

The image shows a close-up of a grey concrete wall with a rough, pitted texture. In the upper left quadrant, the words 'ENERGIE', 'SPEICHER', and 'BETON' are displayed in a 3D, blocky font. 'ENERGIE' and 'SPEICHER' are rendered in a vibrant red color, while 'BETON' is rendered in a metallic grey color that matches the background. The text has a slight shadow, giving it a three-dimensional appearance as if it's attached to the wall.

ENERGIE SPEICHER BETON

**Konditionierung von massiven Einfamilienhäusern
mit Wärmepumpe unter Nutzung der
Leistungsspitzen im öffentlichen Stromnetz**

Handler Simon

Impressum

(Namensnennung ohne Titel)

Medieninhaber & Herausgeber: Zement + Beton Handels- u. Werbeges.m.b.H // Reisnerstraße 53,
1030 Wien // T: +43 1 714 66 85 - 0 // www.zement.at

Redaktion: Felix Friembichler, VÖZ // Frank Huber, Zement + Beton

Autor: Simon Handler, hbo-Service GmbH

Veröffentlichung: www.zement.at

März 2016

Die Informationen erfolgen nach bestem Wissen und Gewissen, jedoch ohne Gewähr. Eine Haftung ist ausgeschlossen.

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird bei geschlechtsspezifischen Begriffen die maskuline Form verwendet und auf gender-gerechte Formulierungen verzichtet. Dies soll jedoch keinesfalls eine Geschlechterdiskriminierung oder eine Verletzung des Gleichheitsgrundsatzes zum Ausdruck bringen.

ENDBERICHT

Konditionierung von massiven Einfamilienhäusern mit Wärmepumpe unter Nutzung der Leistungsspitzen im öffentlichen Stromnetz

**Untersuchung eines exemplarischen Massivhauses der Aichinger Hoch- und
Tiefbau GmbH**

ausgearbeitet von

Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Dr.techn. Simon Handler

im Auftrag der

Zement+Beton Handels- und Werbeges.m.b.H.

Katzelsdorf, September 2015

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	2
2	Randbedingungen	4
2.1	Windstromfreigabesignal und Außenklima.....	4
2.2	Gebäudestandort.....	8
2.3	Bauphysik.....	8
2.4	Haustechnik.....	8
3	Simulationsbasierte Studie.....	10
3.1	Modellaufbau	10
3.2	Grundkonzept der Regelstrategie	11
3.3	Simulationsergebnisse	11
4	Zusammenfassung & Fazit.....	26
5	Literaturverzeichnis	28
6	Anhang: Auswertungen v. Jahrestemperaturverläufen	30

1 Einleitung

Die Europäische Union fordert in ihrer Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD) [EPB10] aus dem Jahr 2010 bis zum Jahr 2020 einerseits eine Reduktion des Energiebedarfs von Gebäuden, andererseits soll die benötigte Energie zu einem möglichst hohen Anteil über erneuerbare Energieträger, welche vor Ort oder in der Nähe des Gebäudes erzeugt bzw. nutzbar gemacht werden, gedeckt werden.

Das in dieser Arbeit untersuchte Gebäudekonzept verfügt einerseits über eine äußerst hohe Qualität der thermischen Gebäudehülle, andererseits wird ein hoher Anteil des Wärmebedarfs durch die Nutzung der Windenergie abgedeckt. Während die EPBD von einer Stromerzeugung vor Ort oder in der Nähe des Gebäudes ausgeht, erfolgt die Energieversorgung des untersuchten Gebäudes über Windkraftanlagen, welche lokal als auch funktional unabhängig vom Gebäude errichtet werden.

Da Massivbauten eine hohe thermische Speicherkapazität haben, eignen sie sich hervorragend als Energiespeicher. Dieser Speicher kann eingesetzt werden, um Windenergie zwischenspeichern. Wird der thermische Energiespeicher mit Hilfe von Wärmepumpen zu jenen Zeiten beladen zu denen Leistungsspitzen durch Windkraft im öffentlichen Netz zur Verfügung stehen, kann die Gebäudemasse als Energiespeicher für das öffentliche Stromnetz fungieren. Dies stellt unter anderem auch für Energieversorgungsunternehmen einen erheblichen Vorteil dar. Zu Zeiten von Netzspitzen wäre dadurch beispielsweise ein kostengünstiger Energiebezug für die Bewohner denkbar, wodurch die Attraktivität des Konzepts steigen würde.

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden die Randbedingungen für eine sinnvolle Nutzung der Speichermasse von Gebäuden in Kombination mit Wärmepumpen zur Dämpfung von Leistungsspitzen im öffentlichen Stromnetz aufgrund der diskontinuierlichen Stromerzeugung durch Windkraft untersucht. Das Potenzial zur Speicherung von Energie aus dem Stromnetz wird exemplarisch für ein geplantes Haus der Aichinger Hoch- u Tiefbau GmbH analysiert.

Die Aichinger Hoch- und Tiefbau GmbH ist ein Baumeisterbetrieb mit Sitz in Göllersdorf, der sich hauptsächlich mit der Errichtung von Einfamilienhäusern in massiver Bauweise beschäftigt. Dem Kunden stehen verschiedene Typen-Massivhäuser zur Auswahl, welche im Bereich der thermischen Gebäudehülle bereits eine hohe Effizienz erreichen. In Zusammenarbeit mit der Fa. FIN – Future is Now, Kuster Energielösungen GmbH wurde ein Konzept erarbeitet, welches die Speichermasse der massiven Bauteile nutzt und dadurch optimale Voraussetzungen für den effizienten Einsatz einer Wärmepumpe schafft. Das der Untersuchung zugrundeliegende Typen-Massivhaus zeichnet sich durch eine, direkt an ein bauteilaktiviertes Gebäude mit hocheffizienter thermischer Hülle angeschlossene, Wärmepumpe aus. Der Vorteil dieser Ausführung liegt einerseits in den tiefen Rücklauftemperaturen im Heizfall bzw. den hohen Rücklauftemperaturen im Kühlfall und der damit einhergehenden hohen Leistungszahl der Wärmepumpe. Andererseits wird die Speichermasse der Betonbauteile genutzt, um das Takten der Wärmepumpe zu reduzieren. Aufbauend auf diesem Konzept wird in dieser Studie das Potenzial solcher Gebäude zur Speicherung von Umweltenergien in Form von Windenergie untersucht.

2 Randbedingungen

Nachfolgend werden die für die durchgeführten Simulationen herangezogenen Randbedingungen erläutert.

2.1 Windstromfreigabesignal und Außenklima

Stromerzeugung aus alternativen Energiequellen kann einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion der weltweiten CO₂-Emissionen darstellen. Aus diesem Grund wird die Leistung der Sonnen- oder Windkraftanlagen in Österreich stetig ausgebaut. Während die Stromproduktion über z.B. fossile Brennstoffe relativ gut an den Bedarf anpassbar ist, kann Sonnen- oder Windstrom nur zu jenen Zeiten erzeugt werden zu denen die entsprechende Energiequelle nutzbar ist.

Aufgrund des schwankenden Energiedargebots ergeben sich Erzeugungsspitzen und -engpässe. Die Schwankung zwischen Strombedarf und Stromerzeugung spiegelt sich auch in den Strompreisen wider. Zu Zeiten hoher Stromproduktion aus erneuerbaren Energien sinkt der Strompreis an der Börse. Dies resultiert in weiterer Folge darin, dass einzelne Windräder vom Netz getrennt werden und die Stromproduktion aus erneuerbaren Energien somit reduziert wird.

Die Speicherung von elektrischer Energie ist in den benötigten Größenordnungen derzeit technisch und wirtschaftlich nicht sinnvoll umsetzbar. Zum Ausgleich der schwankenden Stromproduktion werden in der Regel Pumpspeicherkraftwerke herangezogen. Hier wird der erzeugte Strom in potentielle Energie umgewandelt, welche zu einem späteren Zeitpunkt wieder in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Neben dem Flächenbedarf solcher Kraftwerke und den mit der Errichtung verbundenen Kosten, ist zu berücksichtigen, dass der Wirkungsgrad solcher Speichersysteme nur etwa 80% beträgt.

Eine Alternative zu Pumpspeicherkraftwerken stellt die Umwandlung von elektrischer Energie in thermische Energie dar. Dies kann einerseits auf Netzebene (z.B. in Fernwärmeanlagen) erfolgen oder dezentral bei den einzelnen Verbrauchern. Während sich die Speicherung von elektrischer Energie technisch anspruchsvoll gestaltet, bieten sich zur Speicherung von thermischer Energie zahlreiche und mit geringem Aufwand umsetzbare Möglichkeiten an. Insbesondere in Kombination mit Wärmepumpen stellt dies eine äußerst effiziente Möglichkeit zur Nutzung von überschüssigem Windstrom dar.

Um überschüssigen Windstrom innerhalb der Gebäudestruktur speichern zu können, muss seitens des Stromerzeugers ein Freigabesignal an den Endkunden übermittelt werden. Nach erfolgter Freigabe kann mittels Wärmepumpe elektrische Energie in thermische Energie verwandelt werden und innerhalb des Gebäudes gespeichert werden. Der Zeitpunkt der Freigabe ist abhängig von der momentanen Stromproduktion und damit in weiterer Folge vom am Markt erzielbaren Strompreis. Die Freigabezeiten und der dabei angesetzte Bezugstarif werden vom Energieversorger festgelegt.

Für die vorliegende Studie wird auf Messdaten der WEB Windenergie AG am Windpark Neuhof zurückgegriffen. Die Produktionsdaten des Windparks Neuhof wurden im Vorfeld der Arbeit für mehrere Jahre analysiert. Seitens des Windparkbetreibers wurde das Freigabesignal für die Studie

festgelegt. Produziert der Windpark mehr als 30% seiner Nennleistung erfolgt die Freigabe. Der Zusammenhang zwischen der im Windpark erzeugten elektrischen Leistung und verschiedenen Freigabesignalen ist in der nachfolgenden Abbildung für den Zeitraum von April 2013 bis März 2014 dargestellt. Der in den untersuchten Jahren kritischste Zeitraum lag im Dezember 2013. Bei einer Freigabe ab 30% der Nennleistung erfolgt innerhalb von 11 Tagen (abgesehen von einer einzigen Stunde) keine Freigabe.

In der durchgeführten Studie wird das analoge Freigabesignal als Randbedingung für die Simulation verwendet. Die übrigen klimatischen Randbedingungen (Außenlufttemperatur, Direkt- und Diffusstrahlung auf die horizontale Fläche) wurden von der TU Wien zur Verfügung gestellt und stammen aus der Wetterstation auf den Asperngründen in Wien. In der Studie wird somit das Systemverhalten des geplanten Gebäudes während des Zeitraums von April 2013 bis März 2014 untersucht, wobei als Gebäudestandort Wien herangezogen wird. Die Außentemperatur lag hier während der windkritischen Phase im Dezember 2013 im Schnitt bei 1,2 °C und die durchschnittliche Tagessumme der Globalstrahlung betrug ca. 450 Wh/m²d.

In Abbildung 2 ist der gesamte Verlauf des Freigabesignals für die Simulation dargestellt.

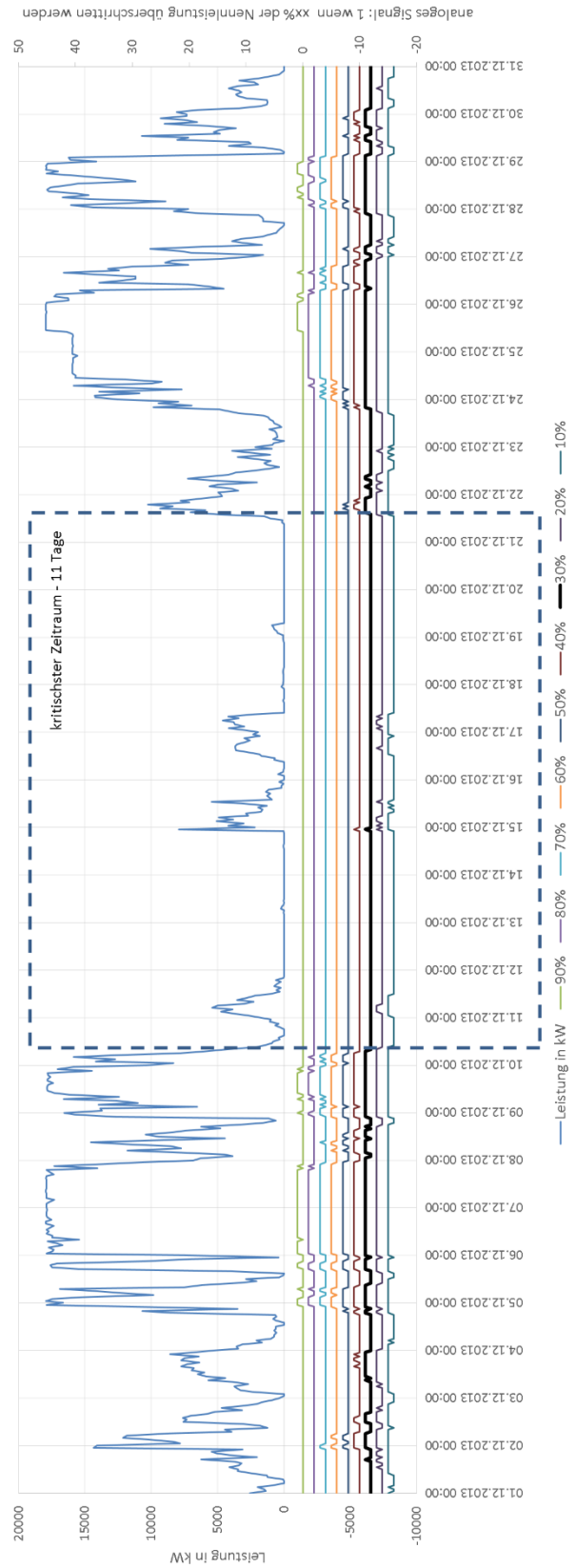


Abbildung 1: Leistungsverlauf und resultierendes analoges Freigabesignal - Windenergie (Datenquelle: [WEB15])

Zeitraum links: April 2013 – März 2014
 Zeitraum rechts: Dezember 2013 (kritischer Zeitraum – siehe Markierung)

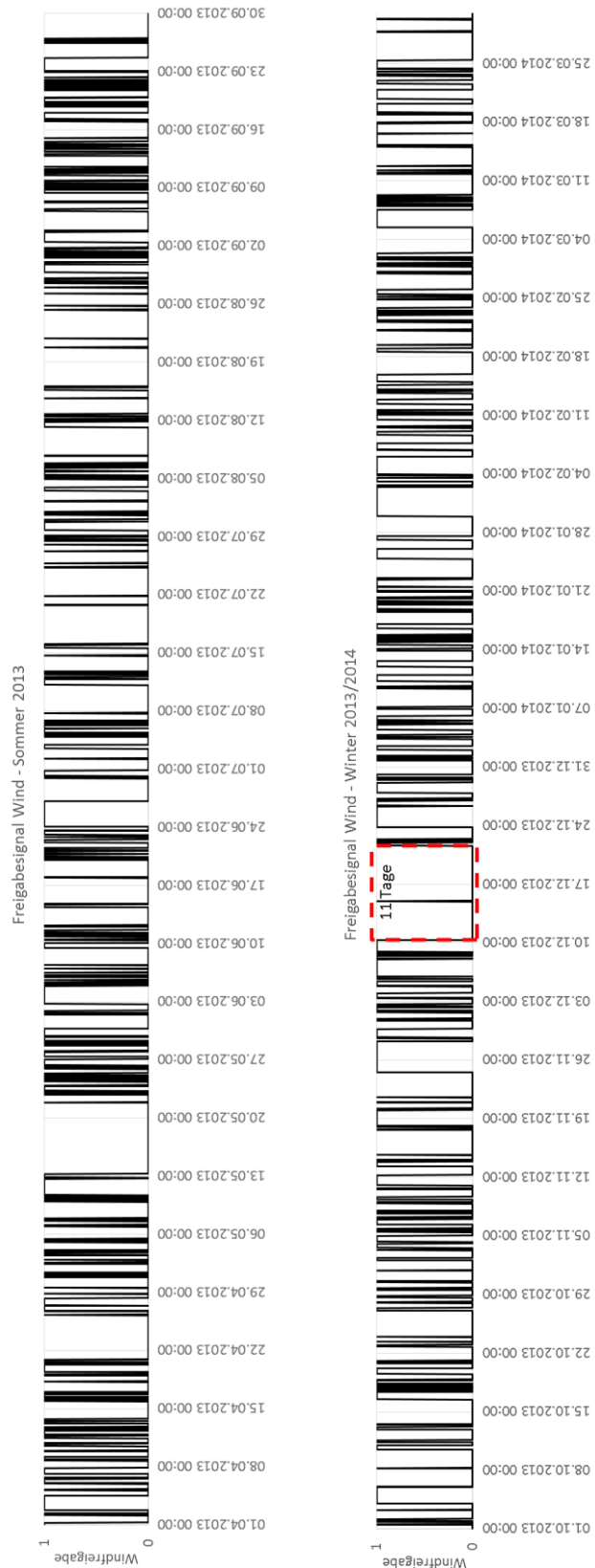


Abbildung 2: analoges Freigabesignal - Windenergie (Datenquelle: [WEB15])
 Zeitraum links: April 2013 – September 2013
 Zeitraum rechts: Oktober 2013 – März 2014

2.2 Gebäudestandort

Das der Studie zugrunde liegende Gebäude wird in Göllersdorf (NÖ) auf einer Seehöhe von ca. 200 m errichtet. Da keine lokale Energieerzeugung vorgesehen ist, spielt der Standort keine wesentliche Rolle für die Entwicklung des Konzepts. Aufgrund der Wahl der berücksichtigten Klimadaten (siehe oben) wird in den Simulationen vom Standort Wien ausgegangen.

2.3 Bauphysik

Grundlage für die Studie stellte die Einreichplanung der Fa. Aichinger Hoch- und Tiefbau GmbH (21.5.2015) sowie der zugehörige Energieausweis (9.6.2015) dar.

Das Gebäude zeichnet sich durch eine einfach gehaltene Geometrie mit relativ geringem Fensterflächenanteil aus. Die thermische Gebäudehülle ist als hochwertig zu bezeichnen. Die Außenwände werden mit einer dreischaligen Konstruktion ausgeführt, welche einen U-Wert von 0,10 W/m²K erreicht. Die oberste Geschoßdecke erreicht einen U-Wert von 0,08 W/m²K und der erdanliegende Fußboden mit außenliegender XPS-Dämmebene hat einen U-Wert von 0,09 W/m²K. Die Fenster erreichen einen U_w-Wert von knapp 0,7 W/m²K. Es wird eine mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ausgeführt. Dies wird in den Berechnungen mit einem Wärmebereitstellungsgrad von 80% angesetzt. Die Energieausweisberechnung nach OIB Richtlinie 6 (2011) [NOV15] ergibt einen HWB von ca. 1960 kWh/a und einen WWWB von 2230 kWh/a sowie einen HEB von ca. 1910 kWh/a.

Schon die Betrachtung der Berechnungsergebnisse zeigt, dass der Energiebedarf für Raumheizung deutlich geringer ist, als der Energiebedarf für die Warmwasserbereitung.

2.4 Haustechnik

Das Gebäude verfügt über einen Anschluss an das öffentliche Stromnetz. Es sind keine weiteren Anschlüsse zur Energieversorgung geplant. Die Wärmebereitstellung erfolgt über eine Sole-Wasser-Wärmepumpe. Der benötigte Erdkollektor wird in einer Tiefe von 1,2 m verlegt und hat eine Länge von 2x100 m bei einem Verlegeabstand von 0,6 m. Die resultierende Kollektorfläche beträgt somit 120 m². Die Nennwärmeleistung der Wärmepumpe wird mit 6 kW gewählt und damit bewusst überdimensioniert, um in kurzen Windfreigabezeiten möglichst viel Energie im Gebäude speichern zu können. Die Wärmepumpe wird zur Warmwasserbereitung und zur Raumheizung herangezogen. Ein wasserbasierter Wärmespeicher ist für den Bereich der Raumheizung nicht vorgesehen. Die Wärmepumpe ist direkt an die aktivierten Betonbauteile angeschlossen. Als Wärmespeicher für die Warmwasserbereitung wird ein Pufferspeicher herangezogen. Über eine Frischwasserstation wird das benötigte Warmwasser im Durchlaufprinzip erwärmt. Das Pufferspeichervolumen wird mit 1000 l angesetzt. Die Aktivierung der Decke zwischen EG und OG erfolgt über drei Heizkreise, welche auf dem Fertigteil einer Elementdecke verlegt werden. An der obersten Geschoßdecke kommen 4 Heizkreise zur Ausführung. Der Verlegeabstand beträgt 25 cm. Auch in der Bodenplatte des Gebäudes werden Heizkreise vorgesehen. Die entsprechenden Heizkreise werden allerdings im

Betrieb deaktiviert und stehen nur als Reserve zur Verfügung (Kundenwunsch). Um im Badezimmer höhere Temperaturen als im übrigen Gebäude erreichen zu können, wird hier ein zusätzlicher Fußbodenheizkreis im Estrich verlegt. In den durchgeführten Simulationen wird weder die Fußbodenheizung im Badezimmer noch die Aktivierung der Bodenplatte berücksichtigt.

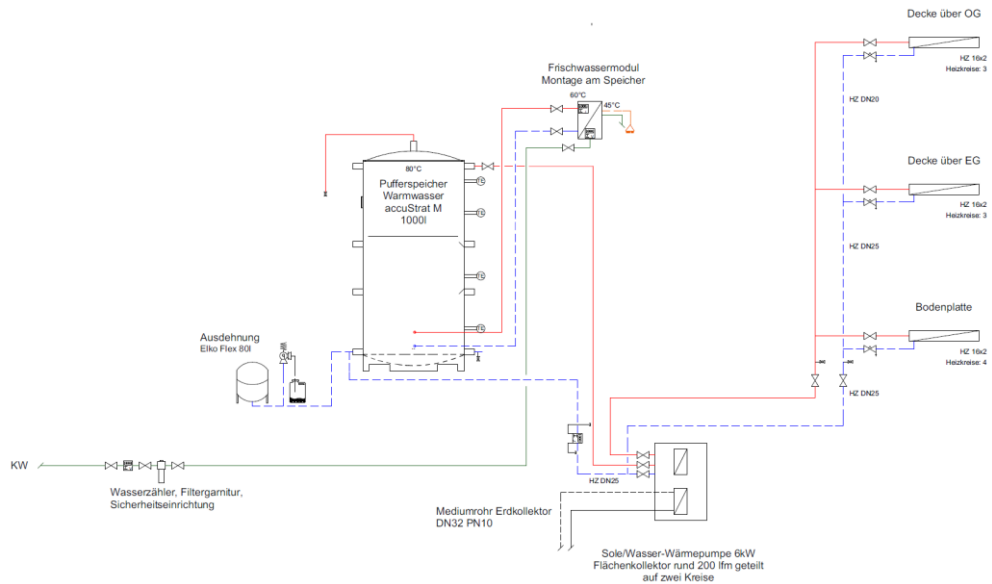


Abbildung 3: Hydraulik-Schema der Fa. FIN - Future Is Now, Kuster Energielösungen GmbH - Vorabzug (Quelle: [FIN15])

3 Simulationsbasierte Studie

3.1 Modellaufbau

Basis des Anlagen- und Gebäudesimulationsprogramms stellt das für den Nachweis der Vermeidung sommerlicher Überwärmung im Rahmen der ÖNORM B 8110-3 [ONO12a] entwickelte Raummodell dar.

Die Weiterentwicklung des Simulationsmodells erfolgte im Rahmen des vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technik geförderten und von der Vereinigung Österreichischer Zementindustrie unterstützten Projekts „Thermische Bauteilaktivierung – Entwicklung eines Rechenkerns“ [FR113] am Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz der Technischen Universität Wien. Das Simulationsmodell ist in [HAN14] ausführlich dokumentiert. Für die in dieser Studie durchgeführten Simulationen wird ein Wärmepumpenmodell herangezogen das auf Basis des Gütegrads der Wärmepumpe sowie den in jedem Simulationszeitschritt zulaufenden quellen- und senkenseitigen Eintrittstemperaturen die Austrittstemperaturen berechnet. Der Gütegrad kann aus den Wärmepumpen-Datenblättern an verschiedenen Prüfpunkten ermittelt werden. Das Modell greift in weiterer Folge auf eine Ausgleichskurve zu, aus welcher der Gütegrad in Abhängigkeit der Differenz zwischen Senken- und Quellentemperatur ermittelt wird. Die Gütegrad-Ausgleichskurve der in den Simulationen berücksichtigten Wärmepumpe ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

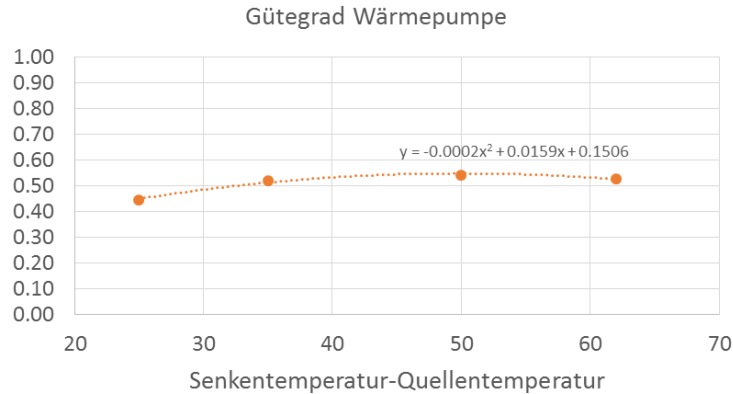


Abbildung 4: Aus Prüfprotokoll ermittelte Gütegrad-Ausgleichskurve

Die Wärmequellentemperatur wird in den Simulationen über die Außenlufttemperatur angenähert. Da bei dem untersuchten Gebäudekonzept allerdings ein Erdkollektor zum Einsatz kommt, wird die Temperatur der Wärmequelle mit halber Außenlufttemperatur angenähert. Da primär nicht der absolute Energiebedarf unterschiedlicher Varianten ermittelt werden soll, sondern ein Vergleich zwischen den verschiedenen Ausführungen angestrebt wird, stellt dies eine zulässige Näherung dar.

3.2 Grundkonzept der Regelstrategie

Um Windenergie optimal für Heizungszwecke nutzen zu können, muss zu jenen Zeiten in denen eine Windfreigabe vorliegt, das Temperaturniveau des Gebäudes angehoben werden. Es wird damit möglich die mittels Wärmepumpe aus Windstrom erzeugte Wärme aktiv innerhalb des Gebäudes zu speichern. Die gespeicherte Energie wird dann, sobald die Temperatur im Raum unter die Temperatur der umschließenden Oberflächen abfällt, an die Raumluft abgegeben. Im optimalen Fall wird die Untergrenze der Temperatur in einer Phase ohne Windfreigabe nicht unterschritten und es muss keine zusätzliche Energie für die Konditionierung der Räume eingesetzt werden. Sollte die Temperatur unter den Grenzwert fallen, hält die Wärmepumpe das Gebäude in üblicher Betriebsweise auf der gewünschten Temperatur. Das Grundprinzip der Regelstrategien ist in Abbildung 5 dargestellt.

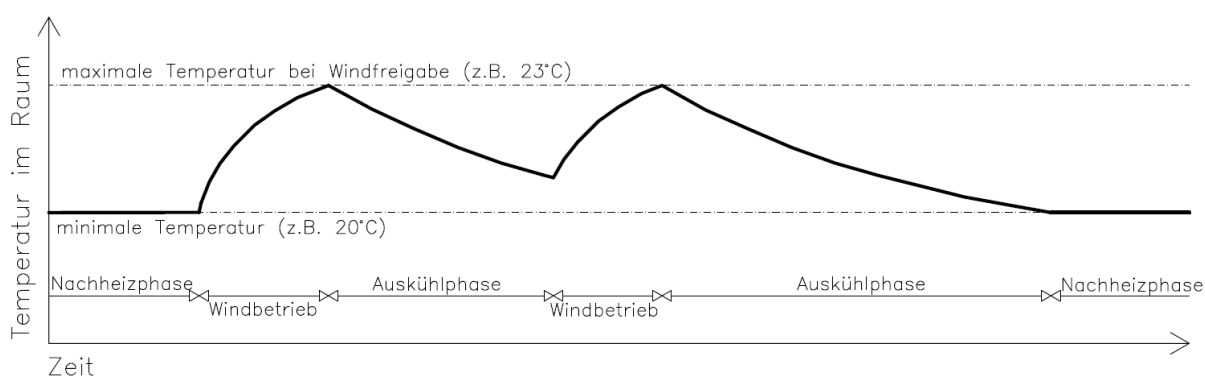


Abbildung 5: Grundprinzip der Regelstrategie zur Speicherung von thermischer Energie aus Windkraft innerhalb der Gebäudestruktur

Auf Basis des beschriebenen Grundprinzips der Regelstrategien werden in dieser Studie mehrere Regelkonzepte untersucht.

3.3 Simulationsergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der durchgeführten Simulation dokumentiert. Während an späterer Stelle die Ergebnisse von Ganzjahressimulationen analysiert werden, wird im Nachfolgenden versucht, das abstrakte dynamische Verhalten von Gebäuden durch die Wahl von vereinfachten Außenklimarandbedingungen greifbarer zu machen.

3.3.1 Simulation unter synthetischen Randbedingungen

Um das dynamische Verhalten eines Gebäudes besser beurteilen zu können, ist es hilfreich Simulationen unter stark vereinfachten Randbedingungen durchzuführen. Im Hinblick auf die Überbrückung windfreier Perioden im Heizfall, soll das Auskühlverhalten des Gebäude (siehe auch Abbildung 5) untersucht werden. Hierfür wird eine konstante Außentemperatur von 0°C und eine

Globalstrahlungsintensität von 0 W/m² in den Simulationen angesetzt. Ausgehend von einer operativen Temperatur von 23°C (Solltemperatur bei Windfreigabe) wird ab Stunde 100 der Auskühlvorgang des Gebäudes berechnet (siehe Abbildung 6 bis Abbildung 11). Die Zeit bis zum Erreichen der Solltemperatur ohne Windfreigabe (gewählt mit 20°C) ist wesentlich für das untersuchte Gebäudekonzept. Ab Stunde 400 erfolgt eine erneute Windfreigabe und das Gebäude wird wieder auf die Ausgangstemperatur von 23°C aufgeheizt. Die für das Aufheizverhalten wesentliche thermische Nennleistung der Wärmepumpe wird für die Simulationen unter synthetischen Randbedingungen mit ca. 3 kW angenommen. Es wird somit eine knapp dimensionierte Kleinstwärmepumpe und nicht die für die übrigen Simulationen herangezogene, bewusst überdimensionierte 6 kW Wärmepumpe, berücksichtigt.

Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen das Auskühl- und das Taktverhalten der Ausgangsvariante unter den oben beschriebenen Randbedingungen. In den nachfolgenden Darstellungen wird jeweils entweder die Dicke der Betonbauteile oder die Solltemperatur bei Windfreigabe variiert, um den Einfluss der einzelnen Größen auf das Auskühlverhalten feststellen zu können.



Abbildung 6: Darstellung des Auskühlverhaltens und des Aufheizverhaltens unter synthetischen Randbedingungen ohne innere Lasten und rückgewinnbare Anlagenverluste sowie des Taktverhaltens der Wärmepumpe unter diesen Bedingungen (TRL=Bauteil-Rücklauftemperatur; TVL=Bauteil-Vorlauftemperatur; Top=operative Temperatur)

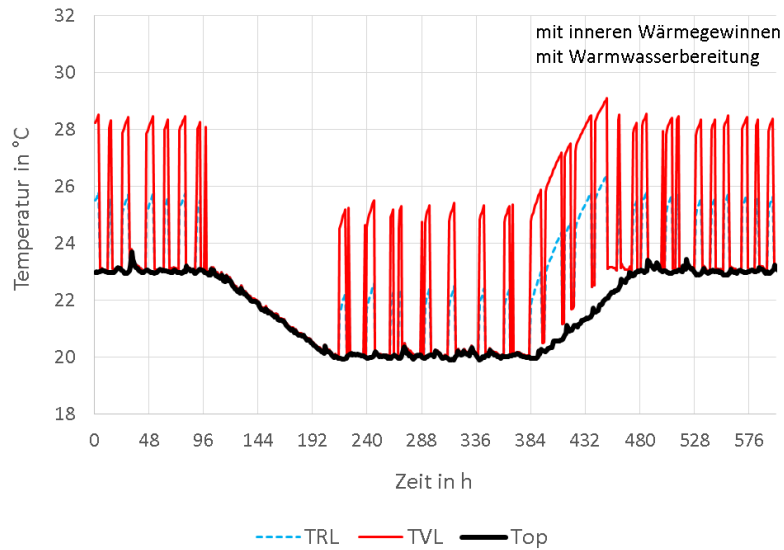


Abbildung 7: Darstellung des Auskühlverhaltens und des Aufheizverhaltens unter synthetischen Randbedingungen mit inneren Lasten und rückgewinnbaren Anlagenverlusten sowie des Taktverhaltens der Wärmepumpe unter diesen Bedingungen (TRL=Bauteil-Rücklaufzeit; TVL=Bauteil-Vorlaufzeit; Top=operative Temperatur)

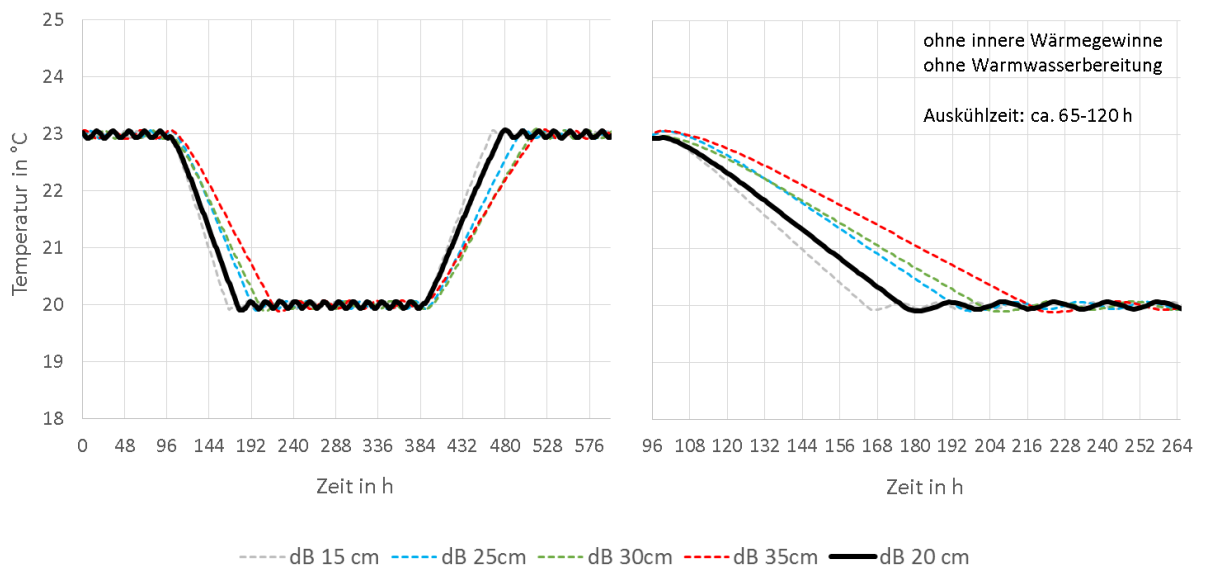


Abbildung 8: Darstellung des Auskühlverhaltens und des Aufheizverhaltens unter synthetischen Randbedingungen ohne innere Lasten und rückgewinnbare Anlagenverluste bei Variation der Dicke der Betonbauteile (dB=Dicke der Betonbauteile)

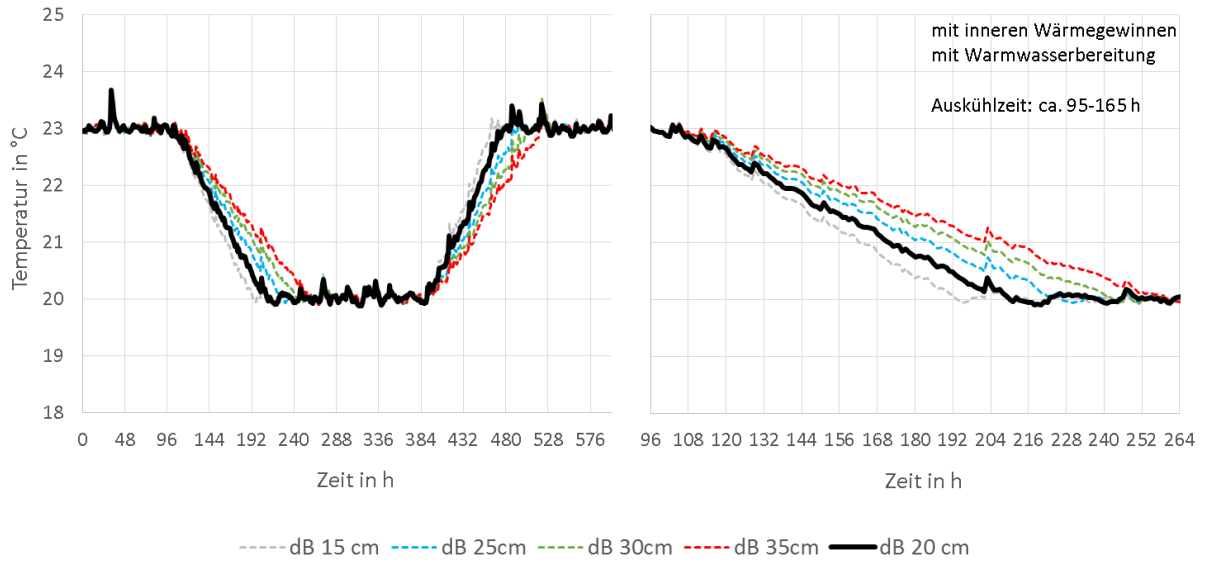


Abbildung 9: Darstellung des Auskühlverhaltens und des Aufheizverhaltens unter synthetischen Randbedingungen mit innere Lasten und rückgewinnbaren Anlagenverlusten bei Variation der Dicke der Betonbauteile (dB=Dicke der Betonbauteile)

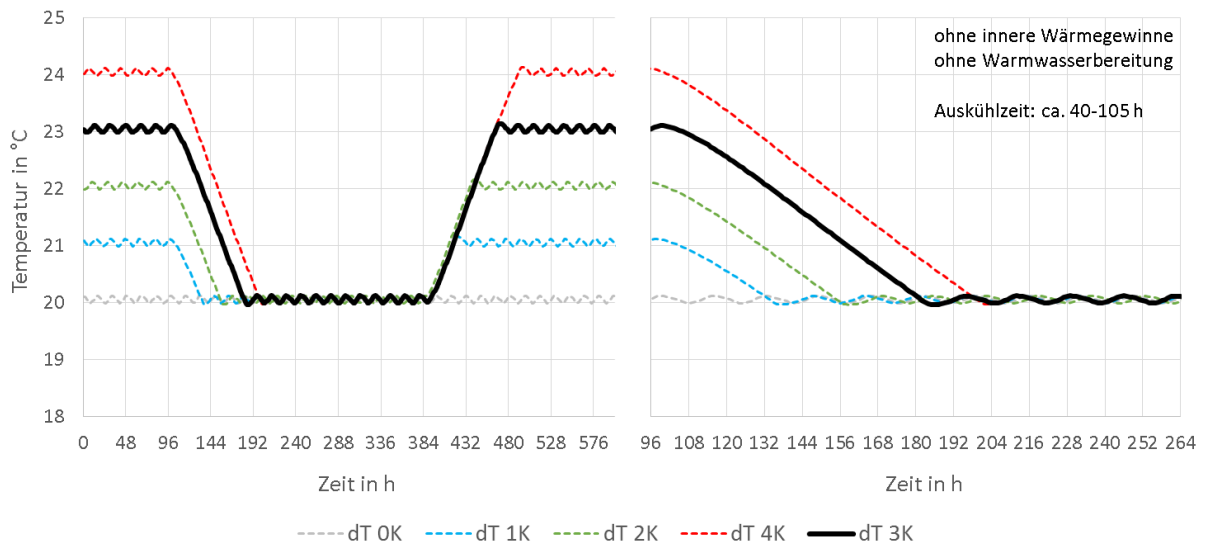


Abbildung 10: Darstellung des Auskühlverhaltens und des Aufheizverhaltens unter synthetischen Randbedingungen ohne innere Lasten und rückgewinnbare Anlagenverluste bei Variation der Solltemperatur bei Windfreigabe (dT=Differenz der op. Temperatur mit Windfreigabe und ohne Windfreigabe)

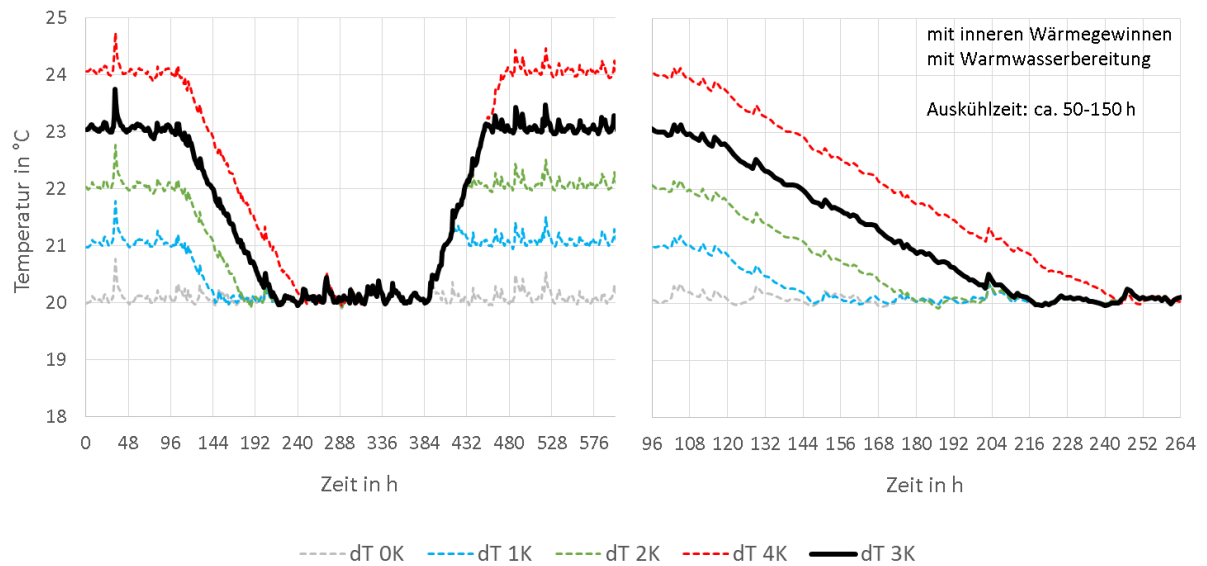


Abbildung 11: Darstellung des Auskühlverhaltens und des Aufheizverhaltens unter synthetischen Randbedingungen mit inneren Lasten und rückgewinnbaren Anlagenverlusten bei Variation der Solltemperatur bei Windfreigabe (dT=Differenz der op. Temperatur mit Windfreigabe und ohne Windfreigabe)

3.3.2 Simulation unter realen Randbedingungen

In den nachfolgenden Abbildungen wird das thermische Gebäudeverhalten unter Verwendung realer Klimamessdaten (siehe Kapitel 2.1) beispielhaft dargestellt.

3.3.2.1 Case Studies

Winterfall

Die Regelung der Temperatur im Gebäude erfolgt raumtemperaturgeführt. Liegt Windfreigabe vor wird im Winterfall versucht eine operative Temperatur von 23°C zu erreichen. Ohne Windfreigabe liegt die Solltemperatur bei 20°C. Dargestellt ist jener Zeitraum im Dezember 2013, bei dem die am längsten anhaltende Periode ohne Windfreigabe vorliegt (siehe Kapitel 2.1). Es zeigt sich, dass unter den vorliegenden Randbedingungen ein Zeitraum von ca. 7 Tagen ohne Windfreigabe überbrückt werden kann. In der Abbildung ist neben der operativen Temperatur und der Vorlauftemperatur auch die mittlere Kerntemperatur dargestellt. Diese liegt im Heizfall maximal ca. 1,5 - 2 K über der operativen Temperatur. Es ist zu beachten, dass sich diese Temperaturdifferenz lediglich während eines Aufheizvorgangs einstellt. Im sonstigen Heizbetrieb liegt die Kerntemperatur nur ca. 0,5 - 1 K über der operativen Temperatur.

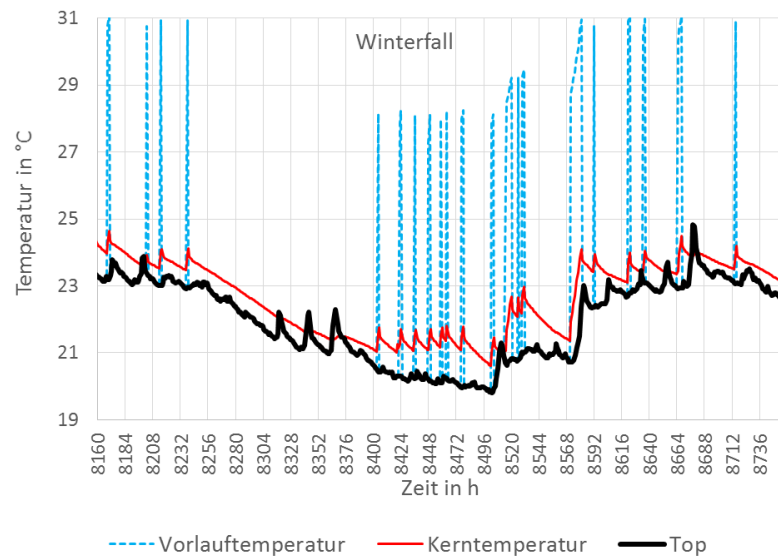


Abbildung 12: Darstellung des simulierten Gebäudeverhaltens während einer beispielhaften Winterperiode (Top=operative Temperatur im Gebäude)

Sommerfall - Abbildung 13 bis Abbildung 16:

Grundsätzlich wird das geplante Gebäude ausschließlich über FreeCooling über den Erdwärmekollektor und nicht über einen reversiblen Betrieb der Wärmepumpe gekühlt. Da es bei diesem Betrieb lediglich zu einer äußerst geringen Stromaufnahme durch den Betrieb von Pumpen kommt, ist eine Berücksichtigung des Windfreigabesignals nicht sinnvoll.

Das Solltemperaturband für die Kühlung des Gebäudes wird in den Simulationen mit einer Hysterese von 0,5 K gewählt. Die Vorlauftemperatur des Kaltwassers wird auf eine konstante Temperatur geregelt. Für die nachfolgend dargestellten Simulationsergebnisse wird von einer konstanten Vorlauftemperatur von 22 °C bzw. 23 °C ausgegangen. Unter diesen Voraussetzungen wird eine Entzugsleistung von max. etwa 4000 W für das gesamte Gebäude erreicht, wobei die Leistung bei länger anhaltendem Betrieb der Wärmepumpe naturgemäß (auf Grund sinkender Bauteil-Rücklaufemperaturen) abfällt. Würde das Gebäude durch Kreislaufumkehr der Wärmepumpe gekühlt werden, würde die zur Verfügung stehende Kälteleistung bei der gewählten Wärmepumpe voraussichtlich etwas über 4000 W liegen und insbesondere auch bei längerem Betrieb relativ konstant bleiben. Beim Kühlbetrieb muss allerdings beachtet werden, dass es aufgrund zu tiefer Vorlauftemperaturen nicht zu Kondensationsproblemen kommt. Die durchgeführten Simulationen zeigen, dass die Temperatur im Gebäude unter den gewählten Randbedingungen bereits mit Vorlauftemperaturen von 22-23 °C deutlich reduziert werden kann. Der Betrieb mit Vorlauftemperaturen unter 20 °C sollte daher jedenfalls vermieden werden.

Abbildung 13 bis Abbildung 15 zeigen die Temperaturverläufe während einer Hitzeperiode im Sommer 2013 ohne die Verwendung eines Sonnenschutzes sowie ohne die Kühlung über die Bauteile im Vergleich zu einer Variante mit Sonnenschutz und zusätzlicher Kühlung über die Bauteilaktivierung.

Es ist zu beachten, dass die Wahl der Klimarandbedingungen nicht im Hinblick auf die Auslegung des Gebäudes auf den Sommerfall erfolgte. Die Tageshöchsttemperaturen liegen jedoch in dem dargestellten Zeitraum zwischen 27 °C und 38 °C. Der normative Nachweis der Vermeidung sommerlicher Überwärmung nach ÖNORM B 8110-3 geht hier von einer Tageshöchsttemperatur des sich periodisch wiederholenden Tages am Standort Wien von ca. 30 °C aus. Abweichend von der Normberechnung erfolgt die Modellierung in den durchgeführten Berechnungen für ein gesamtes Gebäude. Eine raumweise Berechnung würde für kritische Räume zu einer Erhöhung der ermittelten Temperatur führen. Die Ergebnisse der Normberechnung und der hier durchgeführten Berechnungen sind somit nicht direkt vergleichbar.

Da das Gebäude hohe Speichermassen aufweist und in den Simulationen mit effektivem Lüftungsverhalten und effektiver Nutzung des außenliegenden Sonnenschutzes gerechnet wird, wird auch ohne Bauteilkühlung bereits ein guter Schutz gegen sommerliche Überwärmung erreicht. Die max. operative Temperatur liegt bei effektiven Lüftungs- und Verschattungsmaßnahmen bei ca. 28 °C. Durch die zusätzliche Bauteilkühlung lässt sich die Temperatur im Gebäude weiter senken. Je nach Wahl der Solltemperaturen im Kühlbetrieb liegt die operative Temperatur in den beispielhaft durchgeführten Simulationen um 2-2,5 K unter der operativen Temperatur ohne zusätzliche Bauteilkühlung.

Es ist zu beachten, dass die aktive Kühlung der Bauteile nur dann erfolgen sollte, wenn mit passiven Maßnahmen wie Fensterlüftung und Verschattung der transparenten Flächen nicht das Auslangen gefunden werden kann.

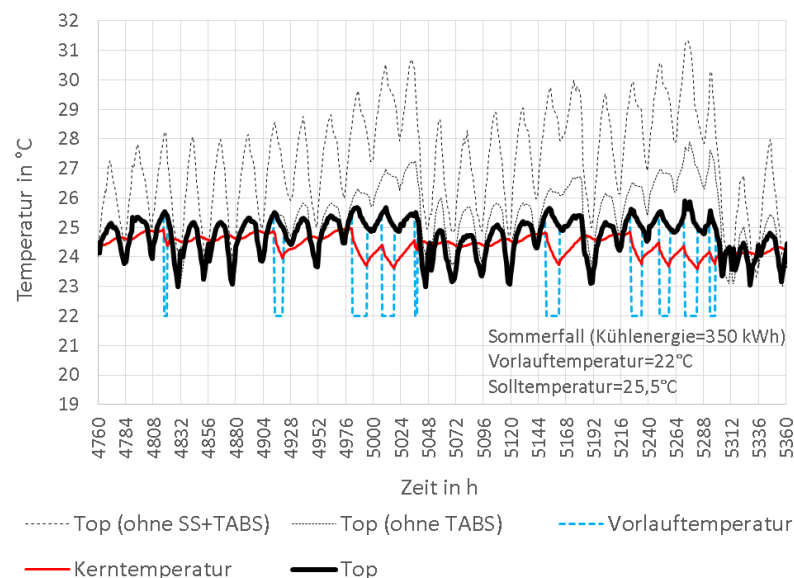


Abbildung 13: Darstellung des simulierten Gebäudeverhaltens während einer beispielhaften Sommerperiode bei einer konst. Vorlauftemperatur von 22 °C und einer op. Solltemperatur im Kühlbetrieb von max. 25,5 °C (Top=operative Temperatur im Gebäude, SS=Sonnenschutz)

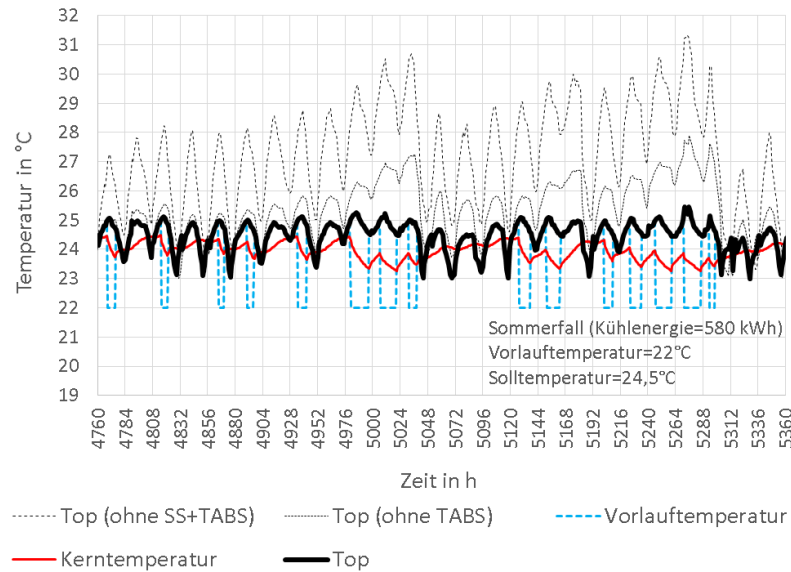


Abbildung 14: Darstellung des simulierten Gebäudeverhaltens während einer sommerlichen Hitzeperiode bei einer konst. Vorlauftemperatur von 22 °C und einer op. Solltemperatur im Kühlbetrieb von max. 24,5 °C (Top=operative Temperatur im Gebäude, SS=Sonnenschutz)

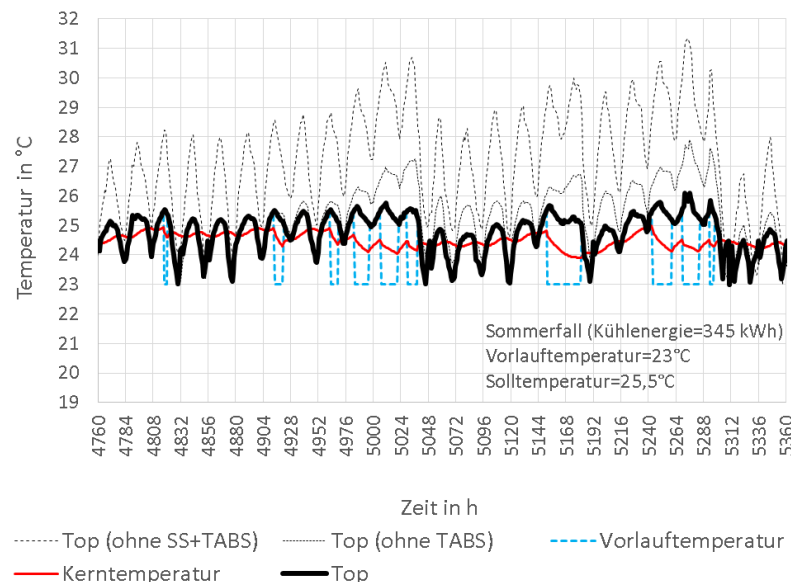


Abbildung 15: Darstellung des simulierten Gebäudeverhaltens während einer beispielhaften Sommerperiode bei einer konst. Vorlauftemperatur von 23 °C und einer op. Solltemperatur im Kühlbetrieb von max. 25,5 °C (Top=operative Temperatur im Gebäude, SS=Sonnenschutz)

Abbildung 16 zeigt den Zusammenhang zwischen der den Bauteilen innerhalb eines Jahres entzogenen Wärmemenge und den maximalen operativen Temperaturen im Gebäude bei unterschiedlichen Solltemperaturbändern. Die Vorlauftemperatur beträgt bei den durchgeführten Simulationen konstant 20 °C. Neben der Bauteilkühlung wird zusätzlich über die Fenster gelüftet und der Sonnenschutz aktiviert. Es zeigt sich, dass bereit mit relativ geringem Wärmeentzug eine deutliche Reduktion der maximal erreichten Temperatur im Vergleich zu der Simulationsvariante ohne Kühlung erreicht werden kann. Bei zu tief gewählten Solltemperaturen für die Kühlung der Räume steigt die benötigte Kühlenergie stark an. Dies hat mehrere Gründe. Einerseits steigt der Kühlbedarf bei größer werdender Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außenluft entsprechend an, andererseits wird

bei niedrigen Solltemperaturen schon zu Zeiten, zu denen mit Fensterlüftung und Nutzung des Sonnenschutzes noch das Auslangen gefunden werden könnte, bereits über die Bauteile gekühlt. Zusätzlich wird der Anstieg des Kühlenergiebedarfs dadurch begründet, dass die Solltemperatur für die Kühlung bereits sehr nahe an der Solltemperatur für die Heizung liegt und es somit vorkommen kann, dass unter Tags bereits gekühlt wird, während in der Nacht noch geheizt wird. Dies ist unbedingt zu vermeiden.

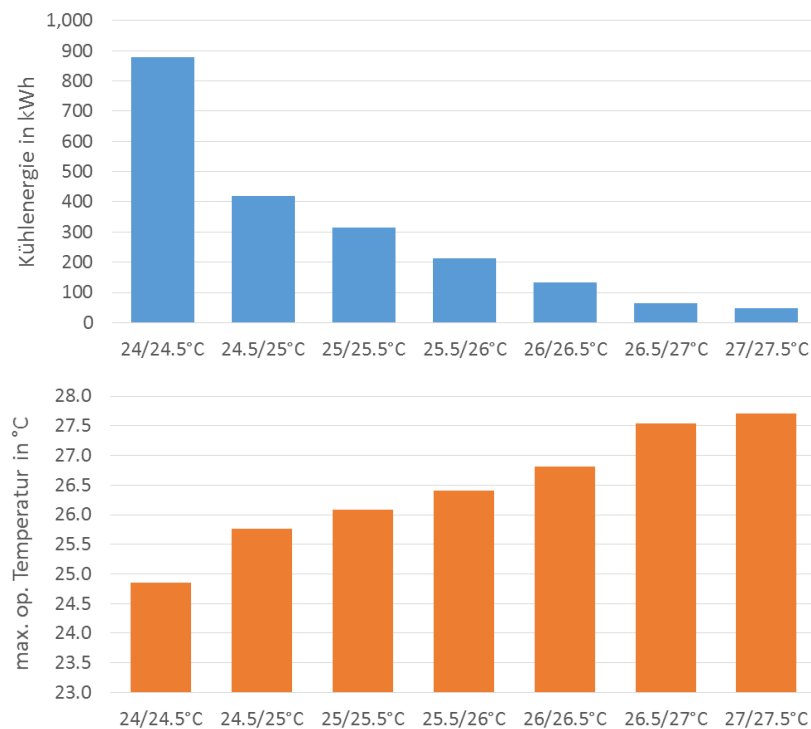


Abbildung 16: Darstellung des Zusammenhangs zwischen der den Bauteilen in einem Jahr entzogenen Wärme und den maximalen op. Temperaturen bei verschiedenen Solltemperaturbändern

Übergangszeit/Herbst - Abbildung 17:

Abbildung 17 zeigt das thermische Gebäudeverhalten in einer beispielhaften Periode im Herbst 2013. Anders als in den beiden oben beschriebenen Fällen, wird die Kerntemperatur hier nicht aktiv beeinflusst, sondern die Bauteile stellen lediglich einen passiven Wärmepuffer dar. Die Kerntemperatur liegt grundsätzlich im Bereich der operativen Temperatur. Fällt die operative Temperatur unter die Temperatur der Betonbauteile ab, geben diese Wärme an den Raum ab. Steigt die operative Temperatur über die Temperatur der Betonbauteile an, nehmen diese Wärme aus dem Raum auf. Die vorhandene Speichermasse reduziert somit die Temperaturschwankungen im Gebäude.

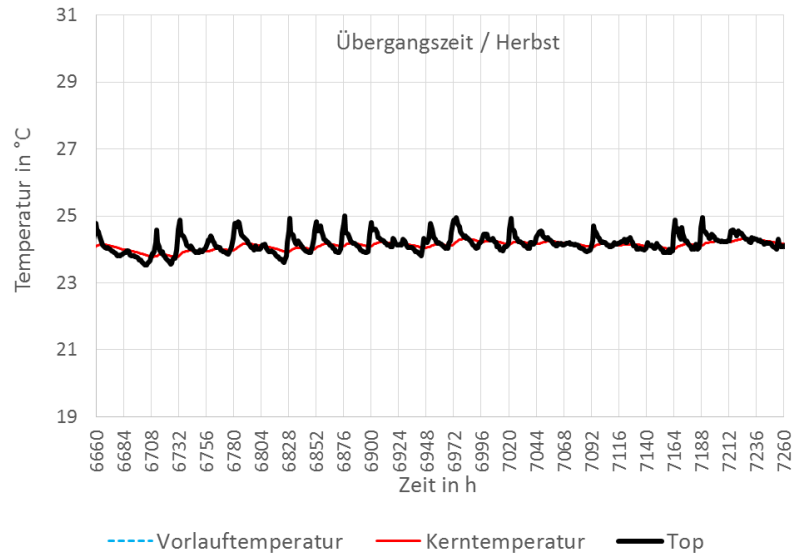


Abbildung 17: Darstellung des simulierten Gebäudeverhaltens während einer beispielhaften Periode in der Übergangszeit (Top=operative Temperatur im Gebäude)

3.3.2.2 Sensitivitätsanalyse - Ganzjahressimulation

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Auswirkungen verschiedener Einflussgrößen auf das Gebäude dargestellt. Es wird der Einfluss des Pufferspeichervolumens, der Solltemperatur des Gebäudes, der Solltemperatur des Pufferspeichers und der Dicke der Betonbauteile auf den Energiebedarf der Wärmepumpe mit und ohne Windfreigabe untersucht (dargestellt jeweils in der linken Abbildung). Der Anteil der während vorliegender Windfreigabe von der Wärmepumpe bezogenen elektrischen Energie im Verhältnis zum gesamten Strombedarf der Wärmepumpe wird ebenfalls ausgewertet (dargestellt jeweils in der rechten Abbildung).

Speichervolumen - Abbildung 18:

Während eine Erhöhung des Pufferspeichervolumens lediglich in einer geringfügigen Steigerung der gesamten Energieaufnahme der Wärmepumpe resultiert, sinkt der Anteil des außerhalb der Windfreigabezeiten bezogenen Stroms relativ stark. Das konzipierte Gebäude weist ein Puffervolumen von 1 m³ auf. Die durchgeführten Simulationen zeigen, dass das Speichervolumen durchaus passend gewählt wurde. Auf Grund der gewählten Hydraulik hat das Speichervolumen praktisch keinen Einfluss auf den Windanteil im Bereich der Raumheizung.

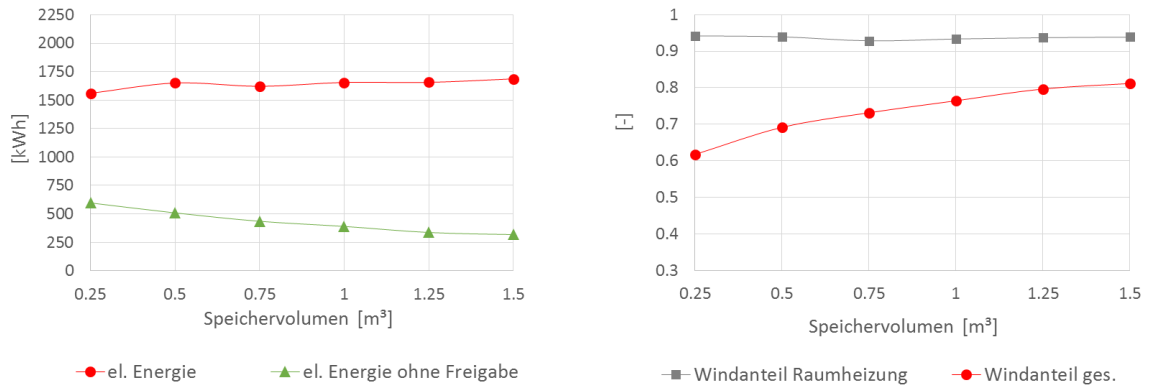


Abbildung 18: Auswirkung des Pufferspeichervolumens

links: gesamter Strombedarf der Wärmepumpe und Strombedarf der Wärmepumpe ohne Windfreigabe in Abhängigkeit des Pufferspeichervolumens

rechts: Anteil des gesamten Strombedarfs bzw. des gesamten Strombedarfs für Raumheizung der bei Windfreigabe bezogen wird in Abhängigkeit des Pufferspeichervolumens

Temperatur im Gebäude - Abbildung 19:

Basis für alle Varianten ist eine Solltemperatur ohne Windfreigabe von 20°C. In den nachfolgenden Abbildungen ist nun der Einfluss der Wahl der Solltemperatur bei vorliegender Windfreigabe dargestellt. Es zeigt sich, dass der Anteil der während der Windfreigabezeiten für die Raumheizung bezogenen Energie bereits mit einer relativ geringfügigen Erhöhung der Temperatur über 20°C stark steigt. Eine zu hoch gewählte Temperatur führt allerdings zu einem starken Anstieg des gesamten Strombedarfs.

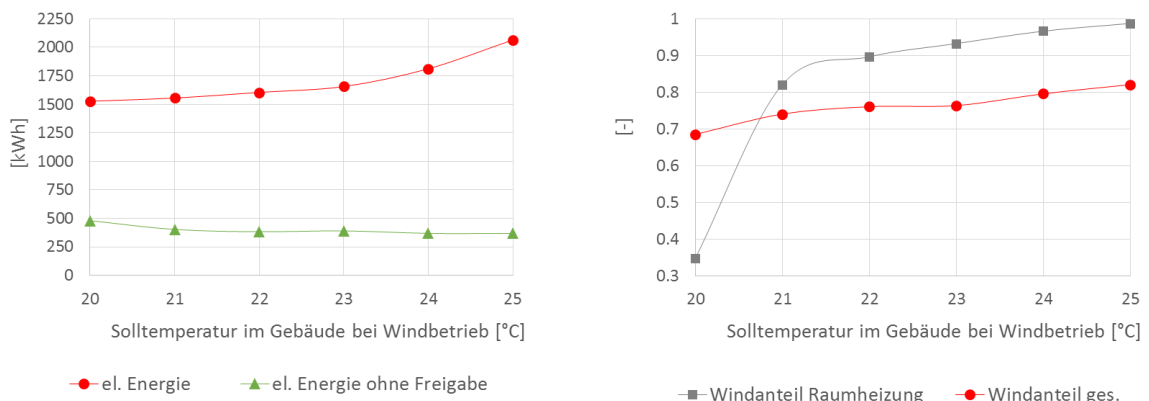


Abbildung 19: Auswirkung der Temperatur im Gebäude

links: gesamter Strombedarf der Wärmepumpe und Strombedarf der Wärmepumpe ohne Windfreigabe in Abhängigkeit der Solltemperatur im Gebäude bei Windfreigabe

rechts: Anteil des gesamten Strombedarfs bzw. des gesamten Strombedarfs für Raumheizung der bei Windfreigabe bezogen wird in Abhängigkeit der Solltemperatur im Gebäude bei Windfreigabe

Temperatur im Speicher - Abbildung 20:

Die Temperatur des Speichers während der Windfreigabezeiten wird grundsätzlich mit 65°C angesetzt. In der Basisvariante wird die Temperatur des Speichers ohne Windfreigabe mit 60°C festgelegt. Unter Vernachlässigung der sicherzustellenden Trinkwasserhygiene und den damit verbundenen Mindesttemperatur im Speicher wird in der nachfolgenden Abbildung der Einfluss einer Senkung der Speichertemperatur in den Zeiten ohne Windfreigabe dargestellt. Wäre es möglich die Speichertemperatur unter 60 °C abfallen zu lassen, wäre neben einer grundsätzlichen Energieeinsparung zufolge geringerer Speicherverluste, eine starke Steigerung des Anteils der während der Windfreigabezeiten bezogenen Energie erreichbar.

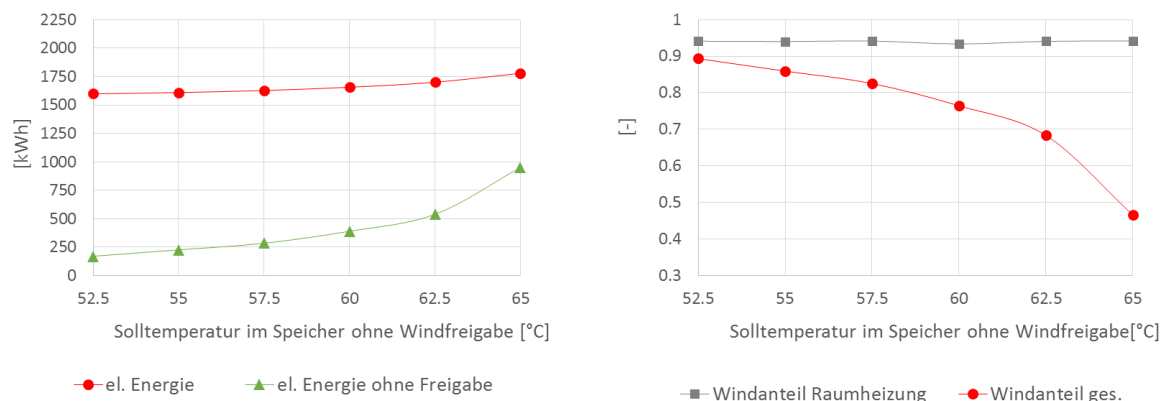


Abbildung 20: Auswirkung der Temperatur im Speicher

links: gesamter Strombedarf der Wärmepumpe und Strombedarf der Wärmepumpe ohne Windfreigabe in Abhängigkeit der Solltemperatur im Speicher (ohne Windfreigabe)

rechts: Anteil des gesamten Strombedarfs bzw. des gesamten Strombedarfs für Raumheizung der bei Windfreigabe bezogen wird in Abhängigkeit der Solltemperatur im Speicher (ohne Windfreigabe)

Dicke der Betonbauteile - Abbildung 21:

Im Vergleich zu den oben beschriebenen Einflussgrößen hat die Dicke der Betonbauteile lediglich einen geringen Einfluss auf das energetische Verhalten des Gebäudes.

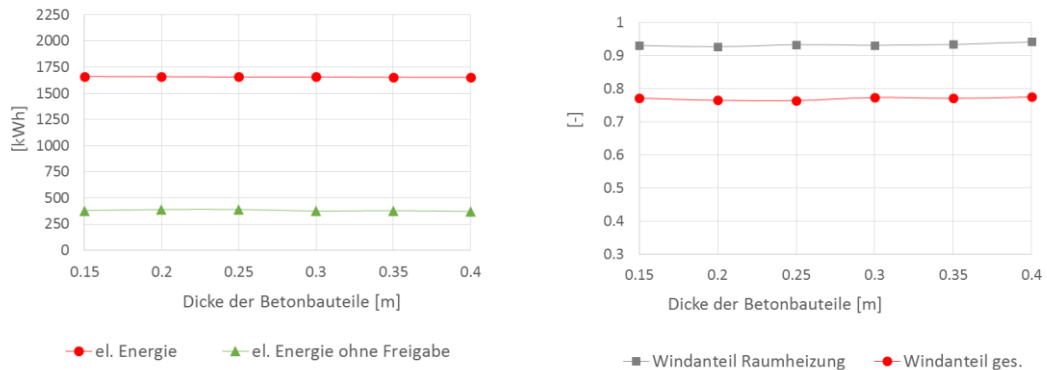


Abbildung 21: Auswirkung der Dicke der Betonbauteile

links: gesamter Strombedarf der Wärmepumpe und Strombedarf der Wärmepumpe ohne Windfreigabe in Abhängigkeit der Dicke der Betonbauteile

rechts: Anteil des gesamten Strombedarfs bzw. des gesamten Strombedarfs für Raumheizung der bei Windfreigabe bezogen wird in Abhängigkeit der Dicke der Betonbauteile

Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse zeigt, dass das Speichervolumen und insbesondere die Speichertemperatur den größten Einfluss auf das untersuchte Gebäudekonzept haben. In Abbildung 22 sind die Ergebnisse der Simulationen zusammengefasst. Wird weder bei der Raumtemperatur, noch bei der Speichertemperatur eine Temperaturerhöhung bei Windfreigabe zugelassen, werden etwa 65% des gesamten Strombedarfs der Wärmepumpe außerhalb der Freigabezeiten bezogen. Wird die Temperatur im Gebäude bei Windfreigabe mit 23 °C gewählt und somit die Speichermasse aktiviert, reduziert sich der Strombezug außerhalb der Freigabezeiten auf ca. 55%. Wird zusätzlich eine Temperaturdifferenz von 5 K im Pufferspeicher berücksichtigt, lässt sich der Anteil der außerhalb der Windfreigabezeiten bezogenen Energie auf etwas über 25% reduzieren.

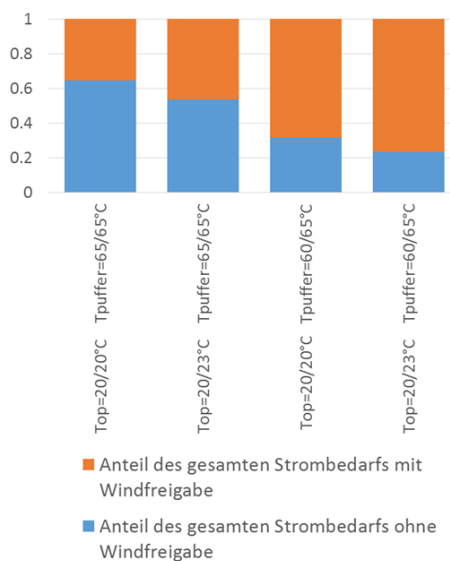


Abbildung 22: Anteil des gesamten Strombedarfs mit/ohne Windfreigabe für verschiedene Simulationsvarianten

Werden lediglich jene Energiemengen betrachtet, die für die Raumheizung aufgewendet werden, zeigt sich ein geändertes Bild. Durch die Erhöhung der Solltemperatur bei Windfreigabe von 20°C auf 23 °C lässt sich der Anteil des außerhalb der Windfreigabezeiten bezogenen Stroms von 65% auf ca. 5% reduzieren.

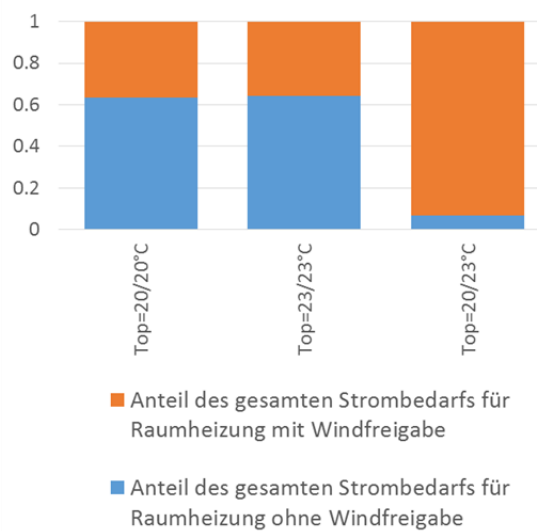


Abbildung 23: Anteil des Strombedarfs für Raumheizung mit/ohne Windfreigabe für verschiedene Simulationsvarianten

Auffällig sind der sehr hohe erreichbare Windanteil im Bereich der Raumheizung durch die Aktivierung der Speichermasse des Gebäudes und der auf den ersten Blick doch relativ geringe Einfluss dieser Maßnahme auf den gesamten Strombedarf der Wärmepumpe. Werden die Energieflüsse für den Bereich der Wärmeversorgung dargestellt, ergibt sich das in Abbildung 24 dargestellte Energieflussdiagramm. Es zeigt sich, dass 5050 kWh Wärme von der Wärmepumpe erzeugt werden und nur etwa 1500 kWh für den Bereich Raumheizung aufgewendet werden. Der Warmwasserwärmebedarf beträgt ca. 2000 kWh. Die verbleibenden 1570 kWh stellen Verluste im Bereich der Wärmeverteilung und Wärmespeicherung dar. Da sich die komplette Wärmeverteilung sowie der Speicher im konditionierten Gebäudebereich befinden, sind sämtliche Verluste rückgewinnbar und reduzieren somit die von der Bauteilaktivierung benötigte Wärme zur Einhaltung der Solltemperaturen.

Der Grund für den geringen Einfluss der Aktivierung der Gebäudespeichermasse liegt also einzig an dem ohnehin äußerst geringen Wärmebedarf für Raumheizung. Das Energieflussdiagramm für den Bereich der Wärmeerzeugung der Basisvariante ist in der nachfolgenden Grafik dargestellt. Von den ca. 5000 kWh von der Wärmepumpe bereitgestellter thermischer Energie werden lediglich ca. 1500 kWh tatsächlich an die Bauteile abgegeben. Die übrigen ca. 3500 kWh werden für die Warmwasserbereitung benötigt bzw. fallen im Zuge der Wärmespeicherung und -verteilung als rückgewinnbare Verluste an. Die Höhe der Verluste hängt dabei stark von der tatsächlich ausgeführten Qualität im Bereich der Wärmespeicherung und der Wärmeverteilung ab und kann daher stark von den hier angenommenen zw. berechneten Werten abweichen. Auch der Warmwasserbedarf wird in der Realität je nach Anzahl der im Haushalt lebenden Personen und deren Gewohnheiten im Hinblick auf den Warmwasserbedarf mehr oder weniger stark von den in dieser

Studie getroffenen Annahmen abweichen. Um hier einen realistischen Vergleich zwischen Simulation und Messung zu ermöglichen, müssen die Randbedingungen der Simulation an die tatsächlichen Gegebenheiten angepasst werden.

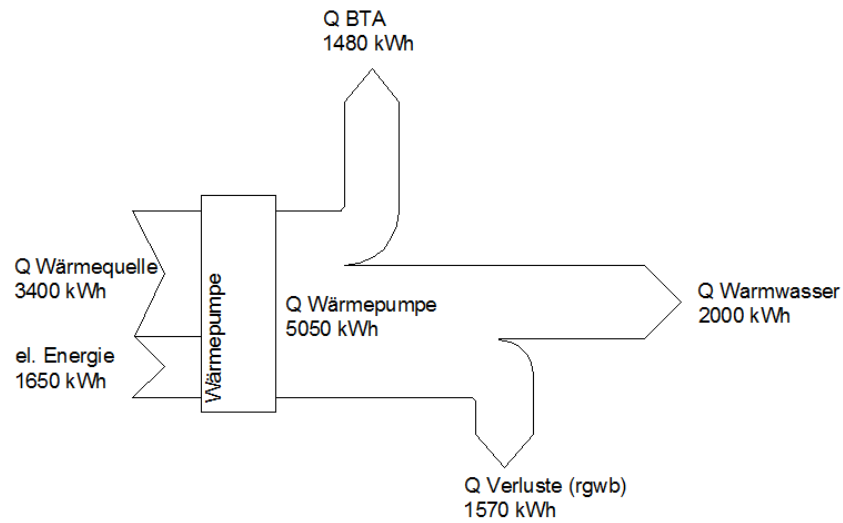


Abbildung 24: Energiefluss im Bereich der Wärmeversorgung bei Solltemperatur im Gebäude = 20/23°C und Solltemperatur im Pufferspeicher 60/65°C

4 Zusammenfassung & Fazit

Die Speicherung von Windstrom innerhalb von Gebäuden in Form von thermischer Energie stellt eine kostengünstige und einfache Möglichkeit der Energiespeicherung dar. In der durchgeführten Studie soll das Potenzial dieser Technologie anhand eines beispielhaften Passivhauses untersucht werden.

Das bereits geplante Gebäude verfügt über eine Erdwärmepumpe welche direkt an der Bauteilaktivierung angeschlossen ist. Die für die Warmwasserbereitung benötigte Energie wird mittels Frischwasserstation einem Pufferspeicher entzogen, welcher ebenfalls von der Wärmepumpe beheizt wird. Die Windfreigabephase werden der Gebäuderegulierung mit einem Fernsignal vom Energieversorger angezeigt. Während der Freigabezeiten wird das Gebäude auf einem leicht erhöhten Temperaturniveau gehalten. Die dadurch gespeicherte Energie wird genutzt um längere Zeiträume ohne Windfreigabe überbrücken zu können.

Die durchgeführten Simulationen zeigen, dass sich bei der hohen thermischen Qualität des Gebäudes in Kombination mit den zur Verfügung stehenden Speichermassen im Winter Zeiträume von bis zu einer Woche überbrücken lassen. Diese Tatsache stellt die Grundvoraussetzung für die Funktionalität des Gebäudekonzepts dar. Sowohl die verbaute Speichermasse als auch das gewählte Temperaturniveau beeinflussen das Auskühlverhalten wesentlich.

Die Simulation des untersuchten Passivhauses zeigt, dass unter den gewählten Randbedingungen im Zuge der für den Heizfall aufgrund der vorliegenden Klimarandbedingungen sowie des gewählten Windfreigabesignals kritischsten Winterphase (11 Tage ohne Windfreigabe) in etwa 7 Tage ohne Windfreigabe überbrückt werden können, bevor sich die Wärmepumpe einschaltet, um die minimal zulässige Temperatur sicher stellen zu können. Bedingt durch die hohe Speichermasse und die hohe thermische Qualität der Gebäudehülle, können auf diese Art und Weise 95% des gesamten Strombedarfs für den Betrieb der Wärmepumpe für Raumheizung innerhalb der Windfreigabezeiten bezogen werden. Die Funktionsweise des Gebäudes als Energiespeicher konnte somit grundsätzlich nachgewiesen werden. Die Simulationen zeigen allerdings auch, dass der gesamte Anteil der außerhalb der Windfreigabezeiten bezogenen Energie vom Warmwassersystem dominiert wird. Aufgrund des ohnehin sehr geringen Energiebedarfs für den Bereich der Raumheizung ist der Einfluss eines im Hinblick auf Volumen und Schichtung sowie Temperaturregelung optimierten Pufferspeichers auf den Energiebedarf als wesentlich höher einzustufen als jener des Gebäudes selbst.¹

Als äußerst effektiv zeigt sich im Zuge der Simulationen die Bauteilkühlung zur Sicherstellung eines behaglichen Temperaturniveaus während sommerlicher Hitzeperioden. Wird primär auf passive Maßnahmen zur Kühlung des Gebäudes gesetzt und die aktive Bauteilkühlung nur zu Zeiten extremer Hitzeperioden eingesetzt, lässt sich bereits mit sehr geringem Energieaufwand eine erhebliche Senkung der Temperatur im Gebäude erreichen.

¹ Es ist anzumerken, dass in den Simulationen bereits ein Multikapazitäten-SchichtspeichermodeLL berücksichtigt wird. Im Zuge der in dieser Studie durchgeführten Optimierungen liegt das Hauptaugenmerk allerdings am thermischen Verhalten des Gebäudes und nicht an jenem des Pufferspeichers. Durch ein optimiertes Speichermanagement können hier eventuell noch Verbesserungen im Vergleich zu den Simulationsergebnissen erzielt werden.

5 Literaturverzeichnis

- [EPB10] Official Journal of the European Union: DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast).
- [FIN15] Hydraulik-Schema. FIN - Future Is Now, Kuster Energielösungen GmbH. 15.7.2015.
- [FRI13] Friembichler Felix, Bednar Thomas, Handler Simon, Gladt Matthias, Neusser Maximilian, Hofer Richard, Schöberl Helmut: Thermische Bauteilaktivierung – Entwicklung eines Rechenkerns. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. 2013.
- [HAN14] Simon Handler: Steigerung der Effizienz von kleinvolumigen Wohnbauten durch solarthermische Aktivierung von Betondecken. Dissertation an der Technischen Universität Wien, 2013.
- [NOV15] Energieausweis gem. OIB-Richtlinie 6 2011. BM. Ing. Michael Novak. 9.6.2015.
- [WEB15] Daten Stromerzeugung Windpark Neuhof. WEB Windenergie AG. Email vom 12.5.2015.

6 Anhang: Auswertungen v. Jahrestemperaturverläufen

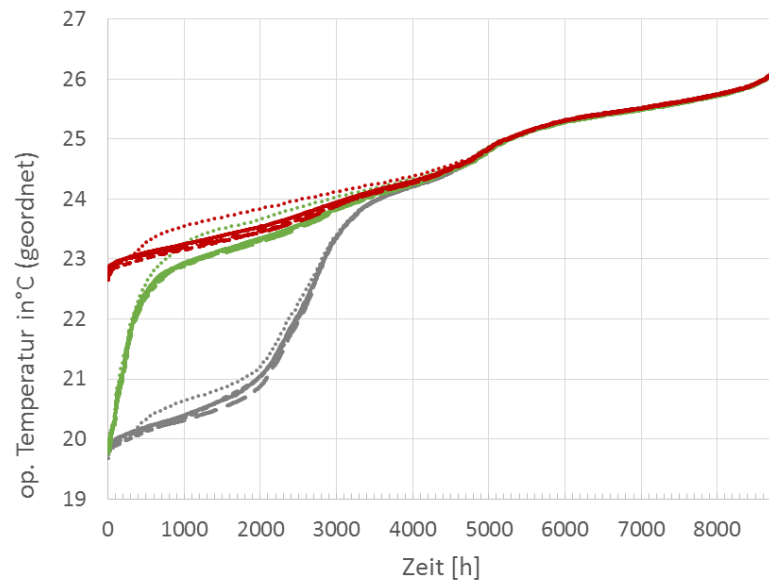


Abbildung 25: Unterschreitungshäufigkeit der op. Temperatur bei Solltemperatur im Gebäude = 20/23°C (grün), Solltemperatur im Gebäude = 20/20°C (grau) und Solltemperatur im Gebäude = 23/23°C (rot)
Unterschiedliche Linientypen stellen unterschiedliche Regelstrategien dar (Raumtemperatur-, Kerntemperatur-, prädiktive Kerntemperaturregelung etc.)

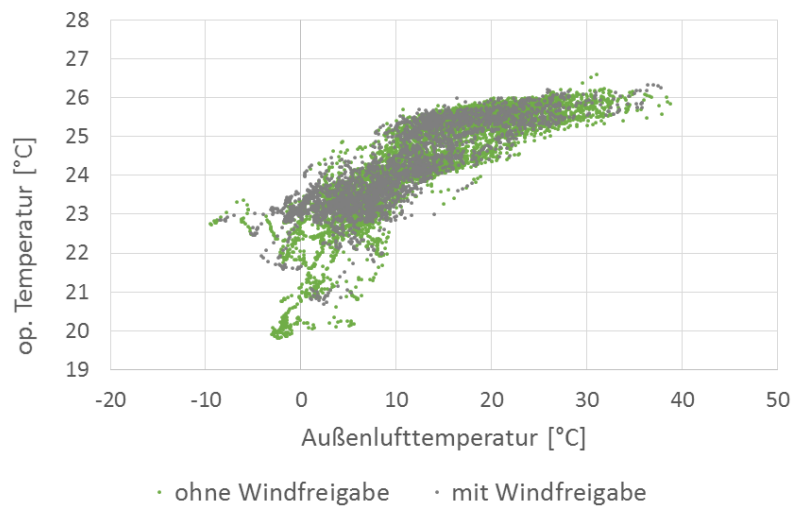


Abbildung 26: Berechnete operative Temperatur in Abhängigkeit der vorliegenden Außentemperatur bei Solltemperatur im Gebäude = 20/23°C

