TREBERSPURG & PARTNER ARCHITEKTEN

ZIVILTECHNIKER GES.M.B.H, A-1140 Wien, Penzingerstraße 58
Tel: +43 (1) 894 31 91 - 12, Fax +43 (1) 894 31 91 - 15
mailto: office@treberspurg.at, www.treberspurg.at

MARTIN TREBERSPURG
Univ.Prof. Arch. Dipl.-Ing. Dr.

FRIEDRICH MÜHLING
Architekt Dipl.-Ing.

CHRISTIAN WOLFERT
Architekt Dipl.-Ing.

BERNHARD KOLLMANN
Architekt Dipl.-Ing.

TAB-SCALE 2
Modellentwicklung und Validierung für thermisch aktivierte Bauteile (TAB) an einem Demo-Wohngebäude für Scale-up

Endbericht

Zur Vorlage bei der Wiener Wohnbauforschung

Eingereicht von
Treberspurg & Partner Architekten ZT GmbH
Penzigerstraße 58, 1140 Wien

Autoren:
Univ. Prof. DI Dr. Martin Treberspurg
Univ. Prof. DI Dr. Tobias Pröll
Mag. arch. Christoph Treberspurg
DI Wilhelm Hofbauer
DI Dr. Magdalena Wolf

12. Februar 2018

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 3
1.1 Thermisch aktivierte Bauteile - TAB 3
1.2 Modellierung und Regelung thermisch aktivierter Bauteile 3
2 Messaufbau im Demo-Gebäude 5
2.1 Messtechnikplan 6
2.2 Planung von Haus-, Mess- und Regelungstechnik inkl. Datenerfassung 7
2.2.1 Thermische Bauteilaktivierung (TAB): 7
2.2.2 Wärmepumpe: 7
2.2.3 PV- System: 7
2.2.4 Messtechnik zur Datenerfassung 7
2.2.5 Regelungstechnik und Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) 8
2.2.6 Datenerfassung 9
3 Bestimmung des Verhaltens der thermischen Bauteilaktvierung 10
3.1 Kalibration Temperaturfühler 10
3.2 Einbau Temperaturfühler in TAB 11
4 Versuchsdurchführung – Fotostrecke 13
4.1 Ausblick 19
5 Literatur 20
6 Abbildungsverzeichnis 21
7 Anhang 22

1 Einleitung

1.1 Thermisch aktivierte Bauteile - TAB

Der Passivhausstandard ist ein erprobtes und verbreitetes Konzept, das durch den höher werdenden Gebäudestandard immer mehr an Wichtigkeit gewinnt. Um diesen Standard zu erreichen werden sehr hoch gedämmte Außenhüllen und eine hocheffiziente Haustechnik benötigt. Ein weiteres Konzept ist das Niedrigstenergiehaus, das ab 2020 europäischer Standard werden soll. Bei beiden Konzepten können mit einer betont solaren Bauweise höhere passive solare Gewinne erzielt werden, welche den Energiebedarf eines solchen Hauses nochmals reduzieren. Dies entspricht einem „low-tech Ansatz“ in der Haustechnik, da man mit dieser Bauweise den haustechnischen Aufwand minimieren kann. Solares Bauen zielt allerdings nicht nur auf Energiegewinn, sondern auch auf die gezielte Speicherung und Verteilung der gesammelten Energie durch ohnehin vorhandene Gebäudespeichermassen wie massive Wände, Böden und Decken ab. Dieses Prinzip findet eine effiziente Anwendung in der thermischen Bauteilaktivierung (TAB).

„Mit der Entwicklung hoch wärmegedämmter Gebäudehüllen und dem geforderten Trend zu Niedrigenergie- und Passivhausbauweisen haben sich auch die Anwendungsmöglichkeiten der thermischen Bauteilaktivierung erweitert.“ (Ao. Univ. Prof. DI Dr. Klaus Kreč 2014)

Die Bemühungen der letzten Jahre im Forschungsbereich der Bauteilaktivierung gingen in Richtung der Ergründung des Potentials dieser Konstruktionen. Dabei wurde das thermische Verhalten von thermisch aktivierten Baukonstruktionen auch rechnerisch greifbar gemacht. Dies ermöglichte es die Heiz- und Kühleffekte von aktivierten Bauteilen sehr genau zu simulieren. Solche Systeme kann man gut mit aktiver Solarnutzung (z. B. PV und Wärmepumpe) kombinieren, da die Speichermassen die tagsüber gewonnene Energie relativ gut aufnehmen können. Außerdem eignet sich das System als saisonales Speichermedium in dem man mit den solaren Gewinnen der Sommermonate dem Erdreich die Energie - die im Winter entnommen wird - zurückgibt (Erdpendelspeicher mittels Tiefensonden).
Der Vorteil dieser aktiven solaren Nutzung liegt darin, dass die gewonnene Energie gespeichert werden kann ohne sie in das Stromnetz einspeisen zu müssen. Statt großer und kostenintensiver Wasser-Pufferspeichersysteme kommt hier die effektivere Methode der thermischen Bauteilaktivierung zum Einsatz. Die Nutzung von Strom im Wärmesektor kombiniert mit Wärmespeichern (Power-to-Heat) ist bereits heute eine vielversprechende Lösung, überschüssigen Strom effizient und wirtschaftlich zu speichern. Durch die großen Flächen der aktivierten Bauteile wird das Heizen der Räume mit geringsten Vorlauf-Temperaturen ermöglicht. Dadurch wird zum einen der Strombedarf der Wärmepumpe durch hohe COP-Werte minimiert und zum anderen ein maximaler Selbstregelungseffekt erreicht.

1.2 Modellierung und Regelung thermisch aktivierter Bauteile

Zur detaillierten Modellierung von zeitabhängigen Wärmeflüssen in TAB und in gesamten Gebäuden hat Kreč [1] das harmonische Leitwertkonzept vorgeschlagen. Dabei können instationäre Wärmeleitvorgänge in inhomogenen Bauteilen unter Berücksichtigung der

Wärmespeicherfähigkeit dreidimensional beschrieben werden. Braun [2] beschreibt einen Ansatz zur Reduktion von Energiekosten und einem Angleich des elektrischen Verbrauchs von Gebäuden an die elektrische Angebotskurve durch optimierte Ausnutzung der thermischen Speicherkapazität von Gebäuden. Die Ergebnisse zahlreicher Arbeiten in diesem Bereich werden von Kolokotsa, et al. [3] zusammengefasst. Modellprädiktive Regler für Büro- und Wohngebäude werden unter anderem von Bianchini, et al. [4] und Fiorentini, et al. [5] vorgeschlagen. Die grundsätzliche Aufgabenstellung ist in Abbildung 1 dargestellt.

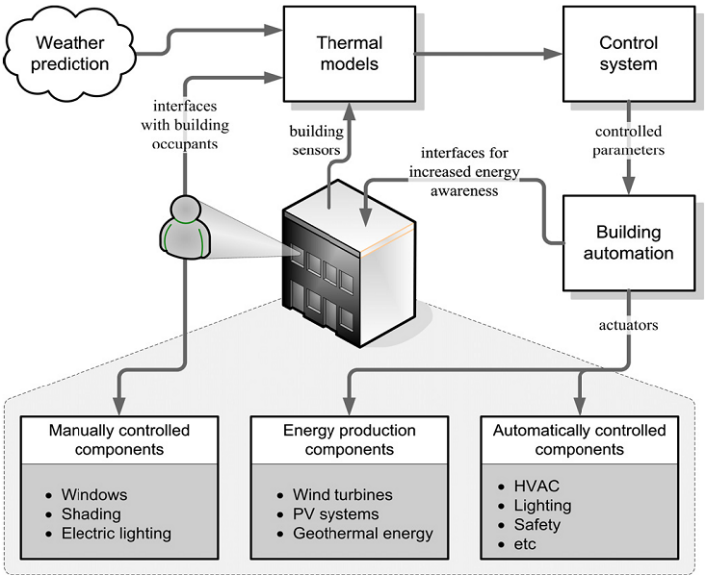

Abbildung 1: Komponenten einer Passivhaus- oder Plus-Energie-Haus-Regelungsarchitektur (HVAC: heating, ventilation, air conditioning) – Abbildung aus Kolokotsa, et al. [3].

Ein Charakteristikum einer effizienten Gebäuderegelung liegt in der stark verzögerten Auswirkung von Stell- oder Störgrößenänderungen auf Grund der thermischen Speicherwirkung von massiven Bauteilen. Darum kommt der modellbasierten Prädiktion des Gebäudezustands auf Basis von Wetterdaten und unter Annahme bestimmter Stellgrößenverläufe eine entscheidende Rolle bei der energietechnischen Gebäude-optimierung zu. Ein vorausschauender Betrieb des Heizungssystems ist bei Gebäuden mit hochwertiger Gebäudehülle und bei hohem solarem Eintrag entscheidend für den Wohnkomfort und die Energieeffizienz. Bei Verwendung thermisch aktivierter Bauteilsysteme (TAB) zur Gebäudeheizung bzw. -kühlung kommt ein weiteres Verzögerungsglied hinzu. In diesem Bereich gab es kürzlich einige interessante Beiträge im Rahmen derer modell-prädiktive Regler (MPC) in Gebäuden mit TAB eingesetzt werden [6], [7]. Es konnte auch gezeigt werden, dass die Kombination von TAB mit MPC einerseits Entlastungen für das Stromnetz und andererseits eine optimierte Anpassung an selbsterzeugte elektrische Energie (z.B. Photovoltaik) ermöglicht, ohne den Wohnkomfort zu beeinträchtigen [8]. Der Fokus bei diesen Projekten liegt auf kommerziell genützten Gebäuden (Bürogebäude, Einkaufszentren, etc.). Im Wohnbereich ist die Kombination von TAB mit MPC bisher wenig untersucht.

2 Messaufbau im Demo-Gebäude

Im Projekt „TAB-SCALE 2“ wird ein innovatives und energieeffizientes Haustechnikschema entwickelt, in dem das Zusammenspiel von passiver (Einstrahlung in das Gebäude) und aktiver (gebäudeintegrierte Photovoltaikanlage) Solarenergienutzung in Kombination mit Erdwärmenutzung untersucht wird. Ergänzend wird ein modellprädiktives Regelungskonzept zur Steuerung der Bauteilaktivierung und Lastverschiebung realisiert, um ein optimiertes Systemverhalten zu erreichen. Hauptziel des Projektes ist es, eine angebotsflexible und energieeffiziente Wärmeversorgung bzw. Kühlung von Wohneinheiten bei gleichzeitiger Steigerung des Wohnkomforts zu erzielen. Dafür wird von einem Demo-Gebäude mit zwei Wohneinheiten, welches detailliert mit messtechnischer Ausstattung versehen wird und dessen NutzerInnen in den Monitoringprozess eingebunden werden, ausgegangen. Daraus können Schlüsse für eine Maßstabsvergrößerung (Scale-up) auf großvolumige Wohnbauten gezogen werden. Hier stellt vor allem das individuelle Nutzerverhalten eine Herausforderung für die regelungstechnische Lösung dar. Zur Bestimmung des thermischen Verhaltens des Betonkerns, zur Implementierung einer modellprädiktiven Regelung und zur Durchführung eines umfangreichen Betriebsmonitorings wird ein Mess- und Regelungskonzept umgesetzt, das den gestellten Anforderungen entspricht und in Abbildung 2 dargestellt ist. Die Details zur Messdatenerfassung und –speicherung, sowie zur Verarbeitung der Daten und die Implementierung des Reglers sind im folgenden Kapitel erläutert.

2.1 Messtechnikplan

Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt aus dem Messtechnikplan des Demo-Gebäudes und beschreibt das geplante Regelungs- und Datenaufzeichnungskonzept.

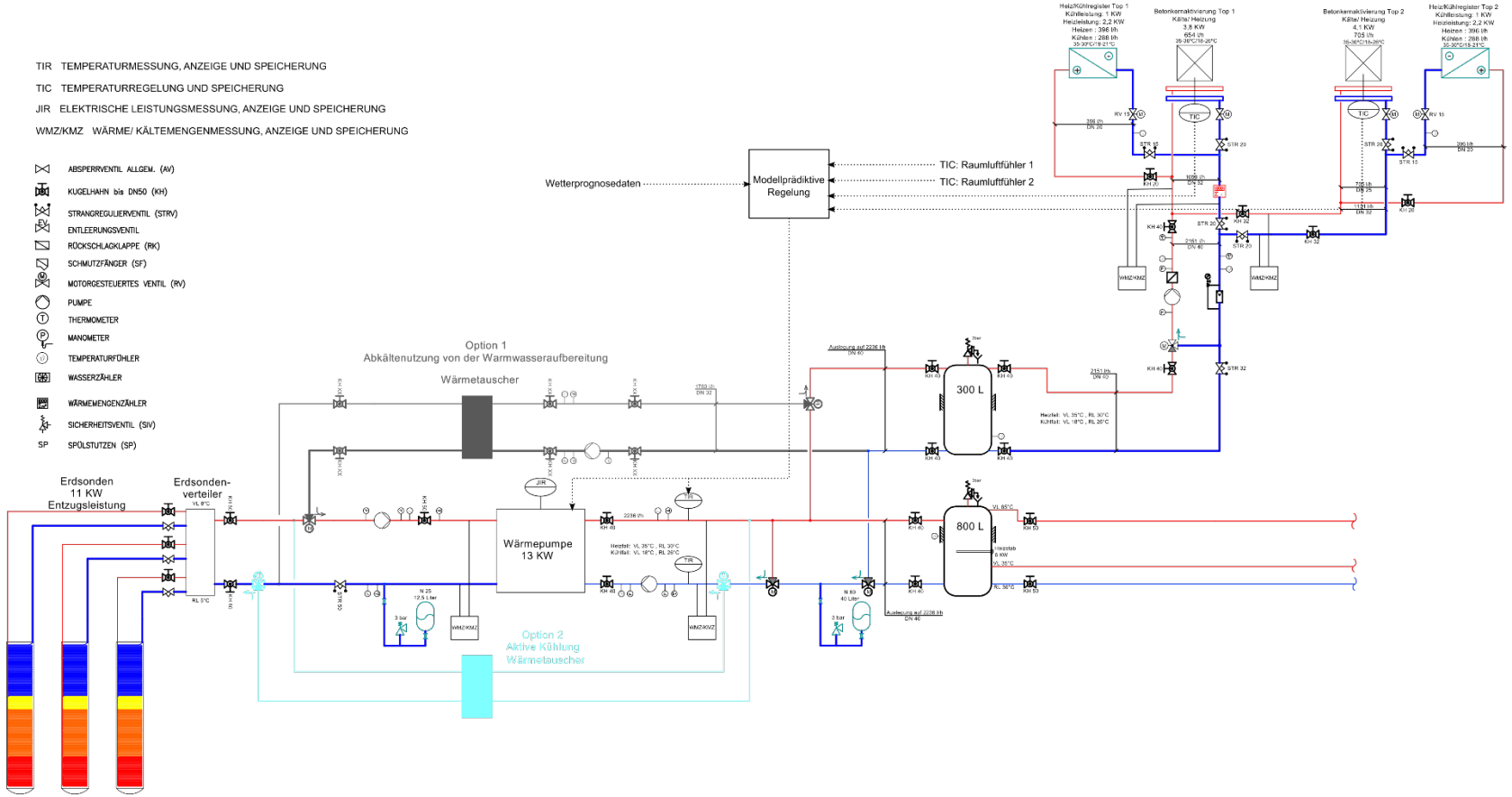

Abbildung 2: Ausgewählte Ausschnitte aus dem Messtechnikplan des Demo-Gebäudes. Dargestellt sind Heizsystem mit Wärmepumpe und Betonkernaktivierung inklusive Messstellen, sowie die Wirklinien der modellprädiktiven Regelung.

2.2 Planung von Haus-, Mess- und Regelungstechnik inkl. Datenerfassung

In diesem Kapitel wird der derzeitige Stand der Planung zur Haus- und Messtechnik detailliert beschrieben.

2.2.1 Thermische Bauteilaktivierung (TAB):

Die Raumheizung erfolgt in den Wohn- und Schlafräumen über thermisch aktive Betondecken (Betonkernaktivierung), die mit einer Sole/ Wasser- Wärmepumpe versorgt werden.

- Auslegungstemperaturen: Heizbetrieb: 30-35°C (<30°C lt. Kreč [9])
  Kühlbetrieb: 18-21°C (>20°C lt. Kreč [9])
- Kontrollierte Wohnraumlüftung mit hochwirksamer Wärmerückgewinnung

2.2.2 Wärmepumpe:

Zur Raumheizung, Luftnachwärmung und Warmwasserbereitung der Wohneinheiten wird eine Sole/Wasser-Wärmepumpe eingesetzt, die drei Erdsonden als Wärmequelle verwendet.

- 13 kW Heizleistung
- Wärmequelle: 3 Erdsonden á 120 m
- Leistungszahl B0/W35 nach EN 14511 (lt. Hersteller): 4.7
- Kältemittel: R410A
- Aktiver Heiz- und Kühlbetrieb bei Wärmepumpe möglich
- Warmwassererzeugung über Frischwassermodule, deren Heizwasser in einem Pufferspeicher vorgehalten wird

2.2.3 PV- System:

Zur Versorgung der Wärmepumpe und einer partiellen Eigenlastabdeckung wird eine Photovoltaikanlage installiert.

- PV-Generatorleistung: 3.51 kWp
- PV-Generatorfläche: 21.1m²
- Anzahl PV-Module: 13 á 270 Wp
- Ausrichtung: Süd
- Neigung: 10°

2.2.4 Messtechnik zur Datenerfassung

Das Demo-Gebäude wird mit entsprechender Messtechnik ausgestattet um das thermische Verhalten in der Bauteilaktivierung sowie die Effizienz des Heizsystems bestimmen zu können und den Wohnkomfort überwachen zu können. Primär werden Temperatursensoren, Feuchtesensoren und Wärme/ Kältezähler installiert.

2.2.4.1 Temperaturmessung thermische Bauteilaktivierung

- Pt100 Kabelfühler, 4-Leiter, 1/3 DIN B
- 20 Fühler direkt im Betonkern: 2 Räume zu je 2 x 5 Fühler
- Erfassung der Temperaturverläufe in der gesamten Betondecke (siehe Abb. 3)

2.2.4.2 Temperaturmessung zur Regelung der Pufferspeichertemperatur/ Wärmepumpenaustrittstemperatur

- Pt100 Kabelfühler, 4-Leiter, 1/3 DIN B
- Erfassung von Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe/ Pufferspeicher

2.2.4.3 Temperaturmessung zur Raumluftregelung

- Pt100 Fühler, 4-Leiter, 1/3 DIN B
- Räume zu je 1 Fühler
- Erfassung der Raumtemperatur im Wohn/ Essbereich

2.2.4.4 Temperaturmessung Innen- und Außenluft

- Testo Saveris 2:Funk-Datenlogger System mit WLAN
- Erfassung von Temperatur und Feuchte von Außenluft und Luft in den Innenräumen

2.2.4.5 Wärme/ Kältemenge

- Multical 302 Ultraschallzähler
- Erfassung von Wärme- und Kältemengen zur Bilanzierung des Gesamtsystems (in Kombination mit elektrischen Leistungsmessmodulen)
- Erfassung von Wärme/Kältemenge von Wärmequelle WP, Wärmesenke WP, Betonkernaktivierung 1, Betonkernaktivierung 2, Zirkulation, sowie Warmwasserbedarf in Wohnung 1 und Wohnung 2 (siehe Abb. 2)
- Getrennte Bilanzierung der Wärmepumpe im Heiz- bzw. Kühlbetrieb

2.2.5 Regelungstechnik und Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)

Das modellprädiktive Regelungskonzept wird auf einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) realisiert. Die für die Regelung nötigen Daten (Stellgröße Vorlauftemperatur Pufferspeicher, Regelgröße Wohnraumtemperatur bzw. gewünschter Raumtemperaturverlauf) werden zyklisch erfasst und verarbeitet. Nebenbedingungen, wie ein möglichst hoher solarer Deckungsgrad der Photovoltaikanlage zur Versorgung der Wärmepumpe etc., können zusätzlich berücksichtigt werden. Der Optimierungsalgorithmus generiert auf Basis von Wetterprognosedaten und einem angenommenen Heizleistungsverlauf einen prognostizierten Raumtemperaturverlauf und optimiert den Heizleistungsverlauf iterativ solange, bis der prognostizierte Raumtemperaturverlauf dem Solltemperaturverlauf hinreichend gut entspricht. Dabei werden zeitlich näherliegende Abweichungen vom Sollwert stärker gewichtet. Der Regler berücksichtigt auch die gemessenen Istwerte und eine Neuberechnung erfolgt in Intervallen von 10 bis 60 Minuten. Die Wetterprognosedaten werden automatisiert von einem Wetterdienst bezogen und stündlich aktualisiert.

2.2.5.1 Detaildaten der SPS:

- X20-System inkl. 12,1“ Touch Power Panel 500
- Intel® Atom™ processor
- 2 GB SDRAM
- Ethernet, RS232 und USB-Schnittstelle
- Temperatur-Eingangsmodule pt100, 4-Leitertechnik, Auflösung: 0,01°C
- Analoge Eingangsmodule +/-10 V, 0-20 mA oder 4-20 mA, 13 Bit
- Analoge Ausgangsmodule +/-10 V, 0-20 mA oder 4-20 mA, 13 Bit
- Digitale Eingangsmodule
- Digitale Ausgangsmodule
- Energie/ Leistungsmessmodule (Schein-, Wirk- und Blindleistung)

- Schnittstellenmodule M-Bus Master (bis zu 64 Slaves) zur Einbindung der Wärme/ Kältemengenzähler

2.2.6 Datenerfassung

Die Datenaufzeichnung, -speicherung und -verarbeitung erfolgt, wie die Regelung des Heizsystems, mit einer speicherprogrammierbaren Steuerung. Dazu werden die Daten in regelmäßigem Abstand erfasst und auf einen extern angeschlossenen FDP-Server gespeichert. Daten, die nicht direkt in der SPS eingebunden sind, werden über WLAN erfasst, zeitlich synchronisiert und ebenfalls auf den externen Server abgelegt.

- Erfassung der Daten im 1 – 15 Minutentakt
- Datenerfassung über SPS und Speicherung auf externer Festplatte (FDP-Server auf extern angeschlossenem Laptop)
- Erfassung von:
    - Temperaturen in den Betondecken
    - Außenlufttemperatur
    - Innenraumtemperaturen
    - Vorlauftemperatur Wärmepumpe/ Pufferspeicher
    - Rücklauftemperatur Wärmepumpe/ Pufferspeicher
    - Wärme/ Kältemengen Wärme/Kältemenge von Wärmequelle WP, Wärmesenke WP, Betonkernaktivierung 1, Betonkernaktivierung 2, Zirkulation, sowie Warmwasserbedarf in Wohnung 1 und Wohnung 2
    - Elektrische Leistung der Wärmepumpe

3 Bestimmung des Verhaltens der thermischen Bauteilaktvierung

Im Zuge des Projekts wird eine direkte Vermessung der Betonkernaktivierung durch eingebaute Temperaturfühler realisiert. Im Querschnitt der Betondecke sind in definierter Höhe Temperaturfühler angeordnet, mit denen die Temperaturverteilung in der Decke sowie das dynamische Verhalten der aktivierten Betonkerne bestimmt wird. In beiden Wohneinheiten werden jeweils 2 Messstellen erfasst. Die Messergebnisse fließen in die Modellierung des prädiktiven Regelungskonzepts ein.

3.1 Kalibration Temperaturfühler

Zur Bestimmung des thermischen Verhaltens des Temperaturkerns werden, wie in Abschnitt 3.2 erläutert, in Summe 20 Temperaturfühler (2 Messtellen pro Wohn/ Essraum zu je 5 Temperaturfühler). Als Temperaturfühler werden PT100 mit einer Genauigkeit von 1/3DIN verwendet. Die Kalibration der Temperaturfühler erfolgte vor der Installation mittels temperiertem Wasserbad und einem Vergleichsthermometer. Die Temperaturfühler T1 – T10 werden in Wohneinheit 1 verbaut, die Temperaturfühler T11 – T20 in Wohneinheit 2. In Abbildung 3 und Abbildung 4 sind als repräsentative Beispiele die Kalibrationskurven der Temperaturfühler T1 und Temperaturfühler T11 dargestellt.

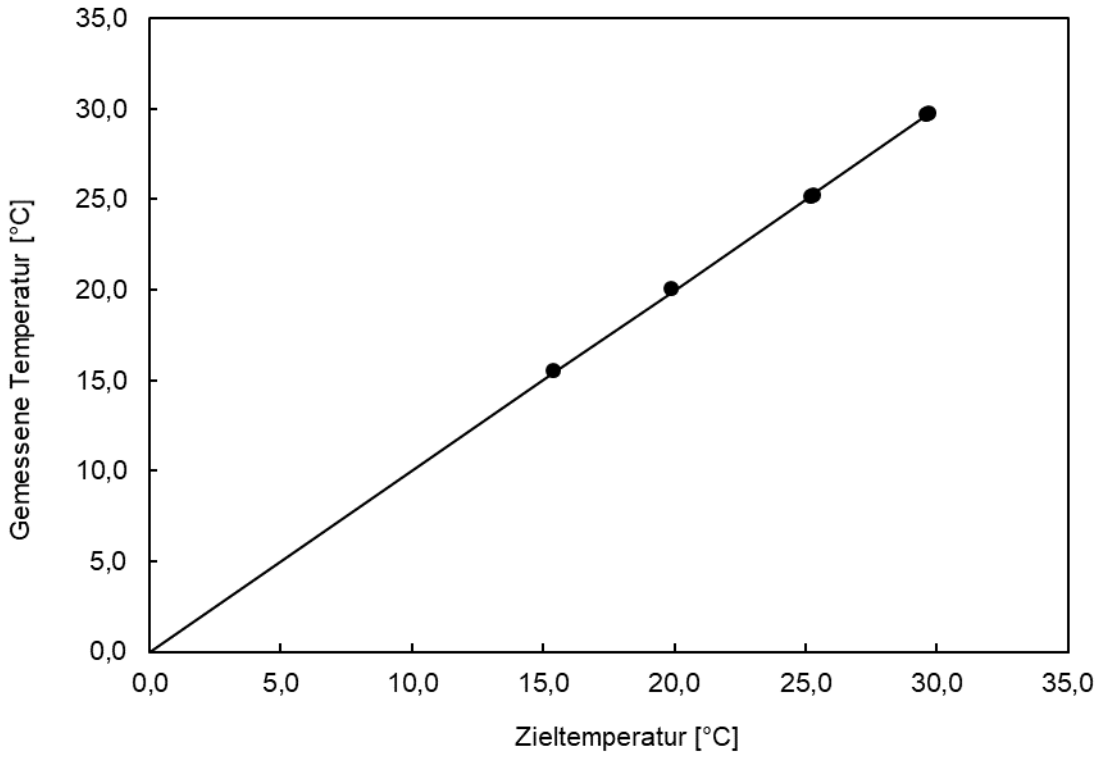

Abbildung 3: Darstellung der Kalibrationskurve für T1 für Wohneinheit 1.

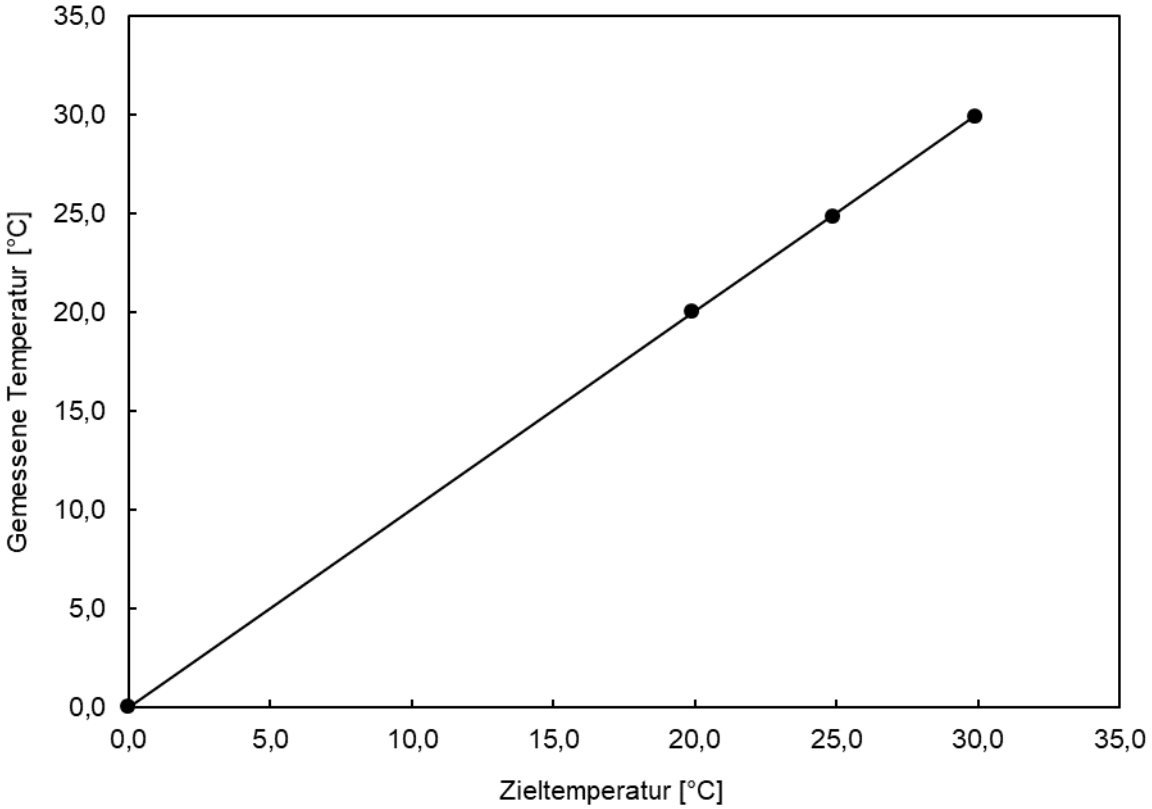

Abbildung 4: Darstellung der Kalibrationskurve für T11 für Wohneinheit 2.

3.2 Einbau Temperaturfühler in TAB

Der Einbau der kalibrierten Temperaturfühler erfolgt bei der Fertigung der thermisch aktivierten Betondecke. Dazu werden die Temperaturfühler mittels gefertigter Abstandshalterung direkt in die Decke einbetoniert. Im Wohn/ Essbereich der jeweiligen Wohneinheit werden die Temperaturfühler mittig im Raum in der Decke angebracht. Pro Messstelle sind 5 Temperaturfühler in gleichmäßigem Abstand im Betonkern verbaut, wobei pro Wohnraum 2 Messstellen angeordnet sind. Abbildung 5 zeigt eine Schnittdarstellung des Betonkerns mit einer Anordnung der integrierten Temperaturfühler. Um die Position der Temperaturfühler im während der Einbringung des Betons zu fixieren, werden die Temperaturfühler in einer, mittels 3D-Druck gefertigten, Abstandshalterung aus ABS-Polymer montiert. Abbildung 6 zeigt eine Messanordnung mit 5 Temperaturfühler fixiert in der Abstandshalterung.

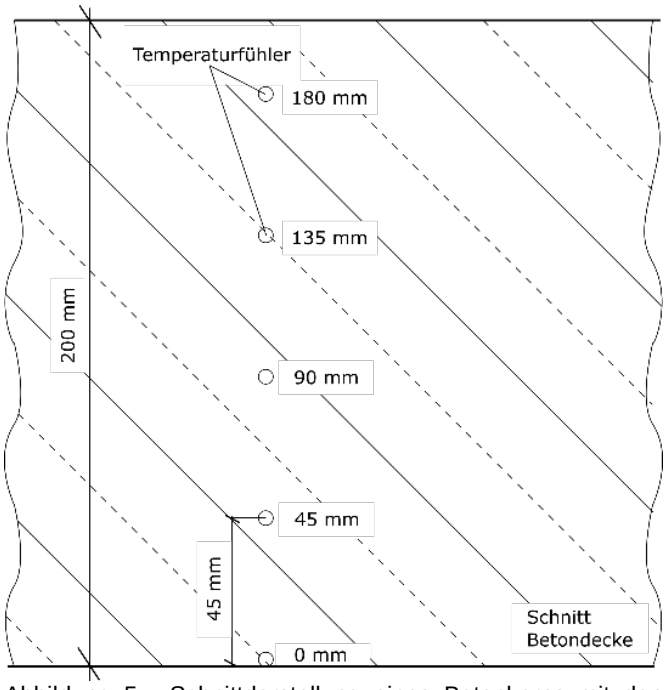

Abbildung 5: Schnittdarstellung eines Betonkerns mit den integrierten Temperaturfühlern (Estrich, Oberdecke und Bewährung nicht dargestellt).

Abbildung 6: Messanordnung zur Bestimmung des Temperaturgradienten im Betonkern, bestehend aus 5 Temperaturfühlern und einer Vorrichtung zur Abstandsfixierung der Temperaturfühler im Betonkern.

4 Versuchsdurchführung – Fotostrecke

Die Abbildungen 7 – 23 zeigen das Demoprojekt, den Baufortschritt und die Montage der Temperaturfühler in den aktivierten Betondecken.

Abbildung 7,8: Visualisierung Demoprojekt Doppelhaus Purkersdorf

Abbildung 9: Verlegung der Bauteilaktivierung

Abbildung 10: Verlegung der Bauteilaktivierung

Abbildung 11: Verlegemuster Bauteilaktivierung

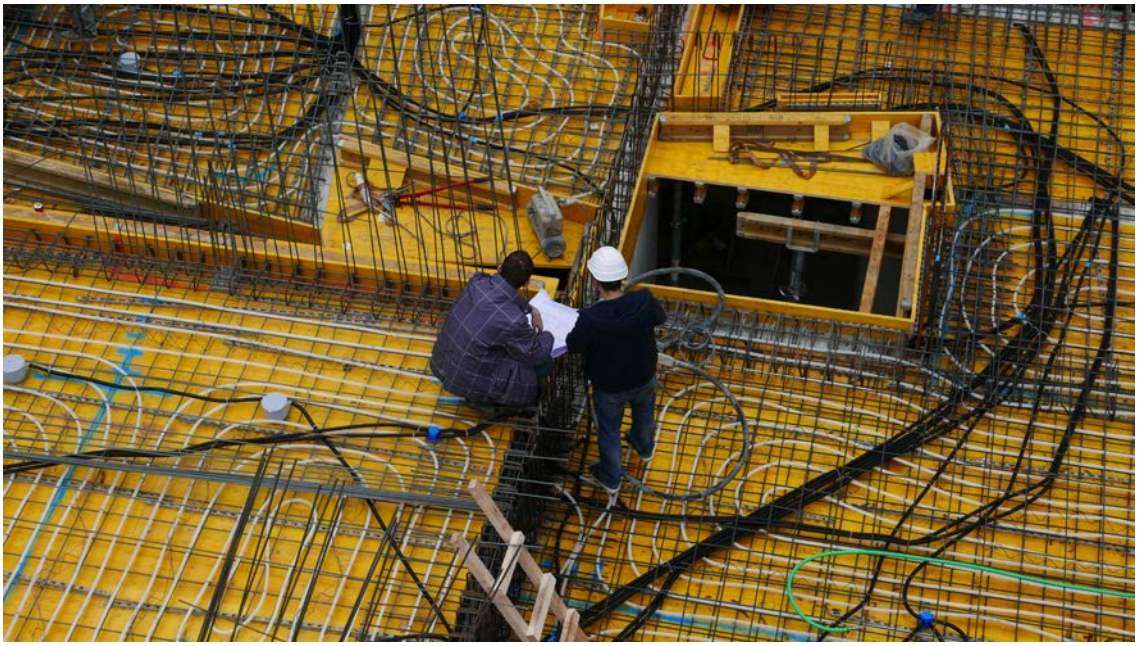

Abbildung 12: Verlegemuster Bauteilaktivierung

Abbildung 13: Befestigung der Schläuche an den Bewehrungsmatten

Abbildung 14: Verteiler Bauteilaktivierung

Abbildung 15: Positionierung der Temperaturfühler

Abbildung 16: Einbringen des flüssigen Betons in die thermisch aktivierte Decke von Wohneinheit 1. Die Temperaturfühler, fixiert in der Abstandshalterung, sind mittels rotem Kreis in der Abbildung markiert.

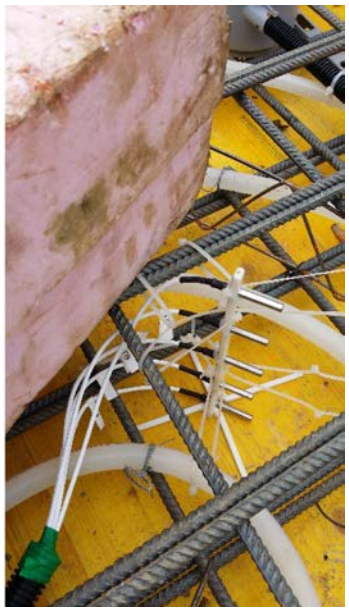

Abbildung 17: Detaildarstellung der Temperaturfühler in der Abstandshalterung. Die Abstandshalterung ist am Bewehrungsstahl fixiert.

Abbildung 18: Die Temperaturmessstelle wird im Betonkern vergossen (rote Markierung).

Abbildung 5: Die Temperaturfühler in der Abstandshalterung mit der Fixierung an der Bewehrung. Die Abstandshalte-rung ist aus einem ABS-Copolymer mittels 3D-Druck gefertigt.

Abbildung 20: Durchführung der Tiefenbohrungen

Abbildung 21: Wechsel des Bohrgestänges

Abbildung 22: Bohrgerät

Abbildung 23: Fertiggestellter Rohbau von Südwesten

4.1 Ausblick

Sobald das Demo-Gebäude in Betrieb genommen wird, wird mit dem Monitoring des Heizsystems begonnen. Um das thermische Verhalten der aktivierten Bauteile zu bestimmen, wird vom Heizsystem eine Sprungfunktion an den aktivierten Betonkern gesendet, und, in zeitlicher Abhängigkeit, die Sprungantwort der TAB gemessen. Damit kann die Trägheit des Betonkerns bestimmt und für eine prädiktive Regelung des Heizsystems herangezogen werden.

5 Literatur

[1] K. Kreč, "Zur Wärmespeicherung in Baukonstruktionen," *Gesundheits - Ingenieur - Haustechnik - Bauphysik - Umwelttechnik 114,* vol. 1, 1993.

[2] J. E. Braun, "Reducing energy costs and peak electrical demand through optimal control of building thermal storage," in *1990 Annual Meeting of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Technical and Symposium Papers*, 1990 Atlanta, GA, St. Louis, MO, USA, Publ. by ASHRAE, pp. 876-888.

[3] D. Kolokotsa, D. Rovas, E. Kosmatopoulos, and K. Kalaitzakis, "A roadmap towards intelligent net zero- and positive-energy buildings," *Solar Energy,* vol. 85, pp. 3067-3084, 10.1016/j.solener.2010.09.001, 2011.

[4] G. Bianchini, M. Casini, A. Vicino, and D. Zarrilli, "Demand-response in building heating systems: A Model Predictive Control approach," *Applied Energy,* vol. 168, pp. 159-170, 10.1016/j.apenergy.2016.01.088, 2016.

[5] M. Fiorentini, J. Wall, Z. Ma, J. H. Braslavsky, and P. Cooper, "Hybrid model predictive control of a residential HVAC system with on-site thermal energy generation and storage," *Applied Energy,* vol. 187, pp. 465-479, 10.1016/j.apenergy.2016.11.041, 2017.

[6] M. Schmelas, T. Feldmann, and E. Bollin, "Adaptive and predictive control of Thermally Activated Building Systems," in *2014 ASHRAE/IBPSA-USA Building Simulation Conference*, 2014, pp. 72-79.

[7] E. Carrascal-Lekunberri, I. Garrido, B. Van Der Heijde, A. J. Garrido, J. M. Sala, and L. Helsen, "Energy conservation in an office building using an enhanced blind system control," *Energies,* vol. 10, 10.3390/en10020196, 2017.

[8] J. Hoell and E. Bollin, "Reviewing the load shift potential of thermally Activated Building Systems applying Model Predictive Control," in *Proceedings - 2015 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies, ICSGCE 2015*, 2016, pp. 12-17.

[9] K. Kreč, "Konditionierung und Energiespeicherung im Passivhaus mittels thermischer Aktivierung von Stahlbetondecken," in *Expertenforum Energiespeicher Beton*, 2017.

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Komponenten einer Passivhaus- oder Plus-Energie-Haus-Regelungsarchitektur (HVAC: heating, ventilation, air conditioning) – Abbildung aus Kolokotsa, et al. [3]. 4
Abbildung 2: Ausgewählte Ausschnitte aus dem Messtechnikplan des Demo-Gebäudes..... 6
Abbildung 3: Darstellung der Kalibrationskurve für T1 für Wohneinheit 1.....10
Abbildung 4: Darstellung der Kalibrationskurve für T11 für Wohneinheit 2.....11
Abbildung 5: Schnittdarstellung eines Betonkerns mit den integrierten Temperaturfühlern...12
Abbildung 6: Messanordnung zur Bestimmung des Temperaturgradienten im Betonkern. ...12
Abbildung 7: Visualisierung Demoprojekt Doppelhaus Purkersdorf. 13
Abbildung 8: Visualisierung Demoprojekt Doppelhaus Purkersdorf. 13
Abbildung 9: Verlegung der Bauteilaktivierung. 14
Abbildung 10: Verlegung der Bauteilaktivierung. 14
Abbildung 11: Verlegemuster Bauteilaktivierung.....15
Abbildung 12: Verlegemuster Bauteilaktivierung.....15
Abbildung 13: Befestigung der Schläuche an den Bewehrungsmatten. 16
Abbildung 14: Verteiler Bauteilaktivierung. 16
Abbildung 15: Positionierung der Temperaturfühler. 16
Abbildung 16: Einbringen des flüssigen Betons in die thermisch aktivierte Decke 17
Abbildung 17: Detaildarstellung der Temperaturfühler in der Abstandshalterung. 17
Abbildung 18: Die Temperaturmessstelle wird im Betonkern vergossen.....17
Abbildung 19: Die Temperaturfühler in der Abstandshalterung mit der Fixierung an der Bewehrung.. 17
Abbildung 20: Durchführung der Tiefenbohrungen. 18
Abbildung 21: Wechsel des Bohrgestänges. 18
Abbildung 22: Bohrgerät. 18
Abbildung 23: Fertiggestellter Rohbau von Südwesten..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**