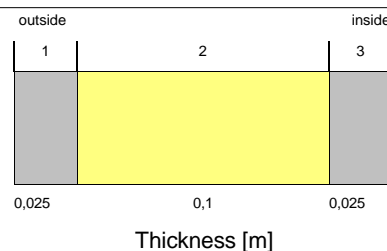
Assembly (Id.4): wh20 - RB_IW_H (Innenwand, Typ2-Bürotrennung)

Homogenous layers

Thermal resistance: 2,7 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,34 W/m²K

Thickness: 0,15 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	[kg/m ³]	ρ	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Gipskartonplatte	900		850	0,25	0,025	Grey
2	wh20 - DämmungMW - 040	30		840	0,04	0,1	Yellow
3	Gipskartonplatte	900		850	0,25	0,025	Grey

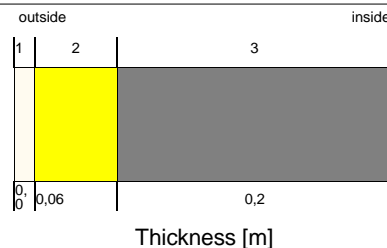
Assembly (Id.2): wh20 - RB_AW_SanRef (Außenwände)

Homogenous layers

Thermal resistance: 1,651 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,55 W/m²K

Thickness: 0,275 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	[kg/m ³]	ρ	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Zementputz	1800		850	0,87	0,015	Yellow
2	wh20 - DämmungEPS - 039	30		1500	0,039	0,06	Yellow
3	wh20 - Beton	2400		850	2,1	0,2	Grey

Assembly (Id.7): wh20 - RB_BP_SanRef (Bodenplatte)

Homogenous layers

Thermal resistance: 1,277 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,69 W/m²K

Thickness [m]

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	
2	wh20 - DämmungVIP - 006	200	800	0,006	0,007	
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	

Assembly (Id.8): wh20 - RB_De_B (Innendecke)

Homogenous layers

Thermal resistance: 1,111 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,69 W/m²K

Thickness [m]

Thickness: 0,26 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	
2	wh20 - DämmungMW - 040	30	840	0,04	0,04	
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	

Assembly (Id.9): wh20 - RB_Dach_SanRef (Flachdach)

Homogenous layers

Thermal resistance: 1,931 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,48 W/m²K

Thickness [m]

Thickness: 0,277 m

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Bitumen	1100	1500	0,17	0,007	
2	wh20 - DämmungEPS - 039	30	1500	0,039	0,07	
3	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	

Anhang 2 - Matrix der Technologieübersicht

TGA - Erzeuger

	Geringe Anwendung
	Häufige Anwendung
	Vorrangiges Auftreten
X	Interessant für Windheizung

Erzeugertyp		Brennstoff	Einfamilienhaus		Bürogebäude	
			Saniertes Altbau (KfW 55)	NZEB (KfW 40)	Saniertes Altbau	NZEB
Einzelfeuerstätten	Kachelofen	Gas				
		Öl				
		Holz	Back Up	Back Up		
	Raumheizer	Gas				
		Öl				
Elektro-speicher-	raumweise (Nachtspeicheröfen; hochtemperatur)	Strom	X	X	X	X
	Elt. Direktheizung Fußboden	Strom	X	X	X	X
	Elt. Direktheizung Wände	Strom	X	X	X	X
	Elt. Direktheizung Decke	Strom	X	X	X	X
	gebäudeweise zentral mit Speicher (Heizelement)	Strom				
Direktstrom-heizung	IR-Strahler	Strom				
	Direktheizer	Strom				
Wärme-tauscher	für Luftheizungen	Strom				
		Gas				
		Nahwärme				
		Fernwärme				
		Abwärme				
	Durchlauferhitzer	Gas				
		Strom	X	X	X	X
Kessel	Konstanttemperaturkessel	Gas				
		Öl				
		Holz				
		Kohle				
	Niedertemperaturkessel	Gas				
		Öl				
		Holz	evtl. als Back-Up	evtl. als Back-Up	evtl. als Back-Up	evtl. als Back-Up
Brennwertkessel	Gas					
	Öl					
Therme	inkl. kleinem Speicher	Gas				
Boiler	inkl. kleinem Speicher	Strom				
Wärmepumpe	Erdreich-WP (Sonde)	Gas				
		Strom		X		X
	Erdreich-WP (Kollektor)	Gas				
		Strom				
	Erdreich-WP (Grundwasser)	Gas				
		Strom				
	Außenluft-WP	Gas				
		Strom	X	X	X	X
	Abluft-WP	Gas				
		Strom				
	Abwasser-WP	Gas				
Strom						
Abwärme-WP	Gas					
	Strom					
Massivabsorber	Gas					
	Strom		X		X	
Nano/Mikro BHKW	eher ohne Anschluss an NW	Gas				
		Öl				
		Holz				
Mini BHKW	ggf. mit Anschluss an NW	Gas				
		Öl				
		Holz				
Brennstoffzelle		Gas				
Thermische Solaranlage	Flachkollektor	Sonne	X	X		
	Röhrenkollektor	Sonne				
	Absorber	Sonne				

TGA - Speicher

	Geringe Anwendung
	Häufige Anwendung
	Vorrangiges Auftreten
X	Interessant für Windheizung

Speichertyp			Größe für EFH	Einfamilienhaus		Bürogebäude		
				Saniertes Altbau (KfW 55)	NZEB (KfW 40)	Saniertes Altbau	NZEB	
Wasserspeicher	Heizungspufferspeicher	integriert in Wärmepumpe	ca. 5 l					
		Kurzzeitspeicher (WP/Kessel)	ca. 200 l					
		Langzeitspeicher (solar)	ca. 500 - 2000 l	X	X	X	X	
		saisonal Speicher	ca. 5 - 30 m³			X	X	
		Aquiferspeicher	> 100 m³					
	Warmwasserspeicher	normal	ca. 200 l					
		solar	ca. 500 l					
Kombispeicher	Heizungspuffer + WW	ca. 200 - 2000 l						
Phasenwechsel-speicher	sensible Wärme	Wasser						
		Beton						
	latente Wärme	Wasser und Eis		(X)	(X)	(X)	(X)	
		Salzhydrat (PCM)						
		Paraffin (PCM)				X	X	
	Thermo-chemisch: Reaktionswärme	Metallhydrid						
		Silica-Gel						
	Zeolith							
Massenspeicher	Strom	Nachtspeicheropfen		X	X	X	X	
	flüssig	Betonspeicher						
		Kiesbett						
		Fels						
		Erdreich						
	Luft	Kiesbett						
		Fels						
Bauteildurchströmung	flüssig	Decken	oberflächennah: abgehängte Decke/Segel					
			Rohrschlangen in Beton		X		X	
			in Holzdecken					
		Fußböden	schwerer Estrich (el. Fußbodenheizung)	X	X	X	X	
		Außenwände	Ziegel (massiv)					
			Kalksandstein					
			Beton					
			Holz					
			Gips + PCM					
		Innenwände	Ziegel (massiv)			X		X
	Kalksandstein				X		X	
	Beton				X		X	
	Holz							
	Gips + PCM							
	Luft	Decken	Hohlkörperdecken (hybrid)		X		X	
Fußböden		Hypocausten						
Außenwände		Hohlkörpersteine (KS, Ziegel, Beton)						
Innenwände		Hohlkörpersteine (KS, Ziegel, Beton)		X		X		

TGA - Übergabe

	Geringe Anwendung
	Häufige Anwendung
	Vorrangiges Auftreten
X	Interessant für Windheizung

Übergabetyp		Medium	Entladung	Regelung	Einfamilienhaus		Bürogebäude			
					Sanierter Altbau (KfW 55)	NZEB (KfW 40)	Sanierter Altbau	NZEB		
Flächenheizung	Decke	bauteilintegriert	Wasser/ Strom	ungeregelt	keine	X	X	X	X	
				geregelt	Führungsraum raumweise (Thermostat) raumweise (Magnetventil)					
			Luft	ungeregelt	keine					
				geregelt	Führungsraum raumweise (Thermostat) raumweise (Magnetventil)					
		nicht bauteilintegriert	Wasser/ Strom	ungeregelt	keine					
				geregelt	Führungsraum raumweise (Thermostat) raumweise (Magnetventil)	(X)	(X)	(X)	(X)	
						X	X	X	X	
			Luft	ungeregelt	keine					
	geregelt			Führungsraum raumweise (Thermostat) raumweise (Magnetventil)		X		X		
	Fußboden- heizung	bauteilintegriert	Wasser/ Strom	ungeregelt	keine	X	X	X	X	
				geregelt	Führungsraum raumweise (Thermostat) raumweise (Magnetventil)					
			Luft	ungeregelt	keine					
				geregelt	Führungsraum raumweise (Thermostat) raumweise (Magnetventil)					
nicht bauteilintegriert		Wasser/ Strom	ungeregelt	keine						
			geregelt	Führungsraum raumweise (Thermostat) raumweise (Magnetventil)	(X)	(X)	(X)	(X)		
Flächenheizung	Wand	bauteilintegriert	Wasser/ Strom	ungeregelt	keine	X	X	X	X	
				geregelt	Führungsraum raumweise (Thermostat) raumweise (Magnetventil)					
			Luft	ungeregelt	keine					
				geregelt	Führungsraum raumweise (Thermostat) raumweise (Magnetventil)					
		nicht bauteilintegriert	Wasser/ Strom	ungeregelt	keine					
				geregelt	Führungsraum raumweise (Thermostat) raumweise (Magnetventil)	(X)	(X)	(X)	(X)	
Heizkörper	Radiatoren	Wasser	manuell							
			geregelt	Führungsraum raumweise (Thermostat) raumweise (Magnetventil)	X	X	X	X		
						X	X			
	Konvektoren	Wasser	manuell							
			geregelt	Führungsraum raumweise (Thermostat) raumweise (Magnetventil)						
Nachtspeicheröfen	Strom	geregelt	raumweise (PI-Regler)	X	X	X	X			
Wärmestrahler	Infrarot	Strom	geregelt	Führungsraum raumweise (Thermostat) raumweise (Magnetventil)						
				Wasser	geregelt	Führungsraum raumweise (Thermostat) raumweise (Magnetventil)				
						Gas	geregelt	Führungsraum raumweise (Thermostat) raumweise (Magnetventil)		
		Luftauslass	Umluft	Wasser	geregelt	Führungsraum	X	X	X	X
			Frischluf	Luft	geregelt	Führungsraum raumweise (Thermostat) raumweise (Magnetventil)	X	X	X	X
Warmwasser-Frischwasserstation					X	X				

Anhang 3 - Details der Kostenermittlung

		EFH	EFH	Büro	Büro
		Neubau	Sanierung	Neubau	Sanierung
Mehrkosten (Invest) zur Basisausstattung	[T€]	50,1	13,7	241,2	146,0
Mehrkosten Baustandard	[T€]	34,2	9,4	170,2	75,0
Mehrkosten Lüftungsanlage mit WRG	[T€]	15,9	4,3	71,0	71,0

		EFH	EFH	Büro	Büro
		Neubau	Sanierung	Neubau	Sanierung
Mehrkosten (Invest) Gesamt	[T€]	34,2	9,4	170,2	75,0
Außenwand					
Mehrkosten (Invest) Windheizung	[T€]	15,5	2,8	53,7	12,2
Fläche Außenwand	[m²]	285,0	157,6	985,0	985,0
Kosten Windheizung	[€/m²]	216,4	179,7	216,4	174,3
Kosten Referenz *	[€/m²]	161,9	161,9	161,9	161,9
Fenster					
Mehrkosten (Invest) Windheizung	[T€]	3,8	0,1	47,4	16,8
Fensterfläche	[m²]	64,3	25,3	77,5	27,5
Kosten Windheizung	[€/m²]	344,6	302,6	363,6	328,1
Kosten Referenz *	[€/m²]	286,1	300,6	286,1	300,6
Dach					
		Steildach		Flachdach	
Mehrkosten (Invest) Windheizung	[T€]	9,9	6,1	33,5	33,5
Dachfläche	[m²]	144,0	116,6	591,0	591,0
Kosten Windheizung	[€/m²]	220,9	204,6	258,0	258,0
Kosten Referenz *	[€/m²]	152,0	152,0	201,3	201,3
Erdberührende Bauteile / Kellerdecke					
Mehrkosten (Invest) Windheizung	[T€]	4,9	0,4	35,7	12,5
Fläche Erdberührende Bauteile / Kellerdecke	[m²]	234,0	101,0	591,0	591,0
Kosten Windheizung	[€/m²]	141,8	124,8	181,0	141,8
Kosten Referenz *	[€/m²]	120,6	120,6	120,6	120,6

		EFH	EFH	Büro	Büro
		Neubau	Sanierung	Neubau	Sanierung
Mehrkosten (Invest) Lüftungsanlage	[T€]	15,9	4,3	71,0	71,0
Kosten Zu- & Abluft mit WRG	[T€]	18,5	6,8	110,5	110,5
Einsparung Abluftanlage	[T€]	-2,5	-2,5	-39,5	-39,5
Zu- & Abluft mit WRG					
Investkosten Lüftung mit WRG	[T€]	18,5	6,8	110,5	110,5
Investitionskosten Lüftung mit WRG	[€/m²]	57,5	57,5	-	-
Investitionskosten Lüftung mit WRG	[€/m³]	-	-	18,8	18,8
Auslegungsgrundlage: Wohnfläche (Nutzfläche / 1,35; 1,2 gemäß EnEV 2014)	[m²]	321	119	-	-
Auslegungsgrundlage: Volumenstrom	[m³/h]	-	-	5894	5894
Auslegungsgrundlage: Maximaler Luftwechsel	[1/h]	-	-	1,3	1,3
Auslegungsgrundlage: Netto-Gebäudevolumen	[m³]	-	-	4576	4576
Wartungskosten Lüftungsanlage mit WRG	[€/a]	152,4	152,4	5856,7	5856,7
Abluftanlage					
Investkosten Abluftanlage	[T€]	2,5	2,5	39,5	39,5
Investitionskosten Abluftanlage	[€/m³]	-	-	6,7	6,7
Wartungskosten Abluftanlage	[€/a]	30,5	30,5	1895,4	1895,4

		EFH	EFH	Büro	Büro
		Neubau	Sanierung	Neubau	Sanierung
Einsparung (Invest) Ölkessel, Radiatoren, Verrohrung (Referenzgebäude)	[T€]	-43,0	-21,6	-152,0	-152,7
Investitionskosten Ölkessel	[T€]	3,7	3,7	6,6	7,3
Investitionskosten Heizflächen und Verrohrung (Als Teil der Referenztechnik)	[T€]	33,6	12,6	139,3	139,3
<i>Auslegungsgrundlage: Kesselleistung</i>	<i>[kW]</i>	<i>7,7</i>	<i>4,4</i>	<i>35,5</i>	<i>40,9</i>
Investitionskosten Kamin	[T€]	3,7	3,3	4,1	4,1
Investitionskosten Öl-Tankanlage	[T€]	2,0	2,0	2,0	2,0
Wartungskosten Kessel	[€/a]	101,6	101,6	198,5	198,5
Wartungskosten Kaminkehrer Kessel	[€/a]	25,4	25,4	25,4	25,4
Wirkungsgrad Ölkessel	[-]	1,06			

		EFH	EFH	Büro	Büro
		Neubau	Sanierung	Neubau	Sanierung
Investkosten Pelletkessel	[T€]	23,1	21,9	47,8	53,0
Investitionskosten Pelletkessel	[T€]	18,1	17,8	36,9	41,0
Investkosten Pelletlager	[T€]	1,4	0,8	6,8	7,9
<i>Auslegungsgrundlage: Kesselleistung</i>	<i>[kW]</i>	<i>7,7</i>	<i>4,4</i>	<i>35,5</i>	<i>40,9</i>
Investitionskosten Kamin	[T€]	3,7	3,3	4,1	4,1
Wartungskosten Pelletkessel	[€/a]	254,0	254,0	1879,6	1879,6
Wartungskosten Kaminkehrer Pelletkessel	[€/a]	101,6	101,6	101,6	101,6
Wirkungsgrad Pelletkessel	[-]	1,06			

		EFH	EFH	Büro	Büro
		Neubau	Sanierung	Neubau	Sanierung
Investkosten Außenluft-Wärmepumpe	[T€]	11,9	8,1	32,0	35,8
Investitionskosten Wärmepumpe inkl. Außeneinheit	[T€]	11,9	8,1	32,0	35,8
<i>Auslegungsgrundlage: WP-leistung mit Tarifsperzeit</i>	<i>[kW]</i>	<i>7,8</i>	<i>4,8</i>	<i>39,0</i>	<i>45,0</i>
Wartungskosten Wärmepumpe	[€/a]	121,9	121,9	927,2	927,2
Jahresarbeitszahl	[-]	2,50			

		EFH	EFH	Büro	Büro
		Neubau	Sanierung	Neubau	Sanierung
Investkosten Sonden-Wärmepumpe	[T€]	22,7	17,3	78,7	87,6
Investitionskosten Wärmepumpe	[T€]	13,0	11,0	32,0	35,8
Investitionskosten Sonde	[T€]	9,7	6,3	46,7	51,8
<i>Auslegungsgrundlage: WP-leistung mit Tarifsperzeit</i>	<i>[kW]</i>	<i>7,8</i>	<i>4,8</i>	<i>39,0</i>	<i>45,0</i>
Wartungskosten Wärmepumpe	[€/a]	121,9	121,9	927,2	927,2
Wartungskosten Sonde	[% v. Invest]	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
Wartungskosten Sonde	[€/a]	48,3	31,5	233,5	259,2
Jahresarbeitszahl	[-]	4,50			

		EFH	EFH	Büro	Büro
		Neubau	Sanierung	Neubau	Sanierung
Investkosten Eisspeicher-Wärmepumpe	[T€]	21,4	19,4	57,2	61,0
Investitionskosten Wärmepumpe	[T€]	13,0	11,0	32,0	35,8
Investitionskosten Eisspeicher	[T€]	8,4	8,4	25,2	25,2
<i>Auslegungsgrundlage: WP-leistung mit Tarifsperzeit</i>	<i>[kW]</i>	<i>7,8</i>	<i>4,8</i>	<i>39,0</i>	<i>45,0</i>
Wartungskosten Wärmepumpe	[€/a]	121,9	121,9	927,2	927,2
Jahresarbeitszahl	[-]	4,00			

		EFH	EFH	Büro	Büro
		Neubau	Sanierung	Neubau	Sanierung
Investkosten Durchlauferhitzer	[T€]	0,8	0,8	0,8	0,8
Investitionskosten Durchlauferhitzer	[T€]	0,8	0,8	0,8	0,8

		EFH	EFH	Büro	Büro
		Neubau	Sanierung	Neubau	Sanierung
Investkosten Heizkörper und Verrohrung	[T€]	33,6	12,6	139,3	139,3
Wartungskosten Heizkörper und Verrohrung	[% v. Invest]	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
Wartungskosten Heizkörper und Verrohrung	[€/a]	168,0	63,0	696,5	696,5

		EFH	EFH	Büro	Büro
		Neubau	Sanierung	Neubau	Sanierung
Investkosten Bauteilaktivierung Decke (hydraulisch, 1x Bauteilmitte)	[T€]	21,6	6,0	0,0	0,0
Deckenfläche	[m ²]	360	100	1990	1990
Investkosten Rohrschlangen und Zubehör	[€/m ²]	60,0	60,0	60,0	60,0
Investkosten Bauteilaktivierung Innenwände (hydraulisch, 1x Bauteilmitte)	[T€]	20,9	5,8	119,5	119,5
Innenwandfläche	[m ²]	348	96	1992	1992
Investkosten Rohrschlangen und Zubehör	[€/m ²]	60,0	60,0	60,0	60,0
Investkosten hydraulische Fußbodenheizung	[T€]	33,6	12,6	139,3	139,3
Fußbodenfläche	[m ²]	480	180	1990	1990
Investkosten Rohrschlangen und Zubehör	[€/m ²]	70,0	70,0	70,0	70,0
Wartungskosten Flächenheizung	[% v. Invest]	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%
Wartungskosten Deckenaktivierung	[€/a]	216,0	60,0	0,0	0,0
Wartungskosten Innenwandaktivierung	[€/a]	208,8	57,8	1195,2	1195,2
Wartungskosten Fußbodenaktivierung	[€/a]	336,0	126,0	1393,0	1393,0

		EFH	EFH	Büro	Büro
		Neubau	Sanierung	Neubau	Sanierung
Investkosten Oberflächenaktivierung Decke (hydraulisch, 1x Deckenunterseite)	[T€]	25,2	7,0	0,0	0,0
Deckenfläche	[m ²]	360	100	1990	1990
Investkosten Rohrschlangen und Zubehör	[€/m ²]	70,0	70,0	70,0	70,0
Kosten Oberflächenaktivierung Innenwände (hydraulisch, beidseitig, Belegungsdichte 50 %)	[T€]	24,4	6,7	139,4	139,4
Innenwandfläche	[m ²]	348	96	1992	1992
Investkosten Rohrschlangen und Zubehör (1-seitig)	[€/m ²]	70,0	70,0	70,0	70,0
Kosten hydraulische Fußboden-Oberflächenheizung	[T€]	33,6	12,6	139,3	139,3
Fußbodenfläche	[m ²]	480	180	1990	1990
Investkosten Rohrschlangen und Zubehör	[€/m ²]	70,0	70,0	70,0	70,0
Wartungskosten Flächenheizung	[% v. Invest]	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%
Wartungskosten Deckenaktivierung	[€/a]	216,0	60,0	0,0	0,0
Wartungskosten Innenwandaktivierung	[€/a]	208,8	57,8	1195,2	1195,2
Wartungskosten Fußbodenaktivierung	[€/a]	336,0	126,0	1393,0	1393,0

		EFH	EFH	Büro	Büro
		Neubau	Sanierung	Neubau	Sanierung
Investkosten Bauteilaktivierung Decke (elektrisch, 1x Bauteilmitte)	[T€]	72,0	20,0	398,0	398,0
Deckenfläche	[m ²]	360	100	1990	1990
Kosten elt. Heizleitung	[€/m ²]	200,0	200,0	200,0	200,0
Investkosten Bauteilaktivierung Innenwände (elektrisch, 1x Bauteilmitte)	[T€]	69,6	19,3	398,4	398,4
Innenwandfläche	[m ²]	348	96	1992	1992
Kosten elt. Heizleitung	[€/m ²]	200,0	200,0	200,0	200,0
Investkosten elektrische Fußbodenheizung	[T€]	96,0	36,0	398,0	398,0
Fußbodenfläche	[m ²]	480	180	1990	1990
Kosten elt. Heizleitung	[€/m ²]	200,0	200,0	200,0	200,0
Wartungskosten Flächenheizung	[% v. Invest]	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%
Wartungskosten Deckenaktivierung	[€/a]	720,0	200,0	3980,0	3980,0
Wartungskosten Innenwandaktivierung	[€/a]	696,0	192,7	3984,0	3984,0
Wartungskosten Fußbodenaktivierung	[€/a]	960,0	360,0	3980,0	3980,0

		EFH	EFH	Büro	Büro
		Neubau	Sanierung	Neubau	Sanierung
Investkosten Oberflächenaktivierung Decke (elektrisch, 1x Deckenunterseite)	[T€]	72,0	20,0	398,0	398,0
Deckenfläche	[m²]	360	100	1990	1990
Kosten elt. Heizmatten	[€/m²]	200,0	200,0	200,0	200,0
Investkosten Oberflächenaktivierung Innenwände (elektrisch, beidseitig, Belegungsdichte 50 %)	[T€]	69,6	19,3	398,4	398,4
Innenwandfläche	[m²]	348	96	1992	1992
Kosten elt. Heizmatten (1-seitig)	[€/m²]	200,0	200,0	200,0	200,0
Investkosten elektrisch Fußboden-Oberflächenheizung	[T€]	96,0	36,0	398,0	398,0
Fußbodenfläche	[m²]	480	180	1990	1990
Kosten elt. Heizmatten	[€/m²]	200,0	200,0	200,0	200,0
Wartungskosten Flächenheizung	[% v. Invest]	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%
Wartungskosten Deckenaktivierung	[€/a]	720,0	200,0	3980,0	3980,0
Wartungskosten Innenwandaktivierung	[€/a]	696,0	192,7	3984,0	3984,0
Wartungskosten Fußbodenaktivierung	[€/a]	960,0	360,0	3980,0	3980,0

		EFH	EFH	Büro	Büro
		Neubau	Sanierung	Neubau	Sanierung
Überdämmte aktivierte Decke (hydraulisch)	[T€]	36,0	11,0	79,6	79,6
Investkosten hydraulische Bauteilaktivierung	[T€]	21,6	6,0	0,0	0,0
Investkosten hydraulische Oberflächenaktivierung	[T€]	25,2	7,0	0,0	0,0
Investkosten Deckendämmung	[T€]	14,4	4,0	79,6	79,6
Deckenfläche	[m²]	360	100	1990	1990
Investkosten Dämmung (1-seitig)	[€/m²]	40,0	40,0	40,0	40,0
Wartungskosten Flächenheizung	[% v. Invest]	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%
Wartungskosten Deckenaktivierung	[€/a]	720,0	200,0	3980,0	3980,0

		EFH	EFH	Büro	Büro
		Neubau	Sanierung	Neubau	Sanierung
Überdämmte aktivierte Wände (hydraulisch)	[T€]	48,7	14,5	278,9	298,8
Kosten hydraulische Bauteilaktivierung	[T€]	20,9	5,8	119,5	119,5
Kosten hydraulische Oberflächenaktivierung	[T€]	24,4	6,7	139,4	139,4
Kosten Wanddämmung	[T€]	13,9	3,9	79,7	79,7
Deckenfläche	[m²]	360	100	1990	1990
Dämmkosten (1-seitig)	[€/m²]	20,0	20,0	20,0	20,0
Wartungskosten Flächenheizung	[% v. Invest]	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%
Wartungskosten Innenwandaktivierung	[€/a]	696,0	192,7	3984,0	3984,0

		EFH	EFH	Büro	Büro
		Neubau	Sanierung	Neubau	Sanierung
Überdämmte aktivierte Decke (elektrisch)	[T€]	86,4	24,0	79,6	79,6
Kosten elektrische Bauteilaktivierung	[T€]	72,0	20,0	398,0	398,0
Kosten elektrische Oberflächenaktivierung	[T€]	72,0	36,0	398,0	398,0
Kosten Deckendämmung	[T€]	14,4	20,0	79,6	79,6
Deckenfläche	[m²]	360	100	1990	1990
Dämmkosten (1-seitig)	[€/m²]	40,0	40,0	40,0	40,0
Wartungskosten Flächenheizung	[% v. Invest]	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%
Wartungskosten Deckenaktivierung	[€/a]	720,0	200,0	3980,0	3980,0

		EFH	EFH	Büro	Büro
		Neubau	Sanierung	Neubau	Sanierung
Überdämmte aktivierte Wände (elektrisch)	[T€]	97,4	27,0	557,8	557,8
Kosten elektrische Bauteilaktivierung	[T€]	69,6	19,3	398,4	398,4
Kosten elektrische Oberflächenaktivierung	[T€]	69,6	19,3	398,4	557,8
Kosten Wanddämmung	[T€]	13,9	3,9	79,7	79,7
Deckenfläche	[m²]	360	100	1990	1990
Dämmkosten (1-seitig)	[€/m²]	20,0	20,0	20,0	20,0
Wartungskosten Flächenheizung	[% v. Invest]	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%
Wartungskosten Innenwandaktivierung	[€/a]	696,0	192,7	3984,0	3984,0

(Jeweils teuerste Gebäude-Bauweise)		EFH	EFH	Büro	Büro
		Neubau	Sanierung	Neubau	Sanierung
Kosten Auslegungs-Speicher	[T€]	1,4	1,4	0,0	0,0
Kosten Speicher Deckung Warmwasserbedarf Sommer für Windperiode (Büro 2x Auslegungs-Speicher)	[T€]	2,2	0,0	0,0	0,0
Kosten Windperiodenspeicher (Heizfall)	[T€]	20,0	13,6	64,8	77,8
Volumen Auslegungs-Speicher	[l]	915	915	2.000	2.000
Volumen Brauchwarmwasser-Speicher	[l]	0	0	0	0
Volumen Windperiodenspeicher	[l]	20.000	13.631	64.775	77.840

(Jeweils teuerste Gebäude-Bauweise)		EFH	EFH	Büro	Büro
		Neubau	Sanierung	Neubau	Sanierung
Kosten PCM-Speicher	[T€]	15,5	15,5	24,8	24,8
Kosten Brauchwarmwasser-Speicher	[T€]	3,0	3,0	4,8	4,8
Kosten PCM	[T€]	12,5	12,5	20,0	20,0
Preis PCM	[€/l]	5,0	5,0	5,0	5,0
Volumen Brauchwarmwasser-Speicher	[l]	2508	2508	4000	4000

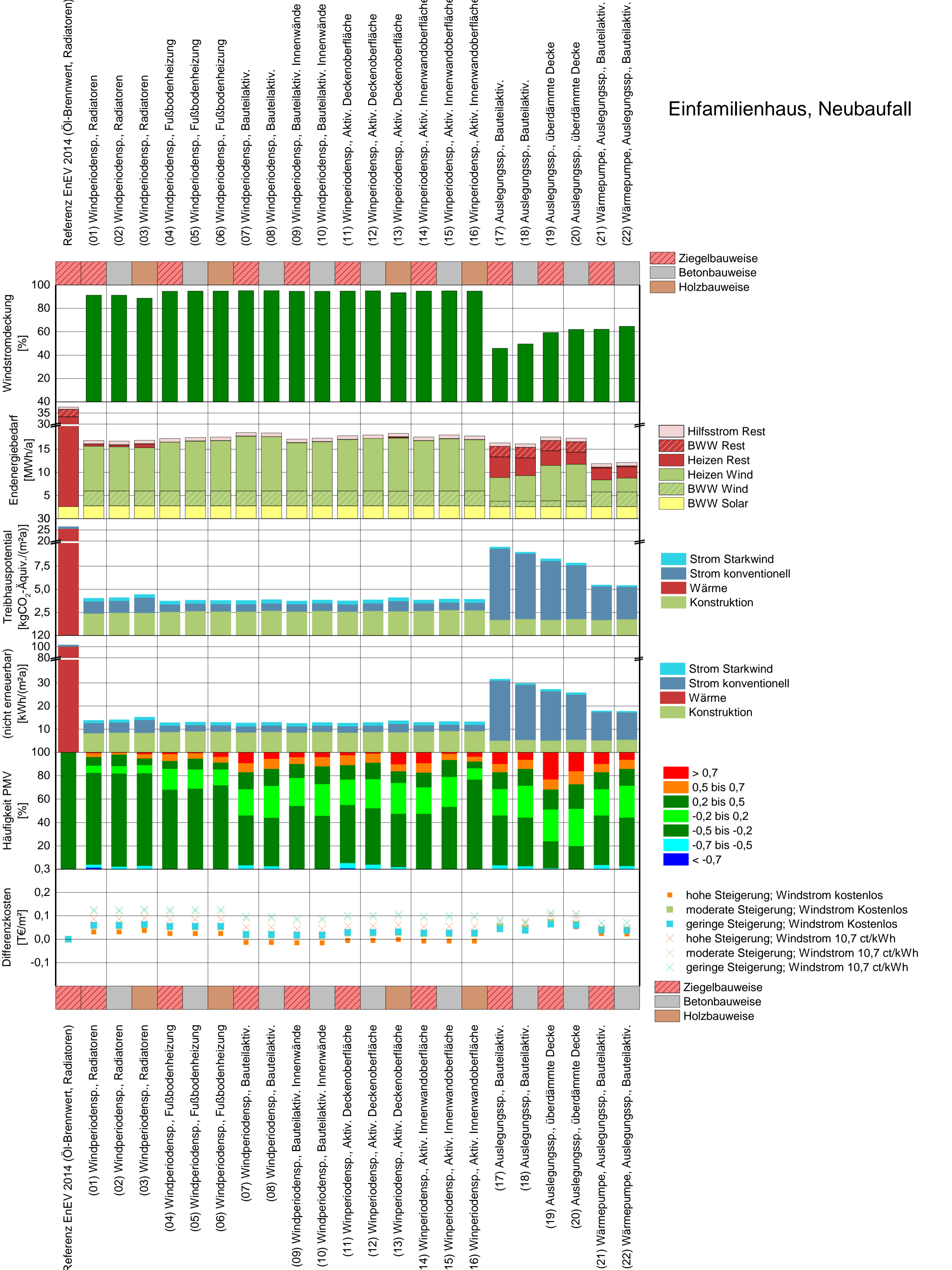
Kostenannahmen Szenario Hohe Preissteigerung (DGNB-Gütesiegel)		Startpreis	Steigerung
Windstrompreis	[€/kWh]	0,107 / 0,0	0,0%
Reststrompreis	[€/kWh]	0,205	5,0%
Betriebsstrompreis	[€/kWh]	0,172	5,0%
Ölpreis	[€/kWh]	0,061	5,0%
Pelletpreis	[€/kWh]	0,048	5,0%
Allgemeine Preissteigerung	[%]		3,0%
Diskontierungssatz	[%]		5,5%
Bewertungszeitraum	[a]	25	
Heizperiode	[-]	1. Okt - 31. März	

Kostenannahmen Szenario mittlere Preissteigerung		Startpreis	Steigerung
Windstrompreis	[€/kWh]	0,107 / 0,0	0,0%
Reststrompreis	[€/kWh]	0,205	2,0%
Betriebsstrompreis	[€/kWh]	0,172	2,0%
Ölpreis	[€/kWh]	0,061	2,0%
Pelletpreis	[€/kWh]	0,048	2,0%
Allgemeine Preissteigerung	[%]		2,0%
Diskontierungssatz	[%]		2,0%
Bewertungszeitraum	[a]	25	
Heizperiode	[-]	1. Okt - 31. März	

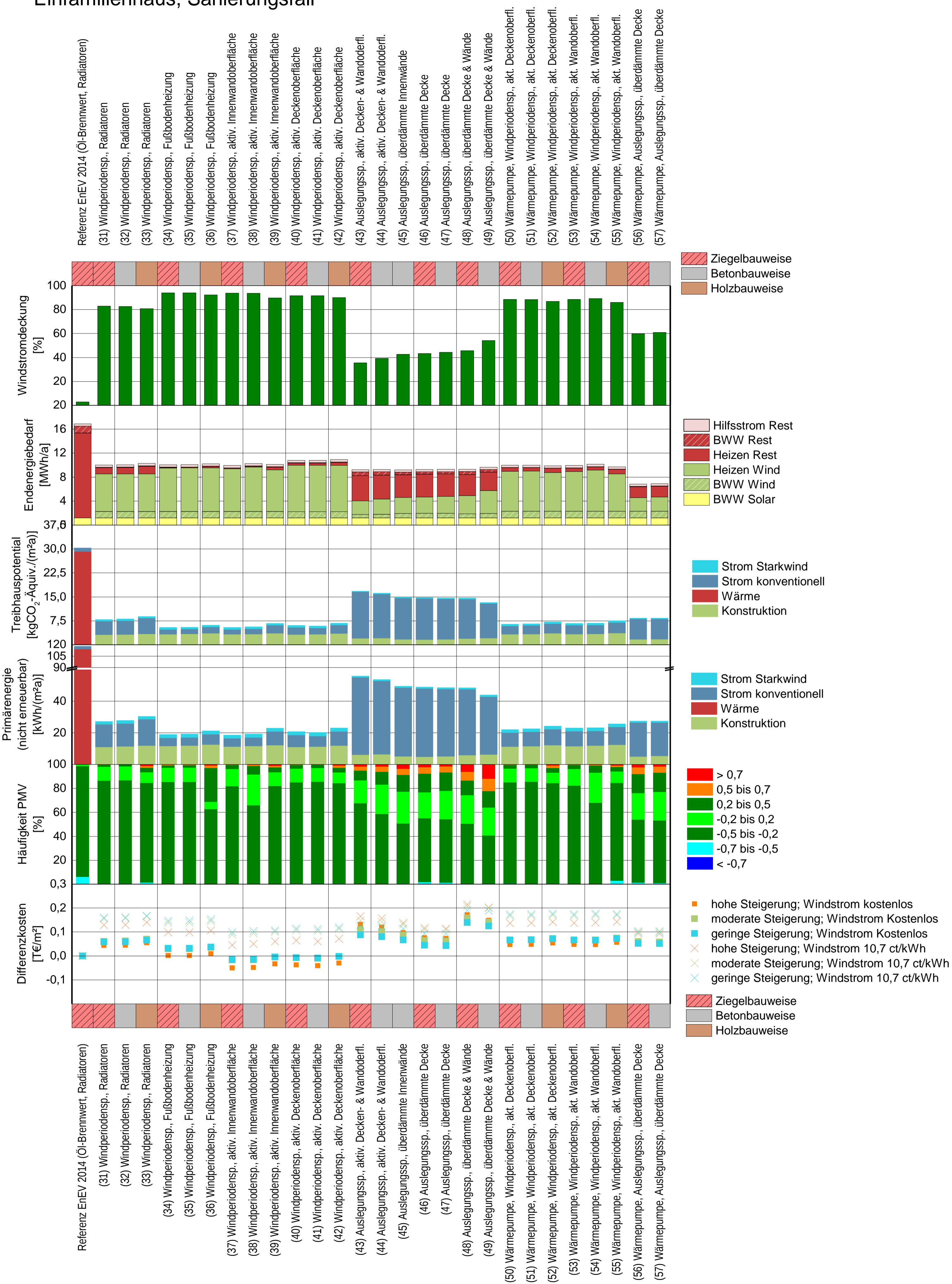
Kostenannahmen Szenario geringe Preissteigerung (EnEV-Wirtschaftlichkeit)		Startpreis	Steigerung
Windstrompreis	[€/kWh]	0,107 / 0,0	0,0%
Reststrompreis	[€/kWh]	0,205	0,1%
Betriebsstrompreis	[€/kWh]	0,172	0,1%
Ölpreis	[€/kWh]	0,061	1,2%
Pelletpreis	[€/kWh]	0,048	1,5%
Allgemeine Preissteigerung	[%]		1,5%
Diskontierungssatz	[%]		1,5%
Bewertungszeitraum	[a]	25	
Heizperiode	[-]	1. Okt - 31. März	

Anhang 4 - Ergebnisse der Detailanalyse

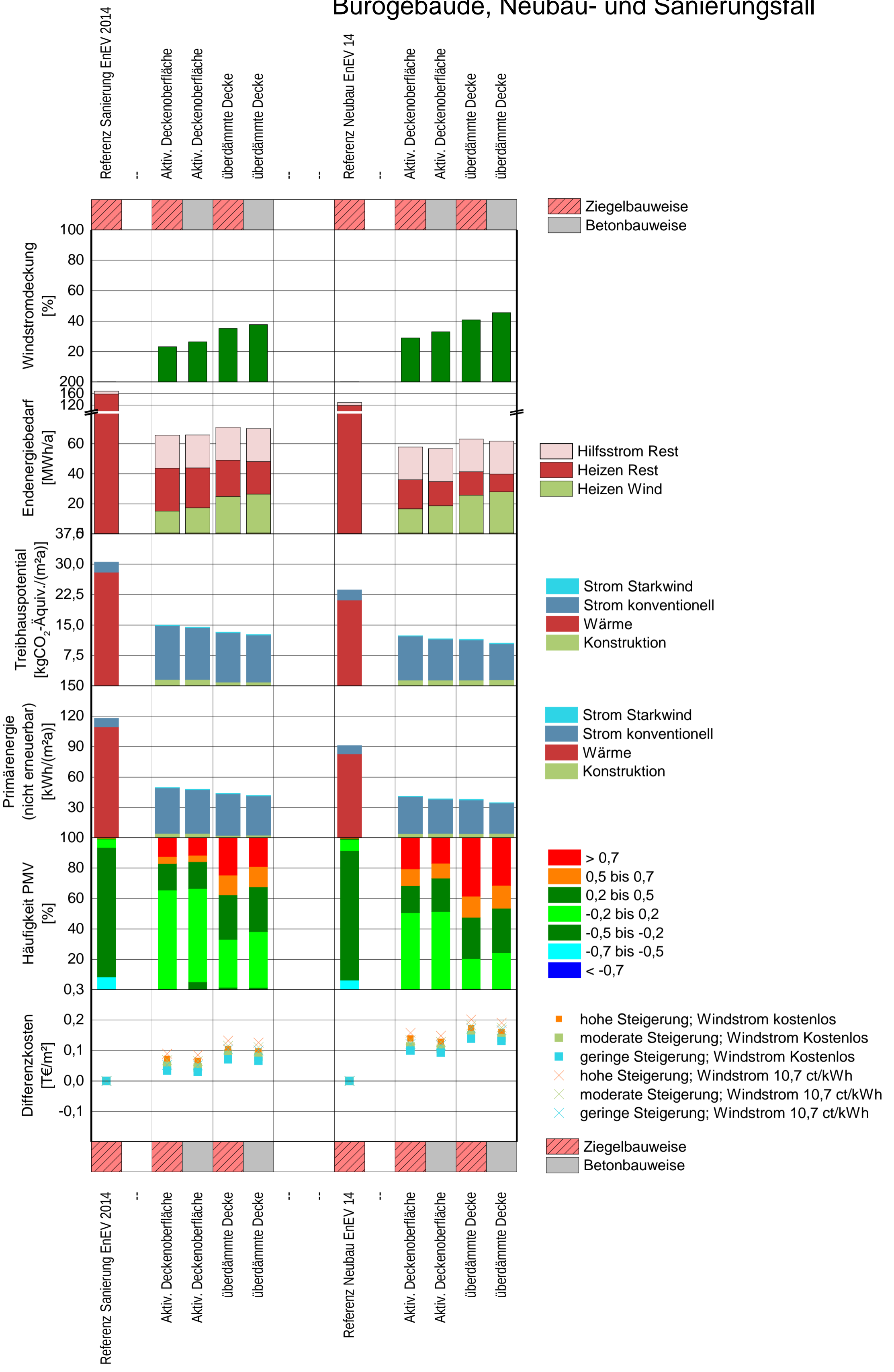
Einfamilienhaus, Neubaufall



Einfamilienhaus, Sanierungsfall



Bürogebäude, Neubau- und Sanierungsfall



Einfamilienhaus Neubau						
Einheit	Heizen Wind [kWh/a]	Heizen Rest [kWh/a]	BWW Wind (W) [kWh/a]	BWW Solar [kWh/a]	BWW Rest [kWh/a]	Hilfsstrom Wind [kWh/a]
Referenz EnEV 2014 (Öl-Brennwert, Radiatoren)	0	30614	0	2598	3423	27
(01) Windperiodensp., Radiatoren	9660	468	3207	2756	36	23
(02) Windperiodensp., Radiatoren	9522	458	3207	2756	36	23
(03) Windperiodensp., Radiatoren	9350	820	3205	2756	39	23
(04) Windperiodensp., Fußbodenheizung	10545	0	3209	2756	35	23
(05) Windperiodensp., Fußbodenheizung	10768	0	3209	2756	35	23
(06) Windperiodensp., Fußbodenheizung	10855	0	3208	2756	35	23
(07) Windperiodensp., Bauteilaktiv.	11836	0	3208	2756	35	23
(08) Windperiodensp., Bauteilaktiv.	11744	0	3208	2756	35	23
(09) Windperiodensp., Bauteilaktiv. Innenwände	10428	0	3208	2756	35	23
(10) Windperiodensp., Bauteilaktiv. Innenwände	10638	0	3208	2756	35	23
(11) Winperiodensp., Aktiv. Deckenoberfläche	11133	0	3209	2756	35	23
(12) Winperiodensp., Aktiv. Deckenoberfläche	11317	0	3209	2756	35	23
(13) Winperiodensp., Aktiv. Deckenoberfläche	11428	239	3185	2756	59	23
(14) Winperiodensp., Aktiv. Innenwandoberfläche	10874	0	3208	2756	35	23
(15) Winperiodensp., Aktiv. Innenwandoberfläche	11311	0	3208	2756	35	23
(16) Winperiodensp., Aktiv. Innenwandoberfläche	11078	15	3204	2756	39	23
(17) Auslegungssp., Bauteilaktiv.	5149	4422	1145	2598	2298	23
(18) Auslegungssp., Bauteilaktiv.	5569	3786	1143	2598	2301	23
(19) Auslegungssp., überdämmte Decke	7684	3162	1212	2598	2231	23
(20) Auslegungssp., überdämmte Decke	7979	2602	1164	2598	2278	23
(21) Wärmepumpe, Auslegungssp., Bauteilaktiv.	2597	2557	3153	2598	214	23
(22) Wärmepumpe, Auslegungssp., Bauteilaktiv.	2995	2418	3165	2598	214	23
Einfamilienhaus Sanierung						
Einheit	Heizen Wind [kWh/a]	Heizen Rest [kWh/a]	BWW Wind (W) [kWh/a]	BWW Solar [kWh/a]	BWW Rest [kWh/a]	Hilfsstrom Wind [kWh/a]
Referenz EnEV 2014 (Öl-Brennwert, Radiatoren)	0	14179	0	1184	1142	12
(31) Windperiodensp., Radiatoren	6242	1062	1077	1183	66	12
(32) Windperiodensp., Radiatoren	6245	1088	1076	1183	67	12
(33) Windperiodensp., Radiatoren	6257	1302	1075	1183	68	12
(34) Windperiodensp., Fußbodenheizung	7234	96	1081	1183	62	12
(35) Windperiodensp., Fußbodenheizung	7259	93	1082	1183	61	12
(36) Windperiodensp., Fußbodenheizung	7271	231	1064	1183	80	12
(37) Windperiodensp., aktiv. Innenwandoberfläche	7115	104	1081	1183	62	12
(38) Windperiodensp., aktiv. Innenwandoberfläche	7397	83	1087	1183	110	12
(39) Windperiodensp., aktiv. Innenwandoberfläche	6946	448	1057	1183	86	12
(40) Windperiodensp., aktiv. Deckenoberfläche	7731	338	1056	1183	88	12
(41) Windperiodensp., aktiv. Deckenoberfläche	7734	345	1056	1183	88	12
(42) Windperiodensp., aktiv. Deckenoberfläche	7715	488	1042	1183	102	12
(43) Auslegungssp., aktiv. Decken- & Wandoderfl.	2285	4211	573	1170	608	12
(44) Auslegungssp., aktiv. Decken- & Wandoderfl.	2553	3972	610	1170	570	12
(45) Auslegungssp., überdämmte Innenwände	2685	3782	736	1170	443	12
(46) Auslegungssp., überdämmte Decke	2725	3801	772	1170	407	12
(47) Auslegungssp., überdämmte Decke	2810	3739	785	1170	394	12
(48) Auslegungssp., überdämmte Decke & Wände	3022	3541	688	1170	491	12
(49) Auslegungssp., überdämmte Decke & Wände	3831	3073	755	1170	424	12
(50) WP, Windperiodensp., akt. Deckenoberfl.	6669	597	1114	1183	28	12
(51) WP, Windperiodensp., akt. Deckenoberfl.	6676	595	1114	1183	28	12
(52) WP, Windperiodensp., akt. Deckenoberfl.	6449	722	1114	1183	28	12
(53) WP, Windperiodensp., akt. Wandoberfl.	6615	595	1114	1183	28	12
(54) WP, Windperiodensp., akt. Wandoberfl.	6857	562	1114	1183	28	12
(55) WP, Windperiodensp., akt. Wandoberfl.	6222	778	1114	1183	28	12
(56) WP, Auslegungssp., überdämmte Decke	2268	1840	1109	1170	60	12
(57) WP, Auslegungssp., überdämmte Decke	2376	1796	1110	1170	60	12
Bürogebäude						
Einheit	Heizen Wind [kWh/a]	Heizen Rest [kWh/a]	BWW Wind (W) [kWh/a]	BWW Wind (S) [kWh/a]	BWW Rest [kWh/a]	Hilfsstrom Wind [kWh/a]
Referenz Sanierung EnEV 2014		158298				282
Sanierung, Ziegel, Aktiv. Deckenoberfläche	14545	28601				663
Sanierung, Beton, Aktiv. Deckenoberfläche	16704	26591				663
Sanierung, Ziegel, überdämmte Decke	24292	24189				663
Sanierung, Beton, überdämmte Decke	25795	21824				663
Referenz Neubau EnEV 2014		119571				279
Neubau, Ziegel, Aktiv. Deckenoberfläche	16079	19331				663
Neubau, Beton, Aktiv. Deckenoberfläche	18079	16165				663
Neubau, Ziegel, überdämmte Decke	25148	15559				663
Neubau, Beton, überdämmte Decke	27444	11769				663

Hilfsstrom Rest [kWh/a]	Windstromdeckung [%]	Heizen Wind [kWh/(m²a)]	Heizen Rest [kWh/(m²a)]	BWW Wind (W) [kWh/(m²a)]	BWW Solar [kWh/(m²a)]	BWW Rest [kWh/(m²a)]	Hilfsstrom Wind [kWh/(m²a)]	Hilfsstrom Rest [kWh/(m²a)]
939	0	0,00	70,54	0,00	5,99	7,89	0,06	2,16
747	91	22,26	1,08	7,39	6,35	0,08	0,05	1,72
747	91	21,94	1,06	7,39	6,35	0,08	0,05	1,72
747	89	21,54	1,89	7,38	6,35	0,09	0,05	1,72
747	95	24,30	0,00	7,39	6,35	0,08	0,05	1,72
747	95	24,81	0,00	7,39	6,35	0,08	0,05	1,72
747	95	25,01	0,00	7,39	6,35	0,08	0,05	1,72
747	95	27,27	0,00	7,39	6,35	0,08	0,05	1,72
747	95	27,06	0,00	7,39	6,35	0,08	0,05	1,72
747	95	24,03	0,00	7,39	6,35	0,08	0,05	1,72
747	95	24,51	0,00	7,39	6,35	0,08	0,05	1,72
747	95	25,65	0,00	7,39	6,35	0,08	0,05	1,72
747	95	26,08	0,00	7,39	6,35	0,08	0,05	1,72
747	93	26,33	0,55	7,34	6,35	0,14	0,05	1,72
747	95	25,06	0,00	7,39	6,35	0,08	0,05	1,72
747	95	26,06	0,00	7,39	6,35	0,08	0,05	1,72
747	95	25,53	0,03	7,38	6,35	0,09	0,05	1,72
747	46	11,86	10,19	2,64	5,99	5,29	0,05	1,72
747	50	12,83	8,72	2,63	5,99	5,30	0,05	1,72
747	59	17,71	7,29	2,79	5,99	5,14	0,05	1,72
747	62	18,38	6,00	2,68	5,99	5,25	0,05	1,72
747	62	5,98	5,89	7,26	5,99	0,49	0,05	1,72
747	65	6,90	5,57	7,29	5,99	0,49	0,05	1,72
Hilfsstrom Rest [kWh/a]	Windstromdeckung [%]	Heizen Wind [kWh/(m²a)]	Heizen Rest [kWh/(m²a)]	BWW Wind (W) [kWh/(m²a)]	BWW Solar [kWh/(m²a)]	BWW Rest [kWh/(m²a)]	Hilfsstrom Wind [kWh/(m²a)]	Hilfsstrom Rest [kWh/(m²a)]
387	3	0,00	88,62	0,00	7,40	7,13	0,07	2,42
387	83	39,01	6,64	6,73	7,39	0,41	0,07	2,42
387	83	39,03	6,80	6,73	7,39	0,42	0,07	2,42
387	81	39,11	8,14	6,72	7,39	0,43	0,07	2,42
387	94	45,21	0,60	6,76	7,39	0,39	0,07	2,42
387	94	45,37	0,58	6,76	7,39	0,38	0,07	2,42
387	92	45,45	1,44	6,65	7,39	0,50	0,07	2,42
387	94	44,47	0,65	6,76	7,39	0,39	0,07	2,42
387	94	46,23	0,52	6,79	7,39	0,69	0,07	2,42
387	90	43,41	2,80	6,61	7,39	0,54	0,07	2,42
387	92	48,32	2,12	6,60	7,39	0,55	0,07	2,42
387	93	48,34	2,16	6,60	7,39	0,55	0,07	2,42
387	90	48,22	3,05	6,51	7,39	0,64	0,07	2,42
387	36	14,28	26,32	3,58	7,31	3,80	0,07	2,42
387	39	15,96	24,83	3,81	7,31	3,57	0,07	2,42
387	43	16,78	23,64	4,60	7,31	2,77	0,07	2,42
387	43	17,03	23,76	4,82	7,31	2,54	0,07	2,42
387	44	17,56	23,37	4,91	7,31	2,46	0,07	2,42
387	46	18,89	22,13	4,30	7,31	3,07	0,07	2,42
387	54	23,94	19,21	4,72	7,31	2,65	0,07	2,42
387	88	41,68	3,73	6,96	7,39	0,17	0,07	2,42
387	88	41,73	3,72	6,96	7,39	0,17	0,07	2,42
387	87	40,30	4,51	6,96	7,39	0,17	0,07	2,42
387	88	41,35	3,72	6,96	7,39	0,17	0,07	2,42
387	89	42,86	3,51	6,96	7,39	0,17	0,07	2,42
387	86	38,89	4,86	6,96	7,39	0,17	0,07	2,42
387	60	14,18	11,50	6,93	7,31	0,38	0,07	2,42
387	61	14,85	11,22	6,94	7,31	0,38	0,07	2,42
Hilfsstrom Rest [kWh/a]	Windstromdeckung [%]	Heizen Wind [kWh/(m²a)]	Heizen Rest [kWh/(m²a)]	BWW Wind (W) [kWh/(m²a)]	BWW Wind (S) [kWh/(m²a)]	BWW Rest [kWh/(m²a)]	Hilfsstrom Wind [kWh/(m²a)]	Hilfsstrom Rest [kWh/(m²a)]
9276	0	0,00	93,56				0,17	5,48
21827	23	8,60	16,90				0,39	12,90
21827	26	9,87	15,72				0,39	12,90
21827	35	14,36	14,30				0,39	12,90
21827	38	15,25	12,90				0,39	12,90
9193	0	0,00	70,67				0,16	5,43
21804	29	9,50	11,42				0,39	12,89
21804	33	10,68	9,55				0,39	12,89
21804	41	14,86	9,20				0,39	12,89
21804	46	16,22	6,96				0,39	12,89

Kat -III	Kat -III	Kat -II	Kat -I <-> I	Kat II	Kat III	Kat III+
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0	0	100	0	0	0	0
2	3	80	6	8	3	1
0	2	80	6	10	2	0
0	3	79	7	6	4	1
0	0	68	18	7	6	1
0	0	69	16	9	5	1
0	0	72	14	6	5	4
0	3	43	22	15	8	9
0	3	42	27	15	9	5
0	0	54	24	12	6	4
0	0	46	27	15	8	4
1	5	50	22	12	9	2
0	4	48	25	14	8	1
0	2	45	26	10	6	10
0	0	48	23	12	8	9
0	0	54	26	14	5	1
0	0	77	10	6	4	4
0	3	43	22	14	7	10
0	3	42	27	15	8	6
0	1	23	27	17	9	23
0	0	20	32	21	11	16
0	4	42	22	14	7	10
0	3	42	27	15	8	6
Kat -III	Kat -III	Kat -II	Kat -I <-> I	Kat II	Kat III	Kat III+
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0	5	94	1	0	0	0
0	0	86	12	2	0	0
0	0	87	12	1	0	0
0	2	83	9	4	1	1
0	0	85	12	2	1	0
0	0	85	12	2	0	0
0	0	84	8	38	3	1
0	0	82	14	3	0	0
0	0	66	26	7	1	0
0	0	82	11	4	1	1
0	0	85	12	3	0	0
0	0	85	12	3	0	0
0	0	84	9	4	2	1
0	0	68	19	8	3	2
0	0	59	25	11	4	2
0	0	50	27	14	5	3
0	2	53	22	16	5	2
0	1	53	24	15	5	1
0	0	50	24	12	7	6
0	0	41	23	14	10	12
0	0	85	12	3	0	0
0	0	85	12	3	0	0
0	0	84	9	4	2	1
0	0	82	14	3	0	0
0	0	68	25	6	1	0
0	3	81	10	4	1	1
0	1	53	22	16	6	2
0	1	52	24	16	5	2
Kat -III	Kat -III	Kat -II	Kat -I <-> I	Kat II	Kat III	Kat III+
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0	8	85	6	1	0	0
0	0	1	65	17	5	12
0	0	5	61	18	4	12
0	0	1	32	29	13	25
0	0	1	37	29	13	19
0	6	85	7	1	0	0
0	0	0	50	18	11	21
0	0	0	51	22	10	17
0	0	1	20	27	14	39
0	0	0	24	29	15	31

hohe Steigerung; Windstrom kostenlos T€/m ²	moderate Steigerung; Windstrom Kostenlos T€/m ²	geringe Steigerung; Windstrom Kostenlos T€/m ²
0,000	0,000	0,000
0,031	0,058	0,060
0,031	0,057	0,060
0,037	0,062	0,063
0,024	0,052	0,055
0,024	0,052	0,055
0,024	0,052	0,055
-0,014	0,017	0,021
-0,014	0,017	0,021
-0,016	0,015	0,019
-0,016	0,015	0,019
-0,005	0,026	0,029
-0,005	0,026	0,029
-0,001	0,029	0,032
-0,008	0,023	0,027
-0,008	0,023	0,027
-0,008	0,024	0,027
0,049	0,054	0,044
0,039	0,046	0,038
0,062	0,071	0,064
0,053	0,065	0,059
0,024	0,041	0,039
0,022	0,040	0,038
hohe Steigerung; Windstrom kostenlos T€/m ²	moderate Steigerung; Windstrom Kostenlos T€/m ²	geringe Steigerung; Windstrom Kostenlos T€/m ²
0,000	0,000	0,000
0,043	0,061	0,058
0,045	0,062	0,059
0,055	0,070	0,065
0,002	0,029	0,032
0,002	0,030	0,032
0,009	0,036	0,037
-0,050	-0,018	-0,015
-0,049	-0,016	-0,014
-0,033	-0,005	-0,004
-0,037	-0,008	-0,007
-0,041	-0,011	-0,009
-0,030	-0,002	-0,002
0,132	0,110	0,087
0,120	0,101	0,080
0,097	0,086	0,066
0,075	0,064	0,045
0,072	0,062	0,043
0,171	0,158	0,139
0,148	0,141	0,125
0,047	0,067	0,067
0,048	0,067	0,067
0,054	0,072	0,071
0,048	0,067	0,067
0,047	0,066	0,066
0,057	0,074	0,073
0,054	0,059	0,052
0,052	0,058	0,051
hohe Steigerung; Windstrom kostenlos T€/m ²	moderate Steigerung; Windstrom Kostenlos T€/m ²	geringe Steigerung; Windstrom Kostenlos T€/m ²
0,000	0,000	0,000
0,073	0,049	0,033
0,066	0,044	0,029
0,105	0,085	0,071
0,097	0,079	0,066
0,000	0,000	0,000
0,139	0,113	0,100
0,128	0,105	0,093
0,173	0,151	0,139
0,160	0,141	0,131

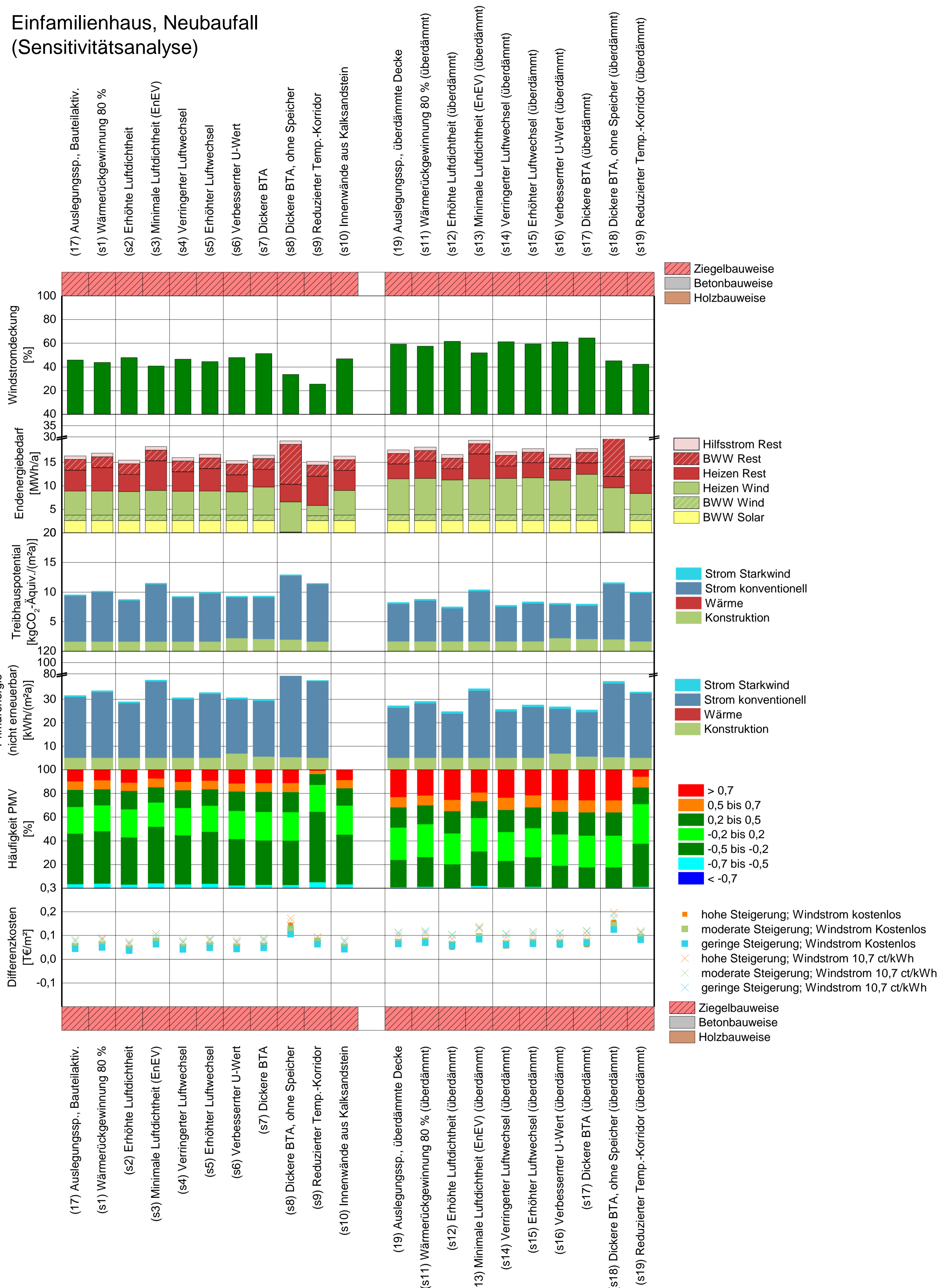
hohe Steigerung; Windstrom 10,7 ct/kWh T€/m ²	moderate Steigerung; Windstrom 10,7 ct/kWh T€/m ²	geringe Steigerung; Windstrom 10,7 ct/kWh T€/m ²
0,000	0,000	0,00
0,087	0,120	0,13
0,086	0,119	0,12
0,091	0,122	0,13
0,083	0,118	0,13
0,084	0,119	0,13
0,084	0,120	0,13
0,051	0,090	0,10
0,051	0,089	0,10
0,043	0,081	0,09
0,044	0,082	0,09
0,056	0,095	0,10
0,057	0,096	0,10
0,062	0,099	0,11
0,053	0,091	0,10
0,054	0,093	0,10
0,054	0,092	0,10
0,076	0,084	0,08
0,068	0,079	0,07
0,100	0,114	0,11
0,093	0,109	0,11
0,049	0,069	0,07
0,049	0,070	0,07
hohe Steigerung; Windstrom 10,7 ct/kWh T€/m ²	moderate Steigerung; Windstrom 10,7 ct/kWh T€/m ²	geringe Steigerung; Windstrom 10,7 ct/kWh T€/m ²
0,000	0,000	0,00
0,129	0,156	0,16
0,130	0,158	0,16
0,140	0,166	0,17
0,099	0,138	0,15
0,099	0,139	0,15
0,106	0,144	0,15
0,045	0,090	0,10
0,050	0,095	0,10
0,060	0,100	0,11
0,065	0,107	0,11
0,061	0,104	0,11
0,072	0,112	0,12
0,165	0,147	0,13
0,157	0,143	0,12
0,137	0,131	0,11
0,116	0,110	0,09
0,114	0,109	0,09
0,215	0,206	0,19
0,202	0,201	0,19
0,136	0,167	0,17
0,138	0,168	0,17
0,142	0,171	0,18
0,138	0,168	0,17
0,140	0,170	0,18
0,142	0,170	0,17
0,094	0,104	0,10
0,093	0,104	0,10
hohe Steigerung; Windstrom 10,7 ct/kWh T€/m ²	moderate Steigerung; Windstrom 10,7 ct/kWh T€/m ²	geringe Steigerung; Windstrom 10,7 ct/kWh T€/m ²
0,000	0,000	0,00
0,089	0,068	0,05
0,085	0,066	0,05
0,132	0,116	0,10
0,126	0,112	0,10
0,000	0,000	0,00
0,157	0,134	0,12
0,149	0,128	0,12
0,202	0,182	0,17
0,191	0,176	0,17

Konstruktion (Delta Referenz zu IST) kg CO2-Äquiv./((m²*a)	Wärme kg CO2-Äquiv./((m²*a)	Strom konventionell kg CO2-Äquiv./((m²*a)	Strom Starkwind kg CO2-Äquiv./((m²*a)	Konstruktion (Delta Referenz zu IST) [kWh/(m²a)]
0,00	25,49	1,00	0,0	0,0
2,37	0,00	1,29	0,3	8,3
2,45	0,00	1,28	0,3	8,6
2,42	0,00	1,66	0,3	8,4
2,53	0,00	0,81	0,4	8,8
2,62	0,00	0,81	0,4	9,1
2,59	0,00	0,81	0,4	9,0
2,57	0,00	0,81	0,4	8,6
2,65	0,00	0,81	0,4	8,9
2,55	0,00	0,81	0,4	8,6
2,64	0,00	0,81	0,4	8,9
2,55	0,00	0,81	0,4	8,5
2,64	0,00	0,81	0,4	8,8
2,60	0,00	1,08	0,4	8,7
2,64	0,00	0,81	0,4	9,0
2,73	0,00	0,81	0,4	9,2
2,70	0,00	0,83	0,4	9,1
1,67	0,00	7,71	0,2	5,1
1,76	0,00	7,06	0,2	5,4
1,68	0,00	6,34	0,2	5,1
1,77	0,00	5,81	0,2	5,4
1,71	0,00	3,63	0,2	5,3
1,80	0,00	3,49	0,2	5,6
Konstruktion (Delta Referenz zu IST) kg CO2-Äquiv./((m²*a)	Wärme kg CO2-Äquiv./((m²*a)	Strom konventionell kg CO2-Äquiv./((m²*a)	Strom Starkwind kg CO2-Äquiv./((m²*a)	Konstruktion (Delta Referenz zu IST) [kWh/(m²a)]
0,00	29,22	1,12	0,0	0,0
3,14	0,00	4,25	0,5	11,1
3,25	0,00	4,32	0,5	11,4
3,45	0,00	4,93	0,5	12,0
3,32	0,00	1,53	0,6	11,6
3,42	0,00	1,52	0,6	12,0
3,62	0,00	1,96	0,6	12,5
3,29	0,00	1,55	0,6	11,3
3,39	0,00	1,63	0,6	11,7
3,59	0,00	2,58	0,6	12,2
3,22	0,00	2,26	0,6	11,0
3,32	0,00	1,97	0,6	11,4
3,52	0,00	2,67	0,6	11,9
2,02	0,00	14,59	0,2	6,2
2,12	0,00	13,82	0,2	6,5
1,73	0,00	12,93	0,2	5,1
1,65	0,00	12,88	0,3	4,9
1,74	0,00	12,66	0,3	5,2
1,98	0,00	12,38	0,3	6,0
2,07	0,00	10,88	0,3	6,3
3,28	0,00	2,64	0,6	11,3
3,39	0,00	2,68	0,6	11,6
3,59	0,00	3,01	0,5	12,2
3,35	0,00	2,83	0,6	11,6
3,46	0,00	2,74	0,6	11,9
3,66	0,00	3,34	0,5	12,5
1,69	0,00	6,41	0,2	5,1
1,81	0,00	6,29	0,3	5,4
Konstruktion kg CO2-Äquiv./((m²*a)	Wärme kg CO2-Äquiv./((m²*a)	Strom konventionell kg CO2-Äquiv./((m²*a)	Strom Starkwind kg CO2-Äquiv./((m²*a)	Konstruktion (Delta Referenz zu IST) [kWh/(m²a)]
0,00	27,99	2,53	0,0	0,0
1,50	0,00	13,36	0,1	15,7
1,52	0,00	12,83	0,1	16,0
0,89	0,00	12,19	0,2	8,6
0,91	0,00	11,57	0,2	8,9
0,00	21,14	2,51	0,0	0,0
1,37	0,00	10,90	0,1	14,6
1,42	0,00	10,06	0,1	15,2
1,38	0,00	9,90	0,2	14,7
1,43	0,00	8,90	0,2	15,3

Wärme [kWh/(m²a)]	Strom konventionell [kWh/(m²a)]	Strom Starkwind [kWh/(m²a)]
99,7	3,4	0,0
0,0	4,3	1,2
0,0	4,3	1,2
0,0	5,6	1,2
0,0	2,7	1,3
0,0	2,7	1,3
0,0	2,7	1,3
0,0	2,7	1,4
0,0	2,7	1,4
0,0	2,7	1,3
0,0	2,7	1,3
0,0	2,7	1,4
0,0	2,7	1,4
0,0	3,6	1,4
0,0	2,7	1,3
0,0	2,7	1,4
0,0	2,8	1,4
0,0	25,9	0,6
0,0	23,7	0,6
0,0	21,3	0,8
0,0	19,5	0,9
0,0	12,2	0,5
0,0	11,7	0,6
Wärme [kWh/(m²a)]	Strom konventionell [kWh/(m²a)]	Strom Starkwind [kWh/(m²a)]
114,2	3,8	0,0
0,0	14,3	1,9
0,0	14,5	1,9
0,0	16,6	1,9
0,0	5,1	2,3
0,0	5,1	2,1
0,0	6,6	2,1
0,0	5,2	2,1
0,0	5,5	2,2
0,0	8,7	2,1
0,0	7,6	2,2
0,0	6,6	2,3
0,0	9,0	2,2
0,0	49,0	0,7
0,0	46,4	0,8
0,0	43,4	0,9
0,0	43,3	0,9
0,0	42,6	0,9
0,0	41,6	1,0
0,0	36,6	1,2
0,0	8,9	2,0
0,0	9,0	2,0
0,0	10,1	1,9
0,0	9,5	2,0
0,0	9,2	2,0
0,0	11,2	1,9
0,0	21,5	0,9
0,0	21,1	0,9
Wärme [kWh/(m²a)]	Strom konventionell [kWh/(m²a)]	Strom Starkwind [kWh/(m²a)]
393,8	30,7	0,0
0,0	161,7	1,3
0,0	155,3	1,5
0,0	147,6	2,2
0,0	140,0	2,3
297,4	30,4	0,0
0,0	131,9	1,5
0,0	121,8	1,6
0,0	119,8	2,3
0,0	107,7	2,5

Anhang 5 - Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Einfamilienhaus, Neubaufall (Sensitivitätsanalyse)



	Heizen Wind	Heizen Rest	BWW Wind (W)	BWW Solar	BWW Rest	Hilfsstrom Wind	Hilfsstrom Rest	Windstromdeckung
Einheit	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[%]
(17) Auslegungssp., Bauteilaktiv.	5149	4422	1145	2598	2298	23	747	46
(s1) Wärmerückgewinnung 80 %	5134	5016	1145	2598	2299	23	747	44
(s2) Erhöhte Luftdichtheit	4995	3661	1152	2598	2291	23	747	48
(s3) Minimale Luftdichtheit (EnEV)	5256	6313	1146	2598	2298	23	747	41
(s4) Verringerter Luftwechsel	5095	4139	1145	2598	2299	23	747	47
(s5) Erhöhter Luftwechsel	5108	4797	1147	2598	2297	23	747	44
(s6) Verbesserrter U-Wert	4966	3628	1144	2598	2300	23	747	48
(s7) Dickere BTA	5981	3776	1148	2598	2296	23	747	51
(s8) Dickere BTA, ohne Speicher	6420	3779	145	0	8490	23	747	34
(s9) Reduzierter Temp.-Korridor	2166	6238	1029	2598	2416	23	747	26
(s10) Innenwände aus Kalksandstein	5271	4253	1144	2598	2299	23	747	47
(19) Auslegungssp., überdämmte Decke	7684	3162	1212	2598	2231	23	747	59
(s11) Wärmerückgewinnung 80 % (überdämmt)	7762	3695	1226	2598	2217	23	747	58
(s12) Erhöhte Luftdichtheit (überdämmt)	7439	2412	1189	2598	2254	23	747	62
(s13) Minimale Luftdichtheit (EnEV) (überdämmt)	7616	5301	1273	2598	2170	23	747	52
(s14) Verringerter Luftwechsel (überdämmt)	7780	2672	1169	2598	2274	23	747	61
(s15) Erhöhter Luftwechsel (überdämmt)	7904	3206	1178	2598	2265	23	747	59
(s16) Verbesserrter U-Wert (überdämmt)	7405	2485	1191	2598	2252	23	747	61
(s17) Dickere BTA (überdämmt)	8649	2444	1189	2598	2254	23	747	64
(s18) Dickere BTA, ohne Speicher (überdämmt)	9392	2433	177	0	8448	23	747	45
(s19) Reduzierter Temp.-Korridor (überdämmt)	4524	4972	1253	2598	2190	23	747	42
	Heizen Wind	Heizen Rest	BWW Wind (W)	BWW Solar	BWW Rest	Hilfsstrom Wind	Hilfsstrom Rest	
Einheit	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	
(17) Auslegungssp., Bauteilaktiv.	11,86	10,19	2,64	5,99	5,29	0,05	1,72	
(s1) Wärmerückgewinnung 80 %	11,83	11,56	2,64	5,99	5,30	0,05	1,72	
(s2) Erhöhte Luftdichtheit	11,51	8,44	2,65	5,99	5,28	0,05	1,72	
(s3) Minimale Luftdichtheit (EnEV)	12,11	14,55	2,64	5,99	5,29	0,05	1,72	
(s4) Verringerter Luftwechsel	11,74	9,54	2,64	5,99	5,30	0,05	1,72	
(s5) Erhöhter Luftwechsel	11,77	11,05	2,64	5,99	5,29	0,05	1,72	
(s6) Verbesserrter U-Wert	11,44	8,36	2,64	5,99	5,30	0,05	1,72	
(s7) Dickere BTA	13,78	8,70	2,65	5,99	5,29	0,05	1,72	
(s8) Dickere BTA, ohne Speicher	14,79	8,71	0,33	0,00	19,56	0,05	1,72	
(s9) Reduzierter Temp.-Korridor	4,99	14,37	2,37	5,99	5,57	0,05	1,72	
(s10) Innenwände aus Kalksandstein	12,15	9,80	2,64	5,99	5,30	0,05	1,72	
(19) Auslegungssp., überdämmte Decke	17,71	7,29	2,79	5,99	5,14	0,05	1,72	
(s11) Wärmerückgewinnung 80 % (überdämmt)	17,88	8,51	2,82	5,99	5,11	0,05	1,72	
(s12) Erhöhte Luftdichtheit (überdämmt)	17,14	5,56	2,74	5,99	5,19	0,05	1,72	
(s13) Minimale Luftdichtheit (EnEV) (überdämmt)	17,55	12,21	2,93	5,99	5,00	0,05	1,72	
(s14) Verringerter Luftwechsel (überdämmt)	17,93	6,16	2,69	5,99	5,24	0,05	1,72	
(s15) Erhöhter Luftwechsel (überdämmt)	18,21	7,39	2,71	5,99	5,22	0,05	1,72	
(s16) Verbesserrter U-Wert (überdämmt)	17,06	5,73	2,74	5,99	5,19	0,05	1,72	
(s17) Dickere BTA (überdämmt)	19,93	5,63	2,74	5,99	5,19	0,05	1,72	
(s18) Dickere BTA, ohne Speicher (überdämmt)	21,64	5,61	0,41	0,00	19,47	0,05	1,72	
(s19) Reduzierter Temp.-Korridor (überdämmt)	10,42	11,46	2,89	5,99	5,05	0,05	1,72	

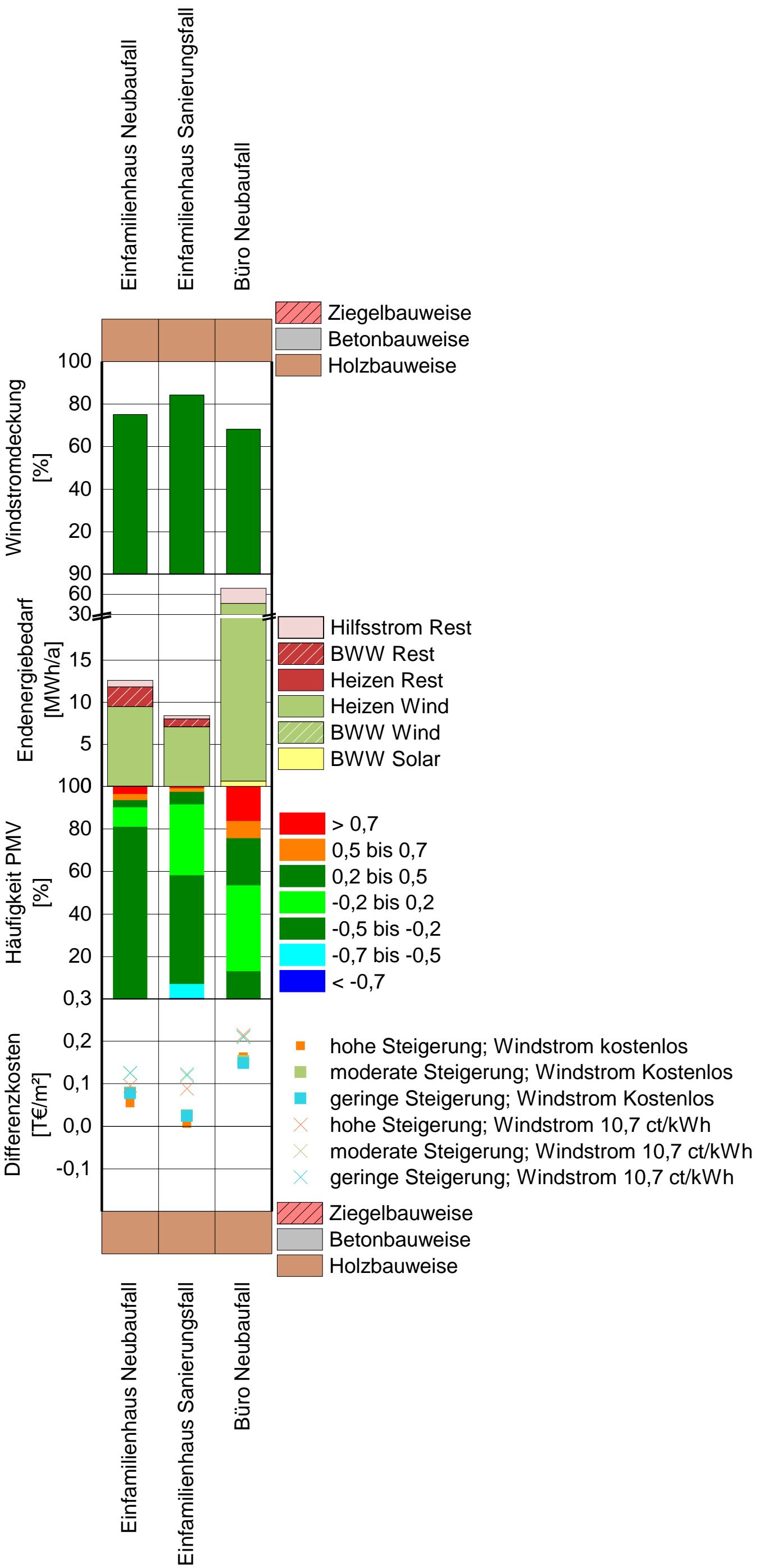
Kat -III	Kat -III	Kat -II	Kat -I <-> I	Kat II	Kat III	Kat III+
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0	3	43	22	14	7	10
1	4	44	22	14	8	9
0	3	40	24	16	7	11
1	4	48	21	13	8	7
0	3	42	23	15	7	10
0	4	44	22	14	7	9
0	2	39	24	16	7	12
0	3	37	24	17	8	11
0	3	37	24	17	8	11
0	5	59	23	9	3	1
0	3	42	25	15	7	9
0	1	23	27	17	9	23
0	1	25	28	16	8	22
0	1	20	26	19	10	25
0	2	29	28	14	7	19
0	1	22	25	19	10	24
0	1	25	24	18	10	22
0	1	19	26	19	10	26
0	1	17	27	20	10	26
0	1	17	27	20	10	26
0	1	36	33	14	9	6

hohe Steigerung; Windstrom kostenlos T€/m ²	moderate Steigerung; Windstrom Kostenlos T€/m ²	geringe Steigerung; Windstrom Kostenlos T€/m ²	hohe Steigerung; Windstrom 10,7 ct/kWh T€/m ²	moderate Steigerung; Windstrom 10,7 ct/kWh T€/m ²	geringe Steigerung; Windstrom 10,7 ct/kWh T€/m ²
0,049	0,054	0,044	0,076	0,084	0,08
0,059	0,061	0,050	0,086	0,091	0,08
0,037	0,045	0,036	0,064	0,074	0,07
0,079	0,076	0,063	0,107	0,107	0,10
0,045	0,051	0,041	0,072	0,081	0,07
0,055	0,058	0,048	0,082	0,089	0,08
0,043	0,051	0,043	0,070	0,081	0,07
0,049	0,056	0,048	0,080	0,091	0,08
0,144	0,127	0,106	0,172	0,158	0,14
0,080	0,077	0,063	0,094	0,092	0,08
0,047	0,052	0,042	0,074	0,083	0,08
0,062	0,071	0,064	0,100	0,114	0,11
0,070	0,077	0,069	0,108	0,121	0,12
0,050	0,063	0,057	0,087	0,104	0,10
0,094	0,096	0,085	0,133	0,139	0,13
0,054	0,066	0,060	0,093	0,109	0,11
0,063	0,072	0,065	0,102	0,116	0,11
0,058	0,070	0,064	0,095	0,112	0,11
0,060	0,073	0,067	0,103	0,120	0,12
0,155	0,143	0,125	0,196	0,189	0,17
0,090	0,092	0,082	0,114	0,120	0,11

Konstruktion (Delta Referenz zu IST) kg CO ₂ -Äquiv./(m ² *a)	Wärme kg CO ₂ -Äquiv./(m ² *a)	Strom konventionell kg CO ₂ -Äquiv./(m ² *a)	Strom Starkwind kg CO ₂ -Äquiv./(m ² *a)	Konstruktion (Delta Referenz zu IST) [kWh/(m ² a)]	Wärme [kWh/(m ² a)]	Strom konventionell [kWh/(m ² a)]	Strom Starkwind [kWh/(m ² a)]
1,67	0,00	7,71	0,2	5,1	0,0	25,9	0,6
1,67	0,00	8,33	0,2	5,1	0,0	28,0	0,6
1,67	0,00	6,92	0,2	5,1	0,0	23,3	0,6
1,67	0,00	9,67	0,2	5,1	0,0	32,5	0,6
1,67	0,00	7,42	0,2	5,1	0,0	25,0	0,6
1,67	0,00	8,10	0,2	5,1	0,0	27,2	0,6
2,23	0,00	6,90	0,2	6,9	0,0	23,2	0,6
2,10	0,00	7,05	0,2	5,6	0,0	23,7	0,7
2,01	0,00	10,76	0,2	5,4	0,0	36,2	0,6
1,67	0,00	9,71	0,1	5,1	0,0	32,7	0,3
1,68	0,00	6,34	0,2	5,1	0,0	21,3	0,8
1,68	0,00	6,88	0,2	5,1	0,0	23,1	0,9
1,68	0,00	5,59	0,2	5,1	0,0	18,8	0,8
1,68	0,00	8,49	0,2	5,1	0,0	28,5	0,8
1,68	0,00	5,88	0,2	5,1	0,0	19,8	0,8
1,68	0,00	6,42	0,2	5,1	0,0	21,6	0,9
2,24	0,00	5,67	0,2	7,0	0,0	19,0	0,8
2,11	0,00	5,63	0,3	5,7	0,0	18,9	0,9
2,02	0,00	9,34	0,3	5,4	0,0	31,4	0,9
1,68	0,00	8,17	0,2	5,1	0,0	27,5	0,5

Anhang 6 - Ergebnisse der Studie zum Hochtemperatursteinspeicher

Einfamilienhaus, Neubaufall (Hochtemperatur-Steinspeicher, HTSP)



	Heizen Wind	Heizen Rest	BWW Wind (W)	BWW Solar	BWW Rest	Hilfsstrom Wind	Hilfsstrom Rest	Windstromdeckung	Kat -III	Kat -III	Kat -II	Kat -I <-> I	Kat II	Kat III	Kat III+
Einheit	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Referenz EnEV 2014 (Öl-Brennwert, Radiatoren)	0	30614	0	2598	3423	27	939	0	0	0	10000	0	0	0	0
Einfamilienhaus Neubaufall	9453	0	0	0	2391	23	747	75	0	0	8110	920	330	290	340
Einfamilienhaus Sanierungsfall (HTSP)	7087	0	0	0	940	12	387	84	68	665	5100	3341	589	156	76
Büro Neubaufall (HTSP)	46076	0			0	663	21804	68	0	0	1320	4040	2220	812	1610
	Heizen Wind	Heizen Rest	BWW Wind (W)	BWW Solar	BWW Rest	Hilfsstrom Wind	Hilfsstrom Rest								
Einheit	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]								
Referenz EnEV 2014 (Öl-Brennwert, Radiatoren)	0,00	70,54	0,00	5,99	7,89	0,06	2,16								
Einfamilienhaus Neubaufall	21,78	0,00	0,00	0,00	5,51	0,05	1,72								
Einfamilienhaus Sanierungsfall (HTSP)	44,29	0,00	0,00	0,00	5,88	0,07	2,42								
Büro Neubaufall (HTSP)	27,23	0,00			0,00	0,39	12,89								

hohe Steigerung; Windstrom kostenlos T€/m ²	moderate Steigerung; Windstrom Kostenlos T€/m ²	geringe Steigerung; Windstrom Kostenlos T€/m ²	hohe Steigerung; Windstrom 10,7 ct/kWh T€/m ²	moderate Steigerung; Windstrom 10,7 ct/kWh T€/m ²	geringe Steigerung; Windstrom 10,7 ct/kWh T€/m ²
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00
0,055	0,079	0,078	0,095	0,125	0,13
0,006	0,026	0,024	0,089	0,119	0,12
0,163	0,154	0,148	0,214	0,211	0,21

Konstruktion (Delta Referenz zu IST) kg CO ₂ -Äquiv./($m^2 \cdot a$)	Wärme kg CO ₂ -Äquiv./($m^2 \cdot a$)	Strom konventionell kg CO ₂ -Äquiv./($m^2 \cdot a$)	Strom Starkwind kg CO ₂ -Äquiv./($m^2 \cdot a$)	Konstruktion (Delta Referenz zu IST) [kWh/($m^2 \cdot a$)]	Wärme [kWh/($m^2 \cdot a$)]	Strom konventionell [kWh/($m^2 \cdot a$)]	Strom Starkwind [kWh/($m^2 \cdot a$)]
0,00	25,49	1,00	0,0	0,0	99,7	3,4	0,0

Anhang 7 - Dokumentation der veränderten Bauteilaufbauten der Passivhaus-Seitenstudie

Input data

Component 9: General data

Name	
Type	Opaque
Inner side	Zone 16: KindNW
Outer side	Outer air
Assembly	<input type="checkbox"/> Assembly (Id.5): wh20 - AW_passiv
U	[W/m²K] 0,1101
Geometry	
Area	[m²] 24,7
Inclination	[°] 90
Orientation	<input type="checkbox"/> West (57 %), North (43 %)
Surface	
Heat transfer coefficient convective, extern	[W/m²K] 18,5
Heat transfer coefficient radiant, extern	[W/m²K] 6,5
Heat transfer coefficient convective, intern	[W/m²K] 3,19231
Heat transfer coefficient radiant, intern	[W/m²K] 4,5
Rse / Rsi (According to component type)	[-] 0,04 / 0,13
Absorption / Emission (User defined)	[-] 0.4 / 0.9
Sd-value - outer (No coating)	[m] ----
Sd-value - outer (No coating)	[m] ----
Rain load R1 / R2 (No rain load)	[-] 0 / 0
Rain absorption (No rain absorption)	[-] 0
Reduction factor constant shading	[-] 1
Solar radiation on inner surface	[-]
Height above ground (From visualized geometry)	7,27

Component 9: Air flow model data

Optional data (if not defined default value will be assumed)	
Flow exponent calculated	[-] 0.67
Flow exponent	[-] 0.67
Flow coefficient calculated	[dm³/(sm²Pan)] 0.023
Flow coefficient	[dm³/(sm²Pan)] 0.023

Assembly (Id.5): wh20 - AW_passiv

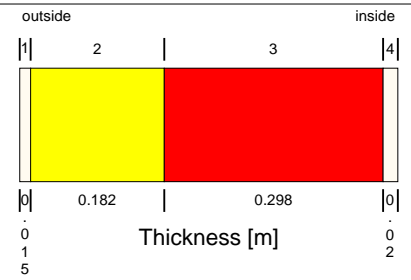
Außenwand - WUFI®Plus TEST

Homogenous layers

Thermal resistance: 8,909 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,11 W/m²K

Thickness: 0,515 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Zementputz	1800	850	0,87	0,015	Yellow
2	wh20 - DämmungPU - 033	40	1500	0,033	0,182	Yellow
3	wh20 - Ziegel - 089	500	1000	0,089	0,298	Red
4	wh20 - Gipsputz	1400	850	0,7	0,02	Yellow

Input data

Component 5: General data

Name	
Type	Opaque
Inner side	Zone 19: Gäste
Outer side	Outer air
Assembly	<input type="checkbox"/> Assembly (Id.6): wh20 - Dach_passiv
U	[W/m²K] 0,0807
Geometry	
Area	[m²] 31,9
Inclination	[°] 36,5
Orientation	<input type="checkbox"/> South (100 %)
Surface	
Heat transfer coefficient convective, extern	[W/m²K] 18,5
Heat transfer coefficient radiant, extern	[W/m²K] 6,5
Heat transfer coefficient convective, intern	[W/m²K] 5,5
Heat transfer coefficient radiant, intern	[W/m²K] 4,5
Rse / Rsi (According to component type)	[-] 0,04 / 0,1
Absorption / Emission (User defined)	[-] 0.4 / 0.9
Sd-value - outer (No coating)	[m] ----
Sd-value - outer (No coating)	[m] ----
Rain load R1 / R2 (No rain load)	[-] 0 / 0
Rain absorption (No rain absorption)	[-] 0
Reduction factor constant shading	[-] 1
Solar radiation on inner surface	[-]
Height above ground (From visualized geometry)	11,89

Component 5: Air flow model data

Optional data (if not defined default value will be assumed)	
Flow exponent calculated	[-] 0.67
Flow exponent	[-] 0.67
Flow coefficient calculated	[dm³/(sm²Pan)] 0.023
Flow coefficient	[dm³/(sm²Pan)] 0.023

Assembly (Id.6): wh20 - Dach_passiv

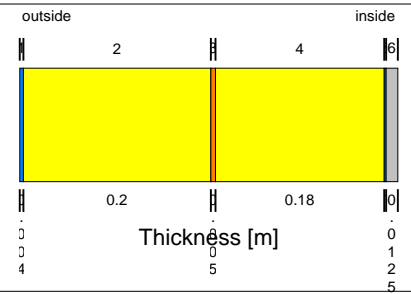
Dach - WUFI®Plus TEST

Homogenous layers

Thermal resistance: 12,245 m²K/W (without R_{si}, R_{se})

Heat transfer coefficient(U-value): 0,08 W/m²K

Thickness: 0,404 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - Unterspannbahn	2400	1000	0,17	0,004	Blue
2	PU (heat cond.: 0,03 W/mK)	40	1500	0,03	0,2	Yellow
3	Hardwood	650	1500	0,13	0,005	Orange
4	wh20 - DämmungPU - 033	40	1500	0,033	0,18	Yellow
5	wh20 - Unterspannbahn	2400	1000	0,17	0,002	Blue
6	Gipskartonplatte	900	850	0,25	0,013	Grey

Input data

Component 5: General data

Name	
Type	Opaque
Inner side	Zone 1: KellerSW
Outer side	Ground
Assembly	<input type="checkbox"/> Assembly (Id.4): wh20 - KW_passiv
U	[W/m²K] 0,2525
Geometry	
Area	[m²] 32
Inclination	[°] 90
Orientation	<input type="checkbox"/> South (40 %), West (60 %)
Surface	
Heat transfer coefficient convective, extern	[W/m²K] 99999
Heat transfer coefficient radiant, extern	[W/m²K] 0
Heat transfer coefficient convective, intern	[W/m²K] 3,19231
Heat transfer coefficient radiant, intern	[W/m²K] 4,5
Rse / Rsi (According to component type)	[-] 0 / 0,13
Absorption / Emission (User defined)	[-] 0.4 / 0.9
Sd-value - outer (No coating)	[m] ----
Sd-value - outer (No coating)	[m] ----
Rain load R1 / R2 (No rain load)	[-] 0 / 0
Rain absorption (No rain absorption)	[-] 0
Reduction factor constant shading	[-] 1
Solar radiation on inner surface	[-]
Height above ground (From visualized geometry)	1,55

Assembly (Id.4): wh20 - KW_passiv

<p>Homogenous layers</p> <p>Thermal resistance: 3,83 m²K/W (without Rsi, Rse)</p> <p>Heat transfer coefficient(U-value): 0,25 W/m²K</p> <p>Thickness: 0,432 m</p>	<p>outside 1 2 3 inside</p> <p> 0.212 0.2 0.02 </p> <p>Thickness [m]</p>
--	--

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - DämmungPU - 057	40	1500	0,057	0,212	Yellow
2	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Grey
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Light Grey

Input data

Component 1: General data

Name	
Type	Opaque
Inner side	Zone 1: KellerSW
Outer side	Ground
Assembly	<input type="checkbox"/> Assembly (Id.1): wh20 - BP_passiv
U	[W/m²K] 0,1397
Geometry	
Area	[m²] 26,2
Inclination	[°] 180
Orientation	<input type="checkbox"/> Horizontal (100 %)
Surface	
Heat transfer coefficient convective, extern	[W/m²K] 99999
Heat transfer coefficient radiant, extern	[W/m²K] 0
Heat transfer coefficient convective, intern	[W/m²K] 2,5
Heat transfer coefficient radiant, intern	[W/m²K] 3,38235
Rse / Rsi (According to component type)	[-] 0 / 0,17
Absorption / Emission (User defined)	[-] 0.4 / 0.9
Sd-value - outer (No coating)	[m] ----
Sd-value - outer (No coating)	[m] ----
Rain load R1 / R2 (No rain load)	[-] 0 / 0
Rain absorption (No rain absorption)	[-] 0
Reduction factor constant shading	[-] 1
Solar radiation on inner surface	[-]
Height above ground (From visualized geometry)	0

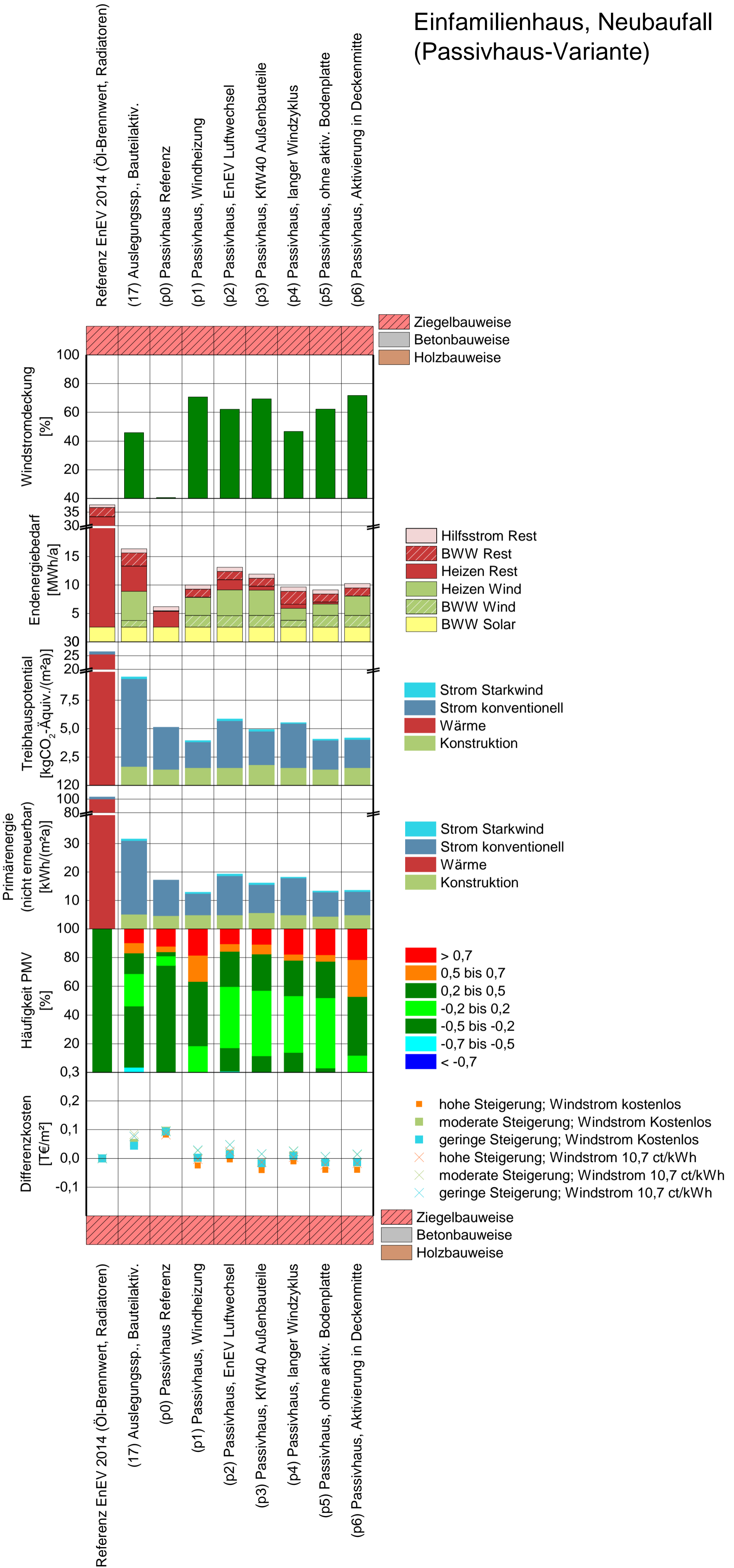
Assembly (Id.1): wh20 - BP_passiv

<p>Homogenous layers</p> <p>Thermal resistance: 6,989 m²K/W (without Rsi, Rse)</p> <p>Heat transfer coefficient(U-value): 0,14 W/m²K</p> <p>Thickness: 0,447 m</p>	<p>outside 1 2 3 inside</p> <p> 0.227 0.2 0.02 </p> <p>Thickness [m]</p>
---	--

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	wh20 - DämmungPU - 033	40	1500	0,033	0,227	Yellow
2	wh20 - Beton	2400	850	2,1	0,2	Grey
3	wh20 - Estrich	2100	850	1,3	0,02	Light Grey

Anhang 8 - Ergebnisse der Seitenstudie mit Passivhaus-Randbedingungen

Einfamilienhaus, Neubaufall (Passivhaus-Variante)



Einheit	Heizen Wind [kWh/a]	Heizen Rest [kWh/a]	BWW Wind (W) [kWh/a]	BWW Solar [kWh/a]	BWW Rest [kWh/a]	Hilfsstrom Wind [kWh/a]	Hilfsstrom Rest [kWh/a]	Windstromdeckung [%]	Kat -III [-]	Kat -III [-]	Kat -II [-]	Kat -I <-> I [-]	Kat II [-]	Kat III [-]	Kat III+ [-]
Referenz EnEV 2014 (Öl-Brennwert, Radiatoren)	0	30614	0	2598	3423	27	939	0	0	0	10000	0	0	0	0
Passivhaus Referenz ¹	0	2842	0	2598	0	23	747	1	0	0	75	7	3	4	12
Passivhaus, Windheizung	3193	25	2030	2598	1406	23	747	71	0	0	0	18	45	18	18
Passivhaus, EnEV Luftwechsel	4506	1820	2019	2598	1417	23	747	62	0	1	16	43	24	5	11
Passivhaus, KfW40 Außenbauteile	4423	717	2044	2598	1392	23	747	69	0	0	11	46	25	7	11
Passivhaus, langer Windzyklus	2089	748	1178	2598	2265	23	747	47	0	0	14	39	25	4	18
Passivhaus, ohne aktiv. Bodenplatte	2033	320	2033	2598	1403	23	747	62	0	0	300	4900	2530	460	1810
Passivhaus, Aktivierung in Deckenmitte	3438	11	2030	2598	1406	23	747	72	0	0	0	1180	4090	2570	2150

Einheit	Heizen Wind [kWh/(m²a)]	Heizen Rest [kWh/(m²a)]	BWW Wind (W) [kWh/(m²a)]	BWW Solar [kWh/(m²a)]	BWW Rest [kWh/(m²a)]	Hilfsstrom Wind [kWh/(m²a)]	Hilfsstrom Rest [kWh/(m²a)]
Referenz EnEV 2014 (Öl-Brennwert, Radiatoren)	0,00	70,54	0,00	5,99	7,89	0,06	2,16
Passivhaus Referenz ¹	0,00	6,55	0,00	5,99	0,00	0,05	1,72
Passivhaus, Windheizung	7,36	0,06	4,68	5,99	3,24	0,05	1,72
Passivhaus, EnEV Luftwechsel	10,38	4,19	4,65	5,99	3,26	0,05	1,72
Passivhaus, KfW40 Außenbauteile	10,19	1,65	4,71	5,99	3,21	0,05	1,72
Passivhaus, langer Windzyklus	4,81	1,72	2,71	5,99	5,22	0,05	1,72
Passivhaus, ohne aktiv. Bodenplatte	4,68	0,74	4,68	5,99	3,23	0,05	1,72
Passivhaus, Aktivierung in Deckenmitte	7,92	0,03	4,68	5,99	3,24	0,05	1,72

¹keine Trennung zwischen Heizen und BWW

hohe Steigerung; Windstrom kostenlos T€/m ²	moderate Steigerung; Windstrom Kostenlos T€/m ²	geringe Steigerung; Windstrom Kostenlos T€/m ²	hohe Steigerung; Windstrom 10,7 ct/kWh T€/m ²	moderate Steigerung; Windstrom 10,7 ct/kWh T€/m ²	geringe Steigerung; Windstrom 10,7 ct/kWh T€/m ²
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00
0,082	0,096	0,094	0,082	0,096	0,09
-0,025	0,002	0,002	-0,003	0,027	0,03
-0,003	0,016	0,013	0,025	0,048	0,05
-0,041	-0,016	-0,017	-0,013	0,015	0,02
-0,010	0,010	0,008	0,004	0,026	0,02
-0,040	-0,014	-0,014	-0,022	0,005	0,01
-0,040	-0,014	-0,013	-0,017	0,013	0,02

Konstruktion (Delta Referenz zu IST)	Wärme	Strom konventionell	Strom Starkwind	Konstruktion (Delta Referenz zu IST)	Wärme	Strom konventionell	Strom Starkwind
kg CO2-Äquiv./((m²*a)	kg CO2-Äquiv./((m²*a)	kg CO2-Äquiv./((m²*a)	kg CO2-Äquiv./((m²*a)	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]
0,00	25,49	1,00	0,0	0,0	99,7	3,4	0,0
1,41	0,00	3,73	0,0	4,6	0,0	12,5	0,0
1,57	0,00	2,25	0,1	4,8	0,0	7,6	0,5
1,57	0,00	4,12	0,2	4,8	0,0	13,8	0,6
1,82	0,00	2,95	0,2	5,6	0,0	9,9	0,6
1,57	0,00	3,88	0,1	4,8	0,0	13,1	0,3
1,42	0,00	2,55	0,1	4,3	0,0	8,6	0,4
1,57	0,00	2,47	0,2	4,8	0,0	8,3	0,5

Anhang 9 - Eingangsgrößen für die Sachbilanz

Tabelle 34:
Zusammenfassung der wichtigsten konstruktiven Eingangsgrößen für die Sachbilanz im Rahmen der Detailanalyse.

Konstruktives "Delta" zum Referenzfall für die Varianten der Windheizung	Einfamilienhaus						Büro				
	Neubau			Sanierung			Neubau			Sanierung	
	Ziegelbau (Z)	Betonbau (B)	Holzbau (H)	Ziegelbau (Z)	Betonbau (B)	Holzbau (H)	Ziegelbau (Z)	Betonbau (B)	Holzbau (H)	Ziegelbau (Z)	Betonbau (B)
Wärmedämmung (Delta-Summe über alle Bauteile) [cm]	63,3	65,5	64,9	41,1	42,7	50,6	52	54,5	66,5	27,7	28,8
Bauteilintegrierte Speicher											
Fußboden [m ²]	480			180			1.990				
Decke [m ²]	360			100			1.990				
Innenwand [m ²]	348			96			1.992				
Überdämmte Speicher											
Decke [m ²]	360			100			1.990				
Innenwand [m ²]	348			96			1.992				
Oberflächen-Speicher											
Fußboden [m ²]	480			180			1.990				
Decke [m ²]	360			100			1.990				
Innenwand [m ²]	348			96			1.992				
Öl-Brennwertkessel [kW]	-7,1			-4,4			-35,5			-40,4	
Radiatoren* [kg]	-935			-363			-3.841				
Abluftanlage [m³/h]	-591			-229			-5.894				
Zu- und Abluftanlage mit WRG [m³/h]	590			229			5.894				
Durchlauferhitzer [kW]	158	160	161	79	81	84	713	721	742	882	911
Wärmepumpe [kW]	7,8			4,9			39			45	
Windperioden-Speicher [l]	20.000			10.000			Nicht Bestandteil der Detailanalyse				

* Radiatoren werden z.T. in den Varianten der Windheizung eingesetzt und stellen in diesem Fall keinen "konstruktiven Minder- oder Mehraufwand" dar.

Referenz	Einfamilienhaus			Büro	
	Neubau	Sanierung		Neubau	Sanierung
Öl-Brennwertkessel [kW]	7,1	4,4		35,5	40,4
Radiatoren [kg]	935	363		3.841	
Abluftanlage [m³/h]	591	229		5.894	
Auslegungsspeicher** [l]	915	915		2.000	2.000

** Der Auslegungsspeicher wird z.T. auch in den Varianten der Windheizung eingesetzt und stellt in diesem Fall keinen "konstruktiven Minder- oder Mehraufwand" dar.

Tabelle 35:
Eingangsdaten für den Gebäudebetrieb (Detailanalyse) und die
Grundkonzepte für EFH Neubau.

	Strom Gesamt	Windstrom gesamt	Reststrom gesamt	Wärme (Öl)
	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]
Referenz EnEV 2014 (Öl- Brennwert, Radiatoren)	966		966	34.037
(01) Windperiodensp., Radiatoren	14.141	12.890	1.251	
(02) Windperiodensp., Radiatoren	13.993	12.752	1.241	
(03) Windperiodensp., Radiatoren	14.184	12.578	1.606	
(04) Windperiodensp., Fußbodenheizung	14.559	13.777	782	
(05) Windperiodensp., Fußbodenheizung	14.782	14.000	782	
(06) Windperiodensp., Fußbodenheizung	14.868	14.086	782	
(07) Windperiodensp., Bauteilaktiv.	15.849	15.067	782	
(08) Windperiodensp., Bauteilaktiv.	15.757	14.975	782	
(09) Windperiodensp., Bauteilaktiv. Innenwände	14.441	13.659	782	
(10) Windperiodensp., Bauteilaktiv. Innenwände	14.651	13.869	782	
(11) Winperiodensp., Aktiv. Deckenoberfläche	15.147	14.365	782	
(12) Winperiodensp., Aktiv. Deckenoberfläche	15.331	14.549	782	
(13) Winperiodensp., Aktiv. Deckenoberfläche	15.681	14.636	1.045	
(14) Winperiodensp., Aktiv. Innenwandoberfläche	14.887	14.105	782	
(15) Winperiodensp., Aktiv. Innenwandoberfläche	15.324	14.542	782	
(16) Winperiodensp., Aktiv. Innenwandoberfläche	15.106	14.305	801	
(17) Auslegungssp., Bauteilaktiv.	13.784	6.317	7467	
(18) Auslegungssp., Bauteilaktiv.	13.569	6.735	6.834	
(19) Auslegungssp., überdämmte Decke	15.059	8.919	6.140	
(20) Auslegungssp., überdämmte Decke	14.793	9.166	5.627	
(21) Wärmepumpe, Auslegungssp., Bauteilaktiv.	92.91	5.773	3.518	
(22) Wärmepumpe, Auslegungssp., Bauteilaktiv.	95.62	6.183	3.379	

Tabelle 36:

Eingangsdaten für den Gebäudebetrieb (Detailanalyse) und Variation des Konzepts (17) mit Auslegungsspeicher und Bauteilaktivierung für EFH Neubau.

	Strom gesamt	Windstrom gesamt	Reststrom gesamt	Wärme (Öl)
	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]
(17) Auslegungssp., Bauteilaktiv.	13.784	6.317	7.467	
(s1) Wärmerückgewinnung 80 %	14.364	6.302	8.062	
(s2) Erhöhte Luftdichtheit	12.869	6.170	6.699	
(s3) Minimale Luftdichtheit (EnEV)	15.783	6.425	9.358	
(s4) Verringerter Luftwechsel	13.448	6.263	7.185	
(s5) Erhöhter Luftwechsel	14.119	6.278	7.841	
(s6) Verbesserrter U-Wert	12.808	6.133	6.675	
(s7) Dickere BTA	13.971	7.152	6.819	
(s8) Dickere BTA, ohne Speicher	19.604	6.588	13.016	
(s9) Reduzierter Temp.-Korridor	12.619	3.218	9.401	
(s10) Innenwände aus Kalksandstein	13.737	6.438	7.299	

Tabelle 37:

Eingangsdaten für den Gebäudebetrieb (Detailanalyse) und Variation des Konzepts (19) mit Auslegungsspeicher und überdämmter Decke für EFH Neubau.

	Strom gesamt	Windstrom gesamt	Reststrom gesamt	Wärme (Öl)
	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]
(19) Auslegungssp., überdämmte Decke	15.059	8.919	6.140	
(s11) Wärmerückgewinnung 80 % (überdämmt)	15.670	9.011	6.659	
(s12) Erhöhte Luftdichtheit (überdämmt)	14.064	8.651	5.413	
(s13) Minimale Luftdichtheit (EnEV) (überdämmt)	17.130	8.912	8.218	
(s14) Verringerter Luftwechsel (überdämmt)	14.665	8.972	5.693	
(s15) Erhöhter Luftwechsel (überdämmt)	15.323	9.105	6.218	
(s16) Verbesserrter U-Wert (überdämmt)	14.103	8.619	5.484	
(s17) Dickere BTA (überdämmt)	15.306	9.861	5.445	
(s18) Dickere BTA, ohne Speicher (überdämmt)	21.220	9.592	11.628	
(s19) Reduzierter Temp.-Korridor (überdämmt)	13.709	5.800	7.909	

Tabelle 38:
Eingangsdaten für den Gebäudebetrieb (Detailanalyse) und Seitenstudie im
Passivhausstandard für EFH Neubau.

	Strom gesamt	Windstrom gesamt	Reststrom gesamt	Wärme (Öl)
	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]
Passivhaus Referenz	3.612		3.612	
Passivhaus, Windheizung	7.424	5.246	2.178	
Passivhaus, EnEV Luftwechsel	10.532	6.548	3.984	
Passivhaus, KfW40 Außenbauteile	9.346	6.490	2.856	
Passivhaus, langer Windzyklus	7.050	3.290	3.760	
Passivhaus, ohne aktiv. Bodenplatte	6.559	4.089	2.470	
Passivhaus, Aktivierung in Deckenmitte	7.655	5.491	2.164	

Tabelle 39:
Eingangsdaten für den Gebäudebetrieb (Detailanalyse) und die
Grundkonzepte für EFH Sanierung.

	Strom gesamt	Windstrom gesamt	Reststrom gesamt	Wärme (Öl)
	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]
Referenz	399		399	15.321
WB_SanZ_dlh_WIs_Rad	8.847	7.331	1.516	
WB_SanB_dlh_WIs_Rad	8.874	7.333	1.542	
WB_SanH_dlh_WIs_Rad	9.102	7.344	1.758	
WB_SanZ_dlh_WIs_fbh	8.871	8.327	545	
WB_SanB_dlh_WIs_fbh	8.894	8.353	541	
WB_SanH_dlh_WIs_fbh	9.044	8.347	698	
WB_SanZ_dlh_WIs_OFw	8.761	8.208	553	
WB_SanB_dlh_WIs_OFw	9.076	8.496	580	
WB_SanH_dlh_WIs_OFw	8.937	8.015	922	
WB_SanZ_dlh_WIs_OFd	9.612	8.799	813	
WB_SanB_dlh_WIs_OFd	9.622	8.802	820	
WB_SanH_dlh_WIs_OFd	9.746	8.768	977	
WB_SanZ_dlh_1xS_OFd_OFw	8.076	2.870	5.206	
WB_SanB_dlh_1xS_OFd_OFw	8.105	3.175	4.930	
WB_SanB_dlh_1xS_ÜDw	8.045	3.434	4.612	
WB_SanZ_dlh_1xS_ÜDd	8.105	3.509	4.596	
WB_SanB_dlh_1xS_ÜDd	8.126	3.607	4.519	
WB_SanZ_dlh_1xS_ÜDd_ÜDw	8.141	3.722	4.419	
WB_SanB_dlh_1xS_ÜDd_ÜDw	8.482	4.598	3.884	
WB_SanZ_WPa_WIs_OFd	8.719	7.709	1.010	
WB_SanB_WPa_WIs_OFd	8.741	7.723	1.018	
WB_SanH_WPa_WIs_OFd	8.663	7.516	1.147	
WB_SanZ_WPa_WIs_OFw	8.752	7.742	1.010	
WB_SanB_WPa_WIs_OFw	8.960	7.983	977	
WB_SanH_WPa_WIs_OFw	8.541	7.348	1.193	
WB_SanZ_WPa_1xS_ÜDd	5.676	3.389	2.287	
WB_SanB_WPa_1xS_ÜDd	5.740	3.497	2.243	

Tabelle 40:
Eingangsdaten für den Gebäudebetrieb (Detailanalyse) und die
Grundkonzepte für Büro Neubau und Sanierung.

	Strom gesamt	Windstrom gesamt	Reststrom gesamt	Wärme (Öl)
	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]
Sanierung				
Referenz RB_San	9.558	282	9.276	158.298
RB_SanB_BTd (OFd)	65.785	17.367	48.418	
RB_SanZ_BTd (OFd)	65.636	15.208	50.428	
RB_SanB_ÜDd	70.109	26.458	43.651	
RB_SanZ_ÜDd	70.971	24.955	46.016	
Neubau				
Referenz RB_Neu	9.472	279	9.193	119.571
RB_NeuB_BTd	56.711	18.742	37.969	
RB_NeuZ_BTd	57.877	16.742	41.135	
RB_NeuB_ÜDd	61.680	28.107	33.573	
RB_NeuZ_ÜDd	63.174	25.811	37.363	

Anhang 10 - Musterbauplan Windheizungsgebäude

Neubau	Wasserbasierter Speicher (Standarddimensionierung) + Restwärme: elektrischer Durchlauferhitzer	Wasserbasierter Speicher (Auslegung Windperiode) + Restwärme: elektrischer Durchlauferhitzer	Wasserbasierter Speicher (Standarddimensionierung) + Restwärme: Außenluft-Wärmepumpe	Wasserbasierter Speicher (Auslegung Windperiode) + Restwärme: Außenluft-Wärmepumpe	PCM-Speicher	Elektrische Nachtspeicherheizung	Hochtemperatursteinspeicher (zentral, Auslegung Windperiode) - in Entwicklung
Radiator	---	++	--	+	---	---	+ - +++ ^{*1}
Fußbodenheizung	--	+++	-	++	---	---	+ - +++ ^{*1}
BTA-Betondecke	+	+++	+++	++	---	---	+ - +++ ^{*1}
BTA-Betondecke (überdämmt)	--	---	--	---	---	---	---
Oberflächentemperierung Betondecke	--	++	++	+	---	---	+ - +++ ^{*1}
Oberflächentemperierung Holzdecke	---	+++	-	++	---	---	+ - +++ ^{*1}
BTA Innenwände (Beton)	--	++	++	+	---	---	+ - +++ ^{*1}
BTA Innenwände (Ziegel / KS)	--	++	++	+	---	---	+ - +++ ^{*1}
BTA Innenwände (Beton; überdämmt)	---	---	---	---	---	---	---
BTA Innenwände (Ziegel / KS; überdämmt)	---	---	---	---	---	---	---
Oberflächentemperierung Innenwände (Leichtbau)	---	++	--	+	---	---	+ - +++ ^{*1}
BTA Betondecke und Innenwände (Beton / Ziegel / KS)	-	-	-	--	---	---	-
BTA Betondecke und Innenwände (Beton / Ziegel / KS; überdämmt)	--	---	---	---	---	---	---
Oberflächenaktivierung Decken und Innenwände (alle Bauweisen)	--	-	--	--	---	---	-
Hochtemperatursteinspeicher (zentral, Auslegung Windperiode) - in Entwicklung							+ - +++ ^{*2}

^{*1}: Hydraulische Einbindung

^{*2}: Zuluftintegriert

Sanierung	Wasserbasierter Speicher (Standarddimensionierung) + Restwärme: elektrischer Durchlauferhitzer	Wasserbasierter Speicher (Auslegung Windperiode) + Restwärme: elektrischer Durchlauferhitzer	Wasserbasierter Speicher (Standarddimensionierung) + Restwärme: Außenluft-Wärmepumpe	Wasserbasierter Speicher (Auslegung Windperiode) + Restwärme: Außenluft-Wärmepumpe	PCM-Speicher	Elektrische Nachtspeicherheizung	Hochtemperatursteinspeicher (zentral, Auslegung Windperiode) - in Entwicklung
Radiator	---	++	--	+	---	---	+ - +++ ^{*1}
Fußbodenheizung	--	+++	-	++	---	---	+ - +++ ^{*1}
Oberflächentemperierung-Betondecke (überdämmt)	--	---	--	---	---	---	---
Oberflächentemperierung Betondecke	--	++	++	+	---	---	+ - +++ ^{*1}
Oberflächentemperierung Holzdecke	---	+++	--	++	---	---	+ - +++ ^{*1}
Oberflächentemperierung-Innenwände (Beton; überdämmt)	---	---	---	---	---	---	---
Oberflächentemperierung Innenwände (Ziegel/KS;überdämmt)	---	---	---	---	---	---	---
Oberflächentemperierung Innenwände (Leichtbau)	---	++	--	+	---	---	+ - +++ ^{*1}
Oberflächentemperierung Decke und Innenwände (Beton / Ziegel / KS; überdämmt)	--	---	---	---	---	---	---
Oberflächenaktivierung Decken und Innenwände (alle Bauweisen)	--	-	--	--	---	---	-
Hochtemperatursteinspeicher (zentral, Auslegung Windperiode) - in Entwicklung							+ - +++ ^{*2}

^{*1}: Hydraulische Einbindung

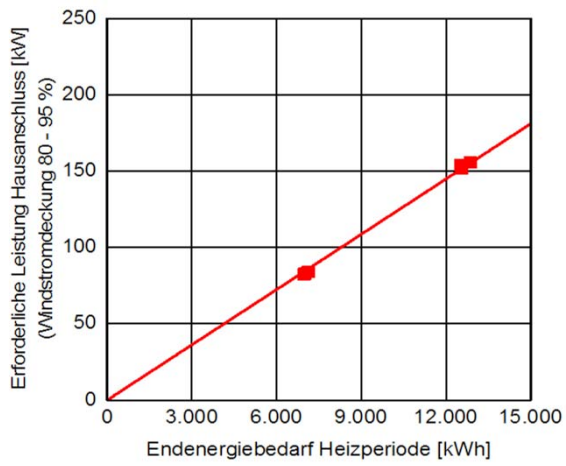
^{*2}: Zuluftintegriert

Größe	Wert	Einheit
Endenergiebedarf während Heizperiode (Heizwärme und Trinkwarmwasser)	15.000	[kWh]
Erforderliche Leistung Hausanschluss	181	[kW]
Erforderliche Größe wasserbasierter Windperiodenspeicher	24	[m ³]
Bauteilspeicher		
thermisch aktivierbare Masse	460	[to]
Hochtemperatursteinspeicher		
- erforderlicher Kerngewicht	10.026	[kg]
- Erforderliches Kervolumen*	3	[m ³]
*: Annahme Anteil Lüftungskanäle	20%	[%]

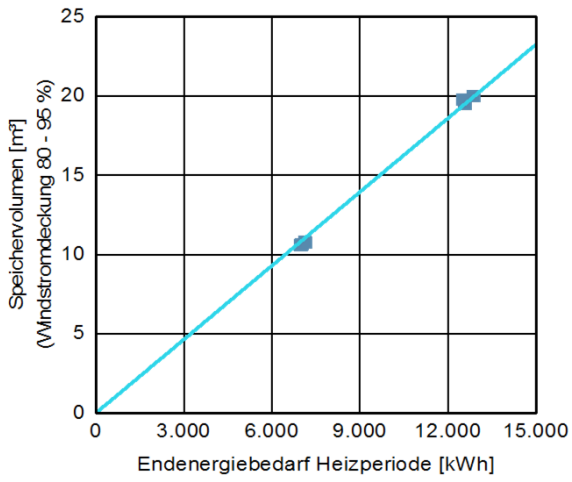
Eingabewerte

Auslegungsempfehlung (Rechenwert)

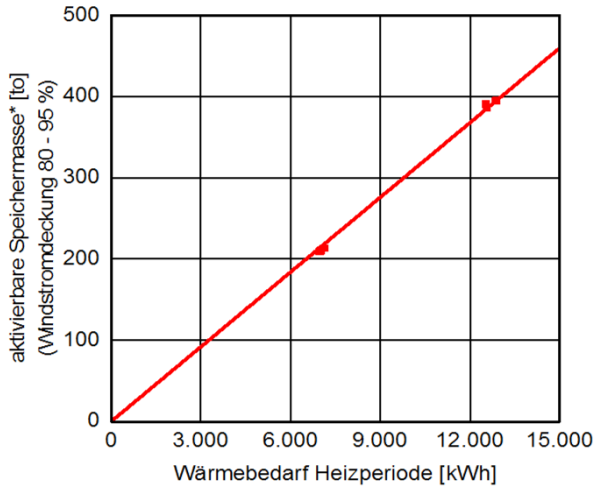
Elektrische Anschlussleistung



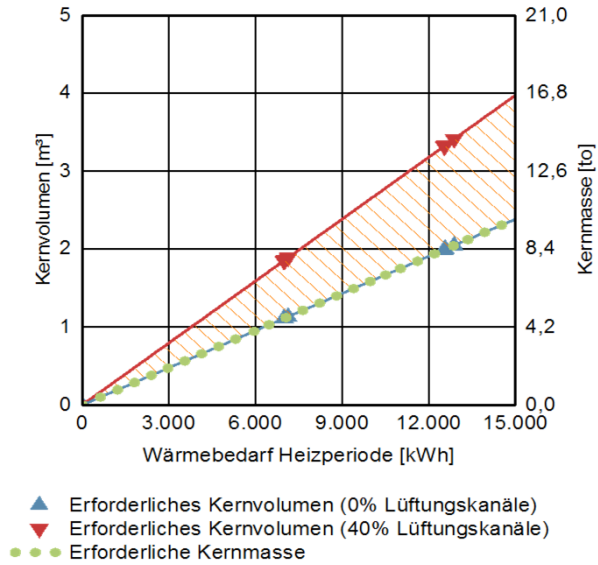
Speicherdimensionierung (Windperiodenspeicher, wasserbasiert)



Notwendige aktivierbare Speichermasse in Abhängigkeit des Heizenergiebedarfs



Speicherdimensionierung (Hochtemperatur-Steinspeicher)



- ▲ Erforderliches Kernvolumen (0% Lüftungskanäle)
- ▼ Erforderliches Kernvolumen (40% Lüftungskanäle)
- Erforderliche Kernmasse