

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Kierownik instytutu
Prof. Dr. Philip Leistner
Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Dr.-Ing. Mohammad Aleysa
Kierownik grupy
Verbrennungs- und Umweltschutztechnik Abteilung
Umwelt, Hygiene und Sensorik
Telefon +49 711 970-3455 | Fax -970-3385
mohammad.aleysa@ibp.fraunhofer.de
www.ibp.fraunhofer.de

RAPORT Z BADANIA ZACHOWANIA GRZEWCZEGO OPARTEGO NA TERMODYNAMICZNIE PRACUJĄCYM CZYNNIKU CHŁODNICZYM SYSTEMU OGRZEWANIA FIRMY SOFFIO

Raport składa się
z 24 stron tekstu
z 6 tabelami
i 16 rysunkami

Stuttgart, dnia 30.03.2020 r.

Dr.-Ing. Mohammad Aleysa

Spis treści

1 Opis badanego systemu ogrzewania ściennego	3
2 Przeprowadzone badania	5
2.1 Badanie mocy cieplnej modułu grzewczego w stanie niezabudowanym	6
2.2 Badanie zachowania grzewczego i mocy cieplnej modułu grzewczego w stanie zabudowanym	9
2.2.1 Moc cieplna modułu grzewczego w stanie zabudowanym w ścianie wewnętrznej	11
2.2.2 Moc cieplna modułu grzewczego w stanie zabudowanym w ścianie zewnętrznej	13
2.2.3 Absolutne i specyficzne różnice temperatur w badanym systemie ogrzewania	14
2.3 Rozkład temperatury w ścianie próbnej	16
2.4 Straty ciśnienia w systemie ogrzewania ściennego	20
2.5 Badanie wytrzymałości ciśnieniowej/szczelności	21
3 Zalecenia i charakterystyka projektowania systemu ogrzewania ściennego	21
3.1 Obliczanie ilości wymaganych paneli grzewczych	21
3.2 Obliczanie maksymalnej liczby paneli grzewczych w rzędzie grzewczym	23
3.3 Obliczanie strat ciśnienia w systemie ogrzewania ściennego	24

1 Opis badanego systemu ogrzewania ściennego

System ogrzewania ściennego firmy Soffio jest montowany z pojedynczych paneli grzewczych za pomocą odpowiedniego, odpornego na ciśnienie, wodoszczelnego systemu połączeń. Każdy panel grzewczy składa się z kilku prętowych elementów grzewczych (rysunek 1), które są wypełnione gazowym, przyjaznym dla środowiska czynnikiem chłodniczym, zgodnie ze specyfikacją zleciodawcy, przez co wewnątrz panuje lekkie nadciśnienie. W dolnej części każdego panelu grzewczego znajduje się grubościenny kanał wodny, do którego elementy grzewcze są wciskane lub wkręcane, przez co wchodzi w pośredni kontakt z ciepłą wodą. Ciepło potrzebne do podgrzania wypełniacza jest dostarczane przez ciepłą wodę. Gdy przepływa przez niego ciepła woda, czynnik jest podgrzewany i jego pary unoszą się do góry wewnątrz elementów grzewczych. Ruch czynnika rozprowadza ciepło w całym elemencie grzewczym i uwalnia je odpowiednio powoli. Im wyższa temperatura wody lub wyższy przepływ ciepłej wody, tym więcej ciepła może być przekazywane przez elementy grzewcze i udostępniane do ogrzewania.



Rysunek 1: Panel grzewczy firmy Soffio.

Czyste aluminium jest używane do produkcji elementów grzewczych lub paneli według specyfikacji producenta w celu osiągnięcia wysokiej wytrzymałości na ściskanie i wysokiej jakości produktu. Dokładne dane techniczne zastosowanego czynnika, jak również żywotność wewnętrzna prętów grzewczych nie są znane i stanowią know-how producenta.

Należy wspomnieć, że powyższe informacje lub opis produktu zostały zaczerpnięte z danych i dokumentacji producenta.

2 Przeprowadzone badania

W celu określenia i scharakteryzowania zachowania grzewczego systemu ogrzewania ściennego firmy Soffio wykorzystano specjalne urządzenie techniczne (tzw. pomieszczenie kalorymetryczne), które nadaje się do określania bilansów energetycznych różnych systemów grzewczych i elementów budowlanych i zostało opracowane w instytucie Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP [Instytut Fizyki Budowlanej Fraunhofer IBP].



Rysunek 2: Techniczne urządzenia badawcze (pomieszczenie kalorymetryczne) do określania bilansów energetycznych.

W pomieszczeniu kalorymetrycznym można również ustawić stałe klimatyczne warunki pracy (ciśnienie, wilgotność względna i temperatura), które z reguły mogą wpływać na wydajność systemu ogrzewania poprzez przenoszenie ciepła, jak również rozprrowadzenie ciepła w pomieszczeniu w różnym stopniu.

W ramach badania zachowania grzewczego systemu ogrzewania ściennego firmy Soffio uwzględniono następujące zastosowania.

- ❖ Określenie mocy cieplnej modułu grzewczego w stanie niezabudowanym w celu zmierzenia największej możliwej mocy cieplnej lub wykrycia wpływu zabudowy systemu pod warstwą tynku.
- ❖ Określenie mocy cieplnej modułu grzewczego w stanie zabudowanym, przy użyciu ściany próbnej zgodnie z danymi producenta. W tym przypadku zastosowania zbadano zastosowanie systemu ogrzewania w ścianach wewnętrznych, jak również w ścianach zewnętrznych poprzez silne chłodzenie zewnętrznej strony ściany próbnej.

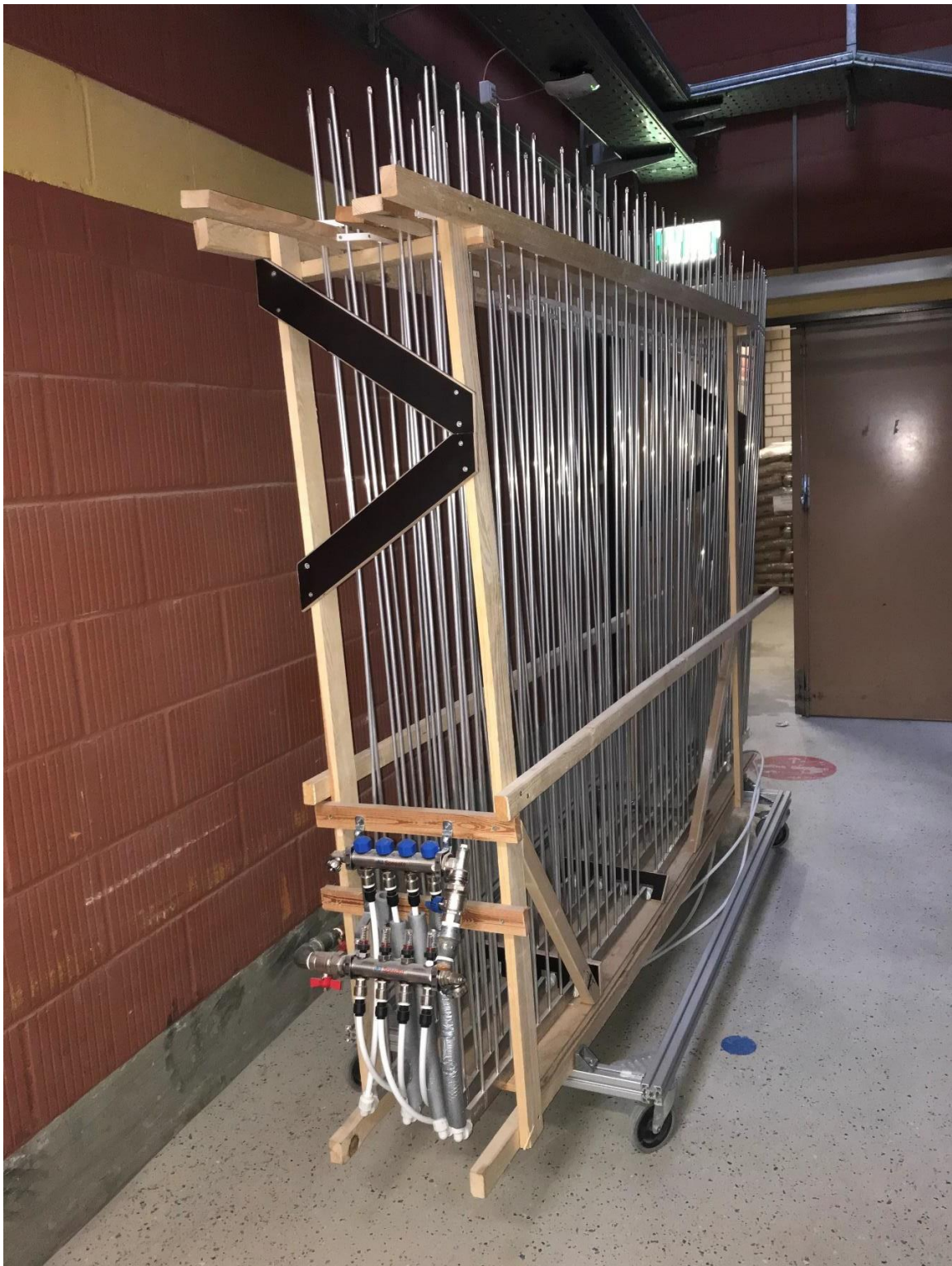


Rysunek 3: Różne warstwy ściany próbnej.

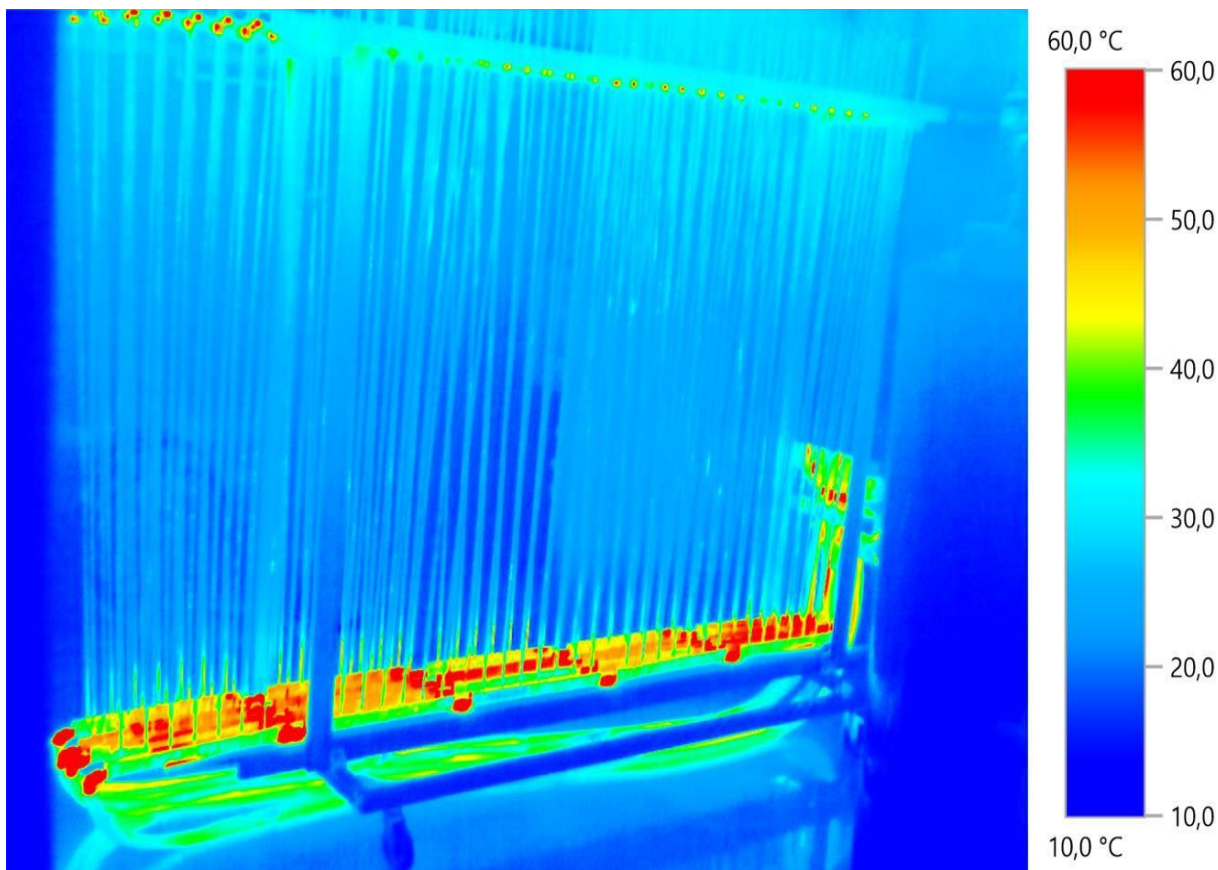
Zasilanie systemu ogrzewania w ciepłą wodę przy określonych i stałych temperaturach oraz przepływach ciepłej wody odbywa się za pomocą dodatkowego urządzenia, które jest stosowane poza pomieszczeniem kalorymetrycznym. Urządzenie to składa się z trzech połączonych równolegle elektrycznych nagrzewnic przepływowych o łącznej mocy elektrycznej ok. $72 \text{ kW}_{\text{elek}}$. Ponadto za pomocą tego urządzenia rejestrowane i korygowane są przepływy masy wraz z temperaturą zasilania i powrotu. Wszystkie rury wodne i armatura stosowane poza systemem ogrzewania ściennego są izolowane w celu zminimalizowania bezpośrednich strat ciepła.

2.1 Badanie mocy cieplnej modułu grzewczego w stanie niezabudowanym

Celem tego wariantu badań jest scharakteryzowanie zachowania się modułów grzewczych lub systemu ogrzewania w stanie niezakłóconym, przy minimalnej emisji ciepła lub mocy cieplnej ze względu na niekorzystne warunki pracy czynnika. W celu przeprowadzenia badań skonstruowano i zbadano system ogrzewania ściennego składający się z sześciu modułów grzewczych/paneli grzewczych połączonych szeregowo (patrz rysunek 1). Badania prowadzono w otoczeniu pustym w temperaturze $20 \pm 1^\circ\text{C}$ lub przy różnych wartościach przepływu ciepłej wody (100 kg/h, 200 kg/h, 300 kg/h i 400 kg/h) oraz temperaturze przepływu 40°C i 60°C . Ustawienie temperatury otoczenia na poziomie $20 \pm 1^\circ\text{C}$ osiągnięto poprzez schłodzenie ścian pomieszczenia badawczego (pomieszczenia kalorymetrycznego).



Rysunek 4: System ogrzewania ściennego firmy Soffio w stanie niezabudowanym.



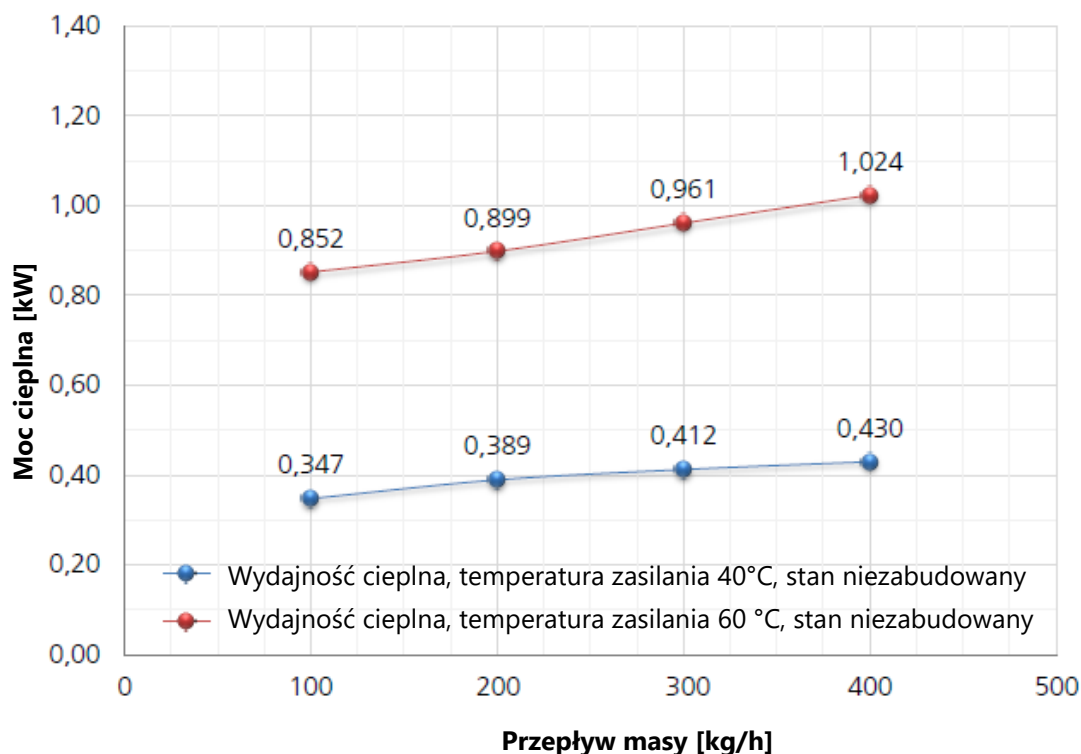
Rysunek 5: Obraz termiczny systemu ogrzewania ściennego firmy Soffio w stanie niezabudowanym.

Na początku badań zmontowano i zbadano system ogrzewania składający się z 20 modułów. Ze względu na niewystarczającą wydajność chłodniczą pomieszczenia kalorymetrycznego oraz bezpośrednią porównywalność z zabudowanym wariantem musiały one zostać zredukowane do sześciu. System wykazał porównywalne zachowanie grzewcze zarówno dla 20 jak i 6 modułów.

Całkowita moc cieplna badanego modułu grzewczego, który składa się z sześciu paneli grzewczych, została przedstawiona w tabeli 1 i na rysunku 6.

Tabela 1: Moc cieplna modułu grzewczego w kilowatach [kW], w stanie niezabudowanym.

Temperatura zasilania [°C]	Przepływ ciepłej wody [kg/h].			
	100	200	300	400
40 [°C]	0,347	0,389	0,412	0,430
60 [°C]	0,852	0,899	0,961	1,024



Rysunek 6: Moc cieplna modułu grzewczego w kilowatach [kW], w stanie niezabudowanym.

Tabela 1 i wykres na rysunku 6 pokazują, że im większy jest przepływ ciepłej wody i temperatura zasilania, tym więcej ciepła może zostać pochłonięte przez elementy grzewcze i w konsekwencji oddane. Widać również, że ponad 80% mocy cieplnej można uzyskać przy przepływie ciepłej wody o wartości 100 kg/h. Podwyższenie temperatury zasilania ma znacznie większy wpływ na wydajność cieplną systemu ogrzewania niż wzrost przepływu ciepłej wody.

Ze względu na brak energii aktywującej czynnika, moc cieplna w stanie niezabudowanym stanowi minimalną moc cieplną, jaką system ogrzewania może zapewnić przy danej temperaturze pomieszczenia. W trakcie badań stwierdzono, że im wyższa temperatura otoczenia elementów grzewczych, tym szybsze i bardziej aktywne staje się przekazywanie i rozprowadzenie ciepła przez czynnik. W stanie zabudowanym można oczekiwać wyższej mocy cieplnej, niezależnie od zastosowanego tynku.

2.2 Badanie zachowania grzewczego i mocy cieplnej modułu grzewczego w stanie zabudowanym

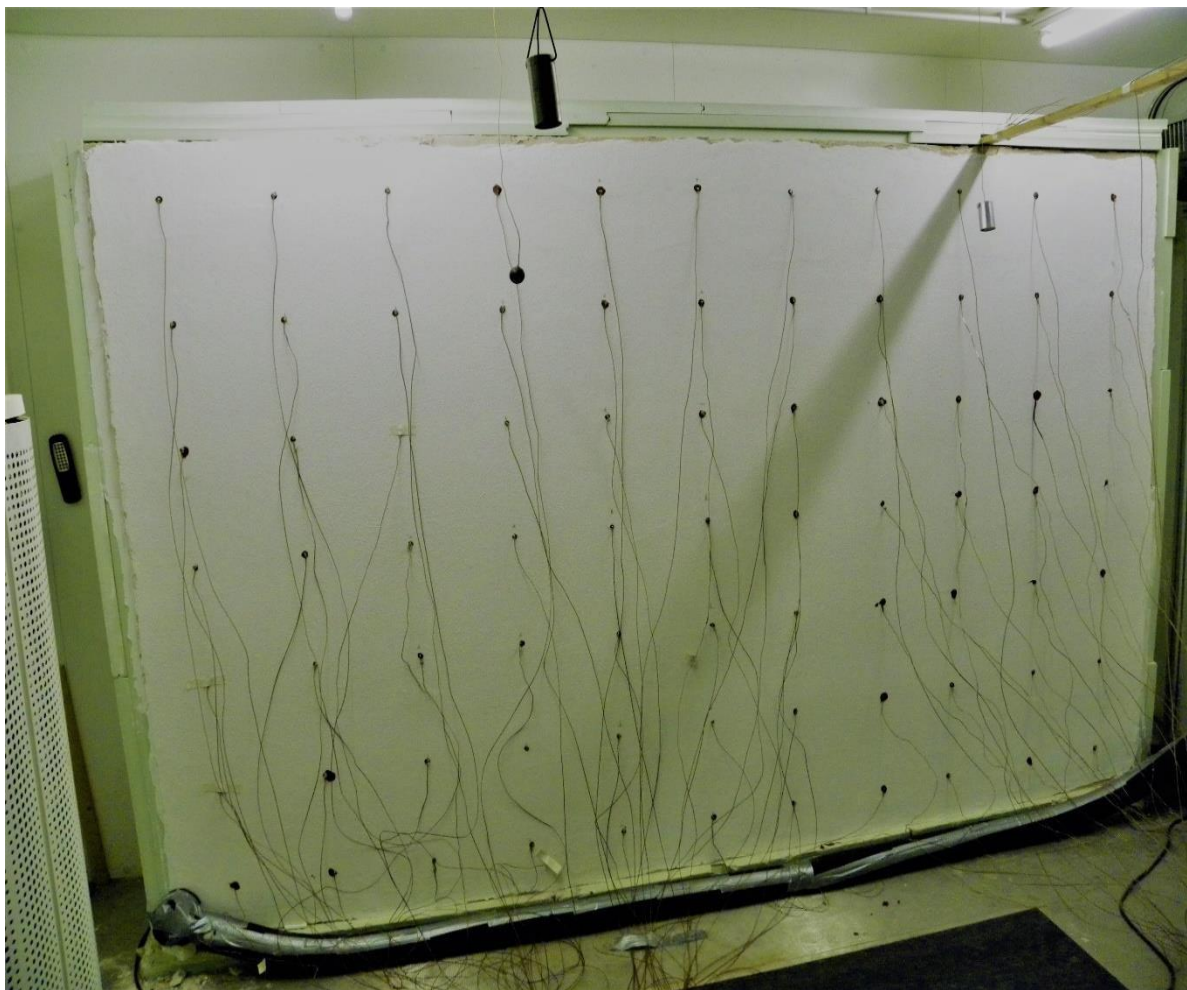
W tym wariantcie badania system ogrzewania składający się z sześciu elementów grzewczych, z których każdy jest połączony szeregowo z sześcioma modułami grzewczymi, został skonstruowany analogicznie do pierwszego wariantu badania i zintegrowany ze ścianą próbną zgodnie z zaleceniami producenta.

Wydajność systemu grzewczego w niechłodzonym pomieszczeniu ze ścianą próbną, która symulowała instalację systemu grzewczego w ścianach wewnętrznych budynku. Przeprowadzono również symulację w przypadku zabudowania w zewnętrznej ścianie budynku. W tym celu, pomieszczenie ze ścianą zabudowaną zostało silnie schłodzone (do -6°C).



Rysunek 7: System ogrzewania ściennego składa się z sześciu modułów grzewczych połączonych szeregowo i przymocowanych do przykładowej ściany.

Badania w warunkach ścian wewnętrznych i zewnętrznych prowadzono w otoczeniu pustym w temperaturze $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ lub przy różnych wartościach przepływu ciepłej wody (100, 200, 300 i 400 kg/h) oraz temperaturze przepływu 40°C i 60°C . Temperatura otoczenia wynosząca $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ jest osiągnięta głównie poprzez chłodzenie ścian pomieszczenia badawczego (pomieszczenia kalometrycznego). W tym wariantcie badania mierzono nie tylko moc cieplną, ale także wytrzymałość ciśnieniową systemu ogrzewania, opór przepływu lub stratę ciśnienia przy różnych prędkościach przepływu ciepłej wody oraz temperaturach powierzchni. Temperatury powierzchni mierzono selektywnie (rysunek 8) przy użyciu odpowiednich czujników temperatury, jak i kamery termowizyjnej. Ustalono przy tym niezbędny czas, w którym zostały osiągnięte maksymalne temperatury na ścianie próbnej przy odpowiednich ustawieniach.



Rysunek 8: Pomiar temperatur powierzchni na ścianie próbnej w stanie zabudowanym systemu ogrzewania.

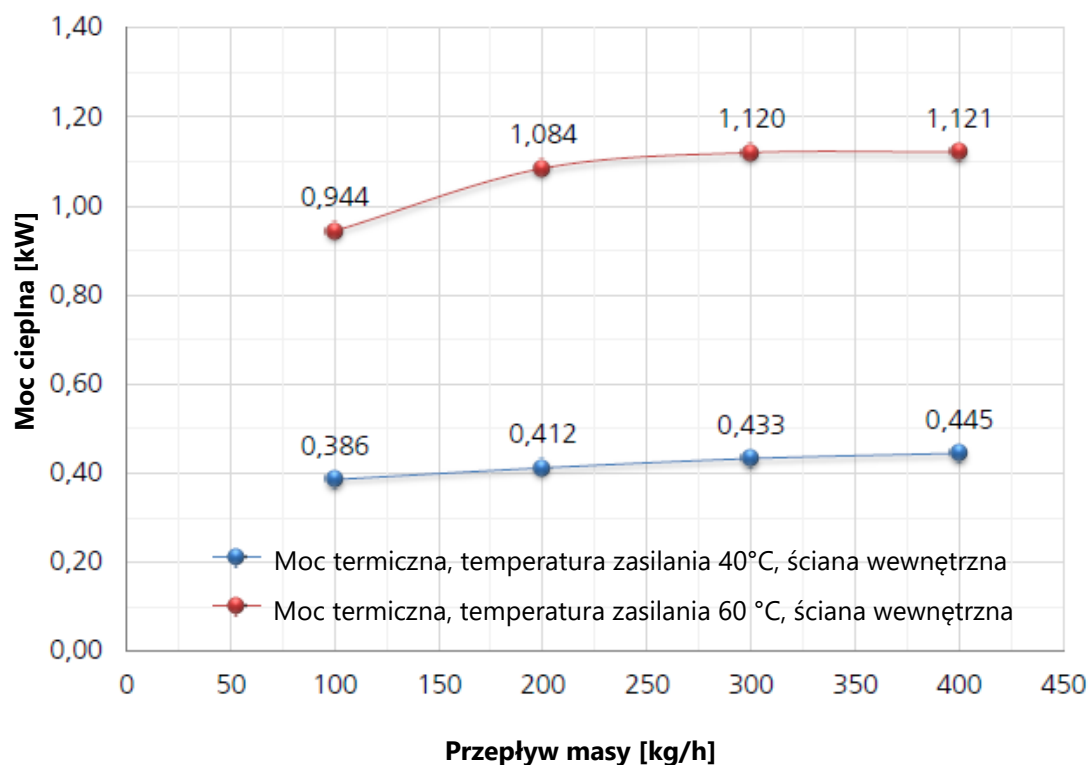
Rysunek 8 przedstawia badany system ogrzewania składający się z sześciu modułów grzewczych, który został zainstalowany w ścianie próbnej w pomieszczeniu badawczym.

2.2.1 Moc cieplna modułu grzewczego w stanie zabudowanym w ścianie wewnętrznej

Tabela 2 oraz wykres na rysunku 9 przedstawiają wartości lub przebiegi mocy cieplnej systemu ogrzewania ściennego (składającego się z sześciu paneli grzewczych połączonych szeregowo). Tabela 2 i rysunek 9 pokazują, że system ogrzewania ściennego zapewnia wyższą wydajność cieplną przy tych samych temperaturach zasilania i przepływie ciepłej wody niż w przypadku jego stanu niezabudowanego. Wynika to z faktu, że energia aktywująca jest dostarczana czynnikowi skuteczniej i dzięki temu system ogrzewania ściennego może szybciej osiągnąć korzystny punkt pracy. Zgodnie z badaniem w stanie niezabudowanym system ogrzewania wykazuje porównywalną charakterystykę grzewczą lub podobny przebieg krzywej.

Tabela 2: Moc cieplna w kilowatach [kW] modułu grzewczego w stanie zabudowanym w ścianie wewnętrznej (przestrzeń za ścianą próbną nie jest chłodzona).

Temperatura zasilania [°C]	Przepływ ciepłej wody [kg/h].			
	100	200	300	400
40 [°C]	0,386	0,412	0,433	0,445
60 [°C]	0,944	1,084	1,120	1,121



Rysunek 9: Moc cieplna w kilowatach [kW] modułu grzewczego w stanie zabudowanym w ścianie wewnętrznej (przestrzeń za ścianą próbną nie jest chłodzona).

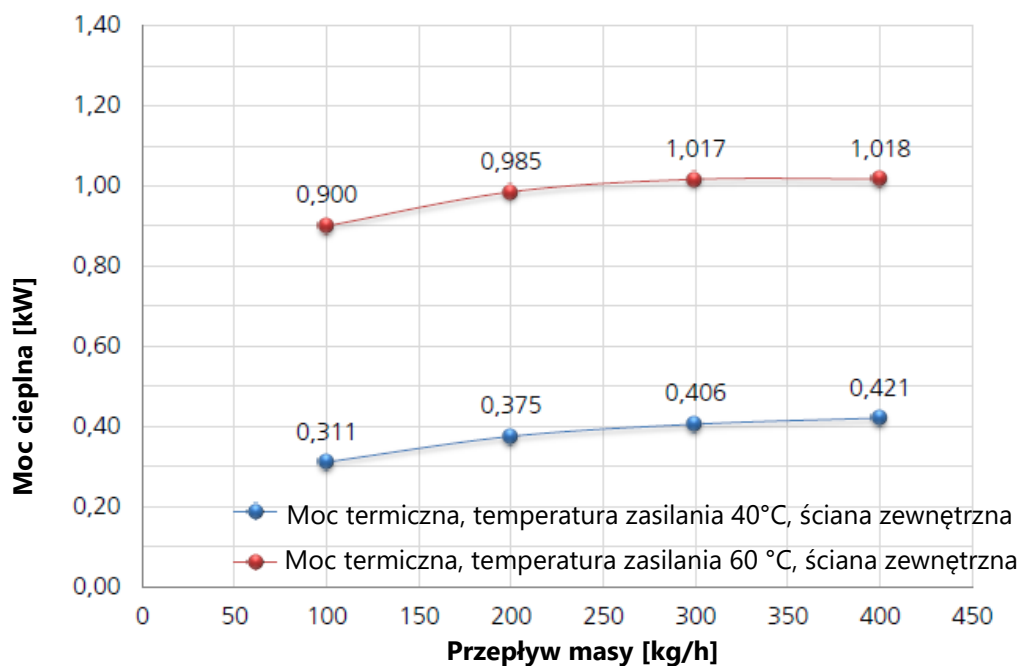
Widać, że im większy jest przepływ ciepłej wody i temperatura zasilania, tym więcej ciepła może zostać pochłonięte przez elementy grzewcze i w konsekwencji oddane. Widać również, że ponad 85 % mocy cieplnej można uzyskać przy przepływie ciepłej wody o wartości 100 kg/h. Podwyższenie temperatury zasilania ma znacznie większy wpływ na wydajność cieplną systemu ogrzewania ściennego niż wzrost przepływu ciepłej wody. Z tego powodu parametr temperatury zasilania jest technicznie bardziej przydatny do sterowania mocą cieplną systemu ogrzewania ściennego niż masowego przepływu ciepłej wody. Zwiększanie przepływu ciepłej wody do ponad 200 kg/h nie jest celowe, ponieważ można w ten sposób osiągnąć jedynie ograniczony wzrost mocy cieplnej i nadmierny wzrost strat ciśnienia.

2.2.2 Moc cieplna modułu grzewczego w stanie zabudowanym w ścianie zewnętrznej

W przypadku zastosowania systemu ogrzewania ściennego w ścianie zewnętrznej, działanie czynnika może ulec pogorszeniu z powodu niskich temperatur na zewnątrz. Im niższa temperatura po zewnętrznej stronie ściany lub modułu grzewczego, tym wyższe temperatury zasilania i przepływy ciepłej wody muszą być ustawione, aby zapewnić energię cieplną niezbędną do aktywacji czynnika.

Tabela 3: Moc cieplna w kilowatach [kW] modułu grzewczego, gdy jest zabudowany w ścianie zewnętrznej (przestrzeń za ścianą próbną jest schładzana do -8°C).

Temperatura zasilania [$^{\circ}\text{C}$]	Przepływ ciepłej wody [kg/h].			
	100	200	300	400
40 [$^{\circ}\text{C}$]	0,311	0,375	0,406	0,421
60 [$^{\circ}\text{C}$]	0,900	0,985	1,017	1,018



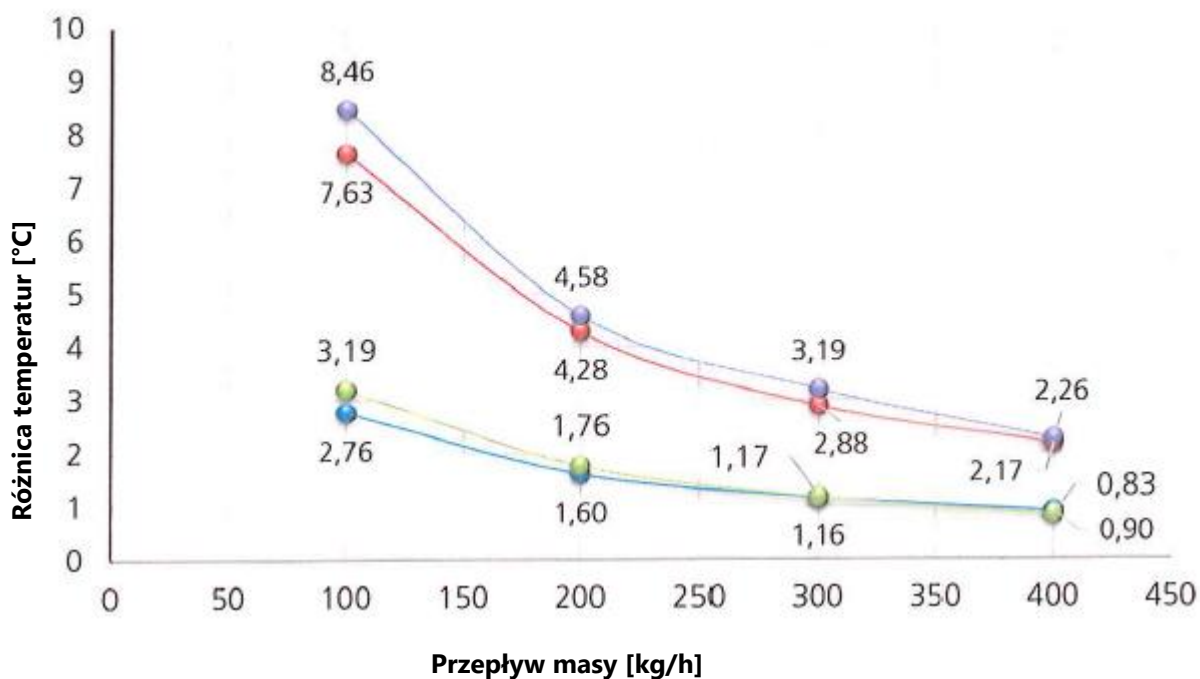
Rysunek 10: Rozkład mocy cieplnej w stanie zabudowanym z symulowaną ścianą zewnętrzną (przestrzeń za ścianą próbną jest schładzana do -8°C).

Porównując krzywe wydajności cieplnej ściany wewnętrznej i zewnętrznej, można zauważyć, że przebiegi krzywych są identyczne, przy czym wydajność cieplna stosowanego systemu ogrzewania ściennego jest o ok. 10% wyższa w przypadku zastosowania w ścianie wewnętrznej niż w ścianie zewnętrznej, np. przy temperaturze zasilania 60°C . W trakcie badań zaobserwowano również, że przy zastosowaniu w ścianie wewnętrznej i przy wysokich temperaturach zasilania system ogrzewania ściennego może szybciej osiągnąć korzystny punkt pracy, a tym samym stan ustalony lub może szybciej osiągnąć maksymalną możliwą temperaturę powierzchni niż w przypadku stosowania w ścianie zewnętrznej.

W celu eksploatacji systemu ogrzewania ściennego, szczególnie w przypadku zastosowania w ścianie zewnętrznej, zaleca się na początku ustawić maksymalną temperaturę zasilania i po osiągnięciu korzystnej temperatury roboczej, w zależności od istniejącego zapotrzebowania na ciepło, ustawić ją na niższą lub odpowiednią do istniejącego zapotrzebowania na ciepło.

2.2.3 Absolutne i specyficzne różnice temperatur w badanym systemie ogrzewania

Gdy gorąca woda przepływa przez panele grzewcze lub przez system ogrzewania, temperatura wody spada w kierunku od panelu grzewczego do panelu grzewczego, na skutek przekazywania ciepła do czynnika. Spadek temperatury wzdłuż ściany próbnej lub systemu ogrzewania nie jest liniowy i jest proporcjonalny do trasy przepływu. Przy wysokich temperaturach spadek jest większy niż przy niższych.



- Różnica temperatur, temperatura zasilania 40°C, ściana zewnętrzna
- Różnica temperatur, temperatura zasilania 60 °C, ściana zewnętrzna
- Różnica temperatur, temperatura zasilania 40°C, ściana wewnętrzna
- Różnica temperatur, temperatura zasilania 60 °C, ściana wewnętrzna

Rysunek 11: Różnica temperatur lub różnica pomiędzy wlotem i wylotem badanego systemu ogrzewania (ściana próbna składająca się z sześciu wbudowanych modułów grzewczych) (rysunek 7, rysunek 8) przy różnych wartościach przepływu ciepłej wody i temperaturach zasilania lub wlotowych 40°C i 60°C.

Tabela 4: Specyficzna i bezwzględna różnica temperatur przy stosowaniu systemu ogrzewania ściennego w ścianie zewnętrznej przy różnych przepływach ciepłej wody i temperaturach zasilania (temperatury wlotowe) 40°C i 60°C.

	Przepływ ciepłej wody [kg/h].			
Temperatura zasilania [°C]	100	200	300	400
Absolutna różnica temperatur [°C]				
40 [°C]	1,86	1,61	1,16	0,9
60 [°C]	7,63	4,28	2,88	2,17
Specyficzna różnica temperatur [°C/panel grzewczy]				
40 [°C]	0,31	0,27	0,19	0,15
60 [°C]	1,27	0,71	0,48	0,36

Tabela 5: Specyficzna i bezwzględna różnica temperatur przy stosowaniu System ogrzewania ściennego w ścianie wewnętrznej o różnych przepływach ciepłej wody i temperaturach zasilania (temperatury wlotu) 40°C i 60°C.

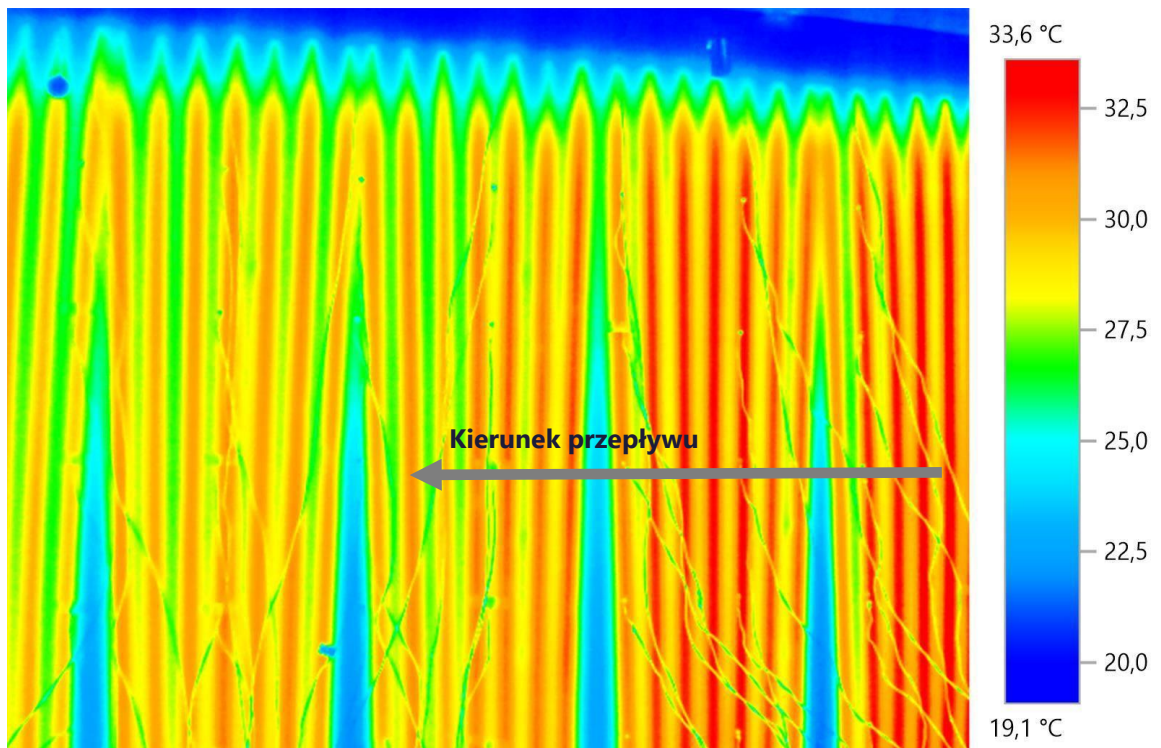
	Przepływ ciepłej wody [kg/h].			
Temperatura zasilania [°C]	100	200	300	400
Absolutna różnica temperatur [°C]				
40 [°C]	3,19	1,77	1,17	0,84
60 [°C]	8,46	4,58	3,19	2,26
Przeciętna, specyficzna różnica temperatur AT_{spz} [°C/panel grzewczy]				
40 [°C]	0,53	0,30	0,20	0,14
60 [°C]	1,41	0,76	0,53	0,38

Bezwzględną i specyficzną różnicę temperatur w przypadku stosowania systemu ogrzewania ściennego w ścianie zewnętrznej i wewnętrznej o różnych przepływach ciepłej wody i temperaturach zasilania (temperaturach wlotowych) wynoszących 40°C i 60°C przedstawiono na wykresie na rysunku 11 oraz w tabeli 4 i tabeli 5. Ze schematu przedstawionego na rysunku 11 oraz w tabelach 4 i 5 wynika, że im wyższa wlotowa temperatura zasilania i im niższy przepływ ciepłej wody, tym większa jest różnica temperatur bezwzględnych, a w konsekwencji i specyficzna różnica temperatur pomiędzy wlotem i wylotem systemu ogrzewania. Ciepło przekazywane do czynnika jest proporcjonalne do spadku temperatury. Określenie spadku temperatury wody pomiędzy wlotem i wylotem, jest konieczne do obliczenia maksymalnej liczby paneli grzewczych, które mogą być połączone w rzędzie bez zakłócania wydajności układu.

2.3 Rozkład temperatury w ścianie próbnej

Rysunek 12 przedstawia zdjęcie wykonane przez kamerę termowizyjną podczas pracy systemu ogrzewania ściennego przy temperaturze zasilania 40°C i przepływie wody 200 kg/h. Widać, że elementy grzewcze znajdujące się bliżej wlotu ciepłej wody działają szybciej i stają się odpowiednio cieplejsze niż elementy grzewcze znajdujące się bliżej wylotu. Po pewnym czasie wynoszącym ok. 100 minut wszystkie elementy grzewcze, jak również powierzchnia ściany próbnej osiągną maksymalne temperatury.

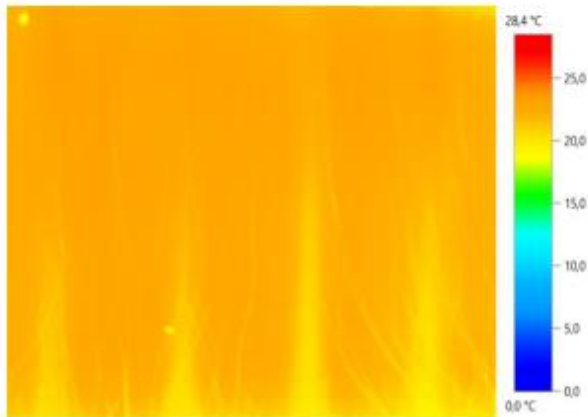
W trakcie eksploatacji systemu ogrzewania ściennego ustalono za pomocą kamery termowizyjnej, że na powierzchni ściany, która ma bezpośredni kontakt z elementami grzewczymi, występują stosunkowo wyższe temperatury. Im wyższa jest temperatura zasilania lub przepływ ciepłej wody, tym wyższe i bardziej równomierne temperatury są osiągnane na powierzchni ściany próbnej.



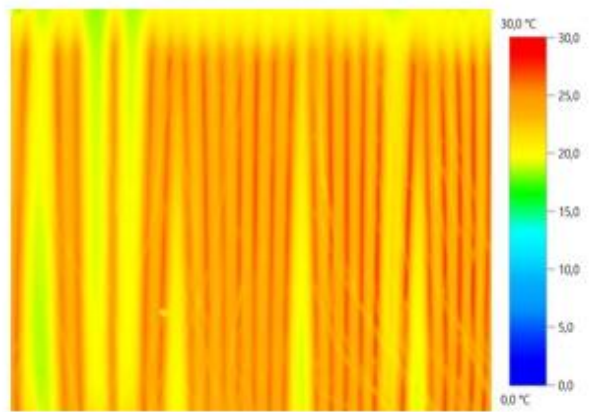
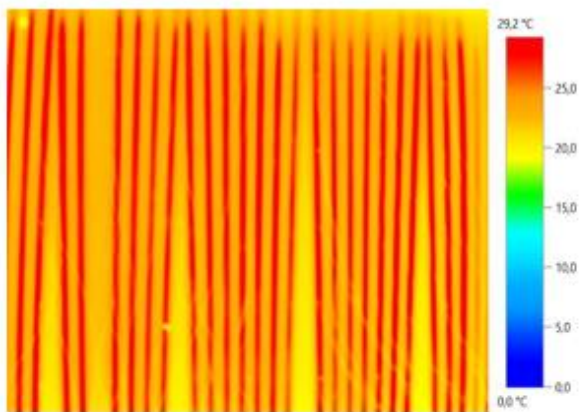
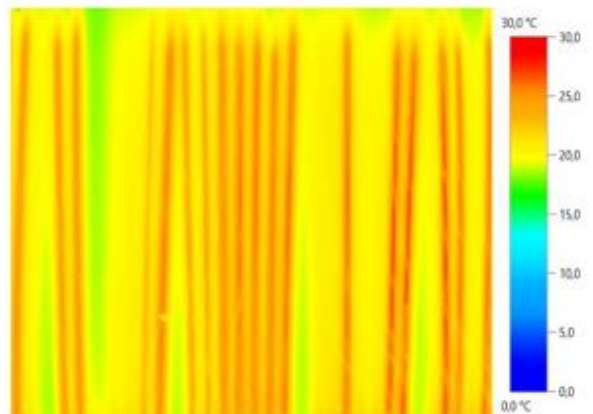
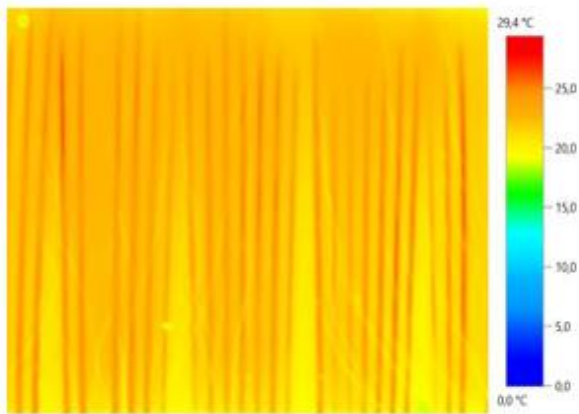
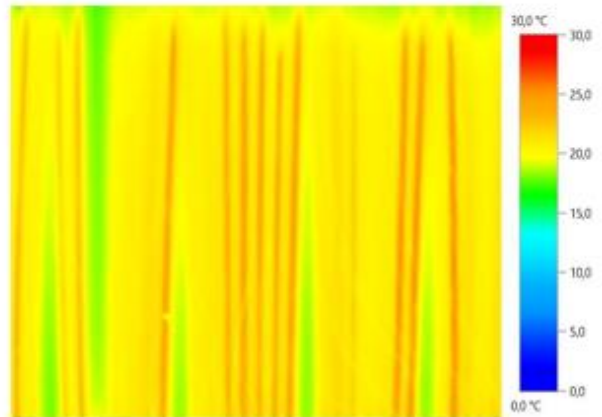
Rysunek 12: Rozprowadzenie ciepła w ścianie próbnej przy zastosowaniu systemu ogrzewania ściennego (sześć paneli grzewczych lub modułów grzewczych) firmy Soffio.

Rysunek 12 pokazuje zmiany temperatury powierzchni podczas pracy systemu ogrzewania ściennego przy temperaturze zasilania 40°C (prawy rząd zdjęć) i 60°C (lewy rząd zdjęć) przy przepływie ciepłej wody 200 kg/h. Widać, że przy temperaturze zasilania 60°C można osiągnąć wyższą i bardziej jednolitą temperaturę na powierzchni ściany próbnej w stanie ustalonym niż przy temperaturze zasilania 40°C.

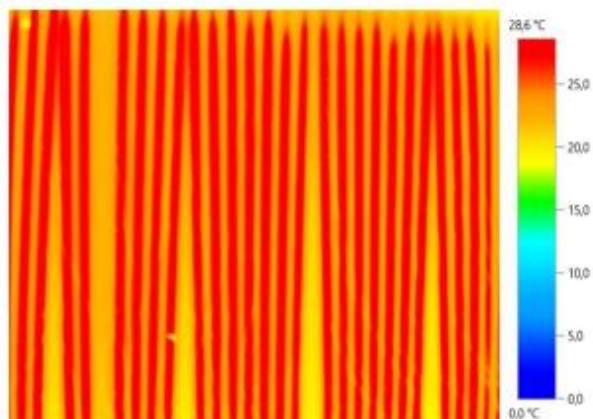
**Temperatura zasilania 60 [°C],
Przepływ ciepłej wody 200 [kg/h].**



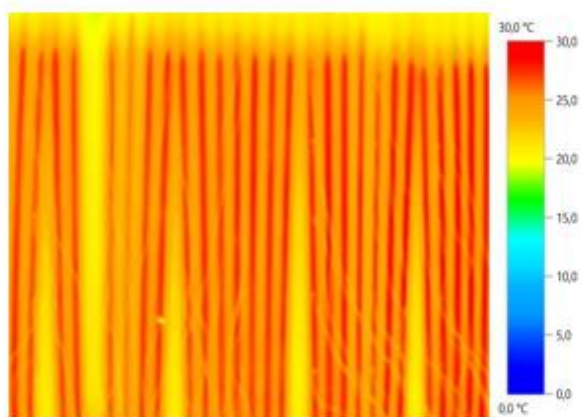
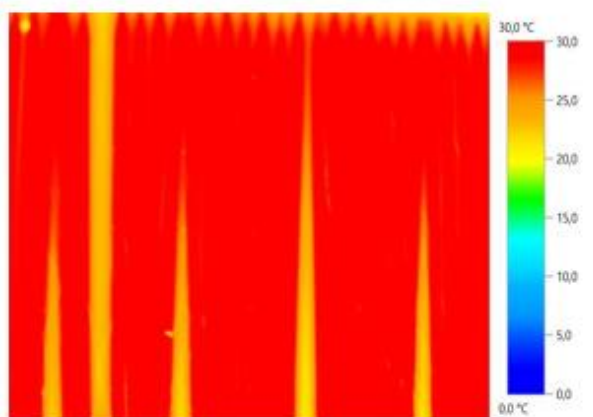
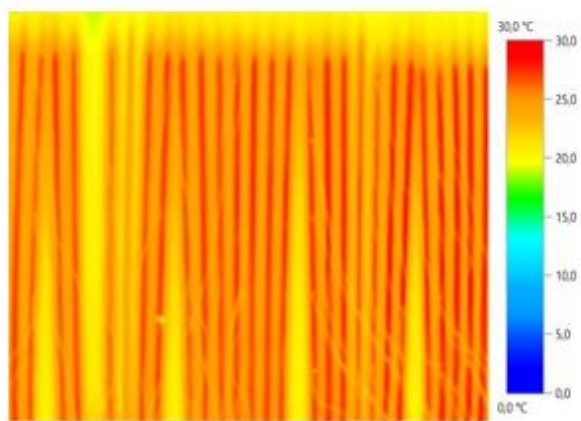
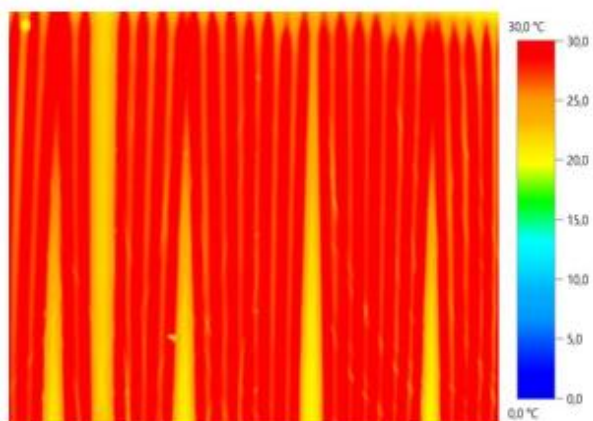
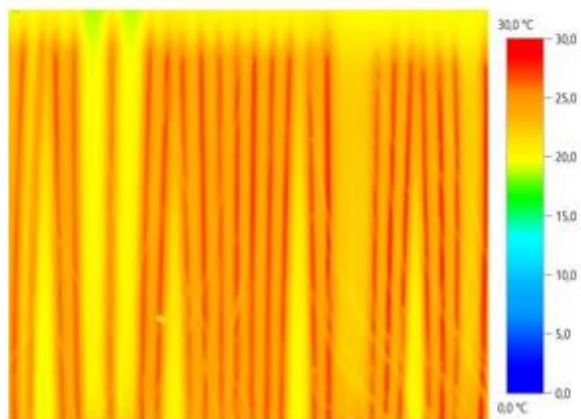
**Temperatura zasilania 40 [°C],
Przepływ ciepłej wody 200 [kg/h].**



**Temperatura zasilania 60 [°C],
Przepływ ciepłej wody 200 [kg/h].**

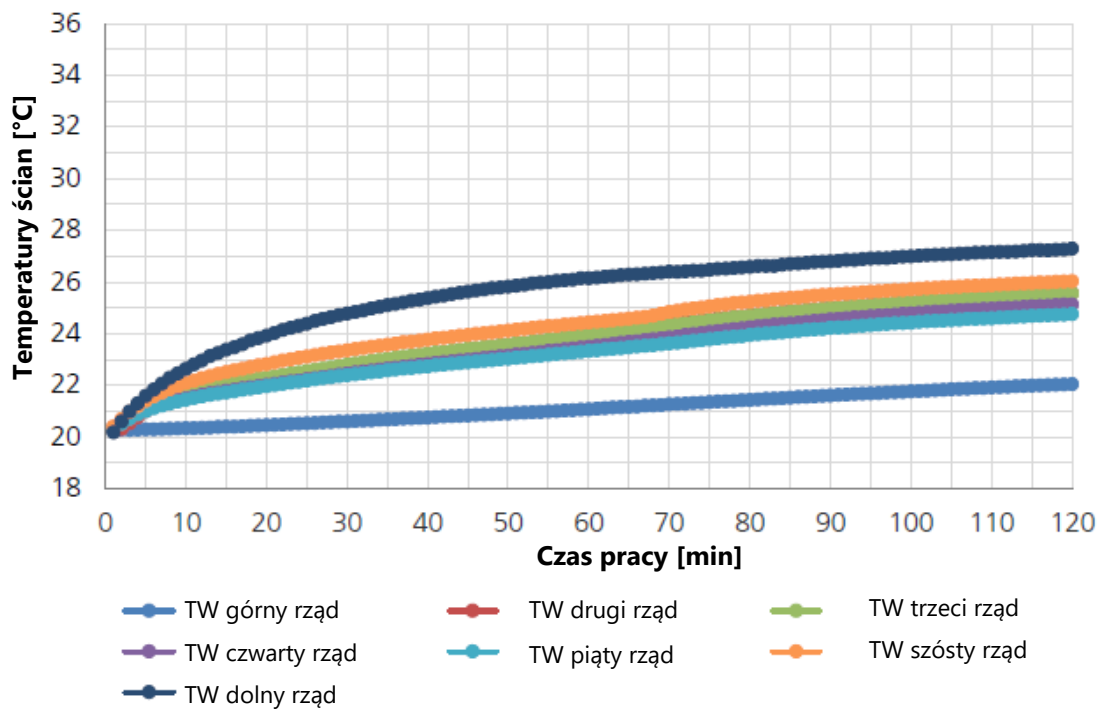


**Temperatura zasilania 40 [°C],
Przepływ ciepłej wody 200 [kg/h].**

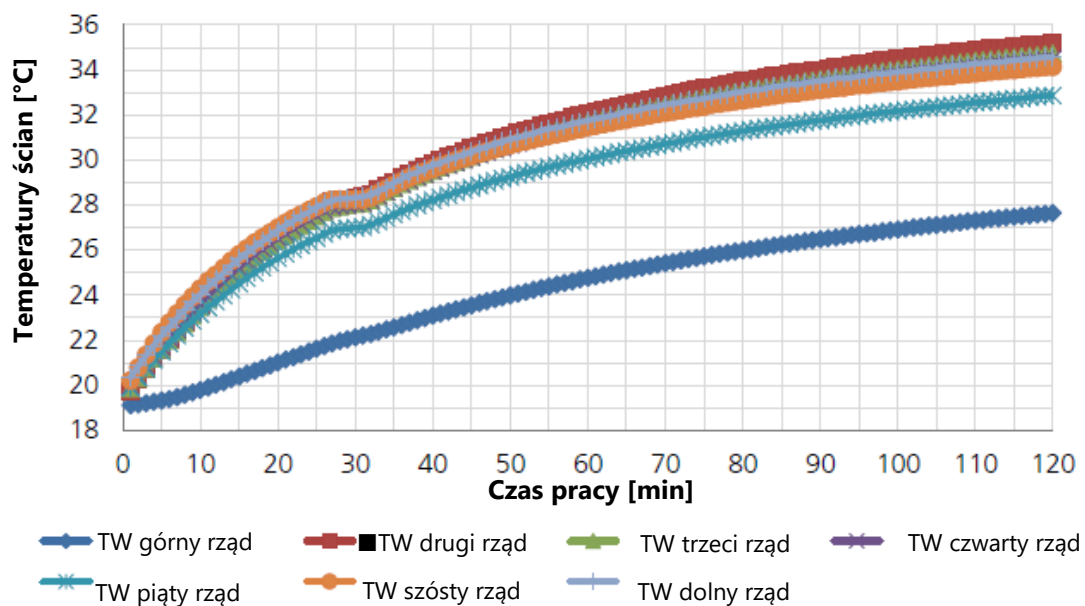


Rysunek 13: Zmiany temperatury powierzchni podczas pracy systemu ogrzewania ściennego przy temperaturze zasilania 40°C (prawy rząd zdjęć) i 60°C (lewy rząd zdjęć) przy przepływie ciepłej wody 200 kg/h.

Rysunki 14 i 15 przedstawiają temperatury powierzchni mierzone w określonych punktach na początku eksploatacji w temperaturze 20°C do momentu osiągnięcia stanu ustalonego lub stałego zachowania się temperatury.



Rysunek 14: Krzywe temperatury powierzchni podczas pracy przy temperaturze zasilania 40°C i przepływie ciepłej wody 400 kg/h.



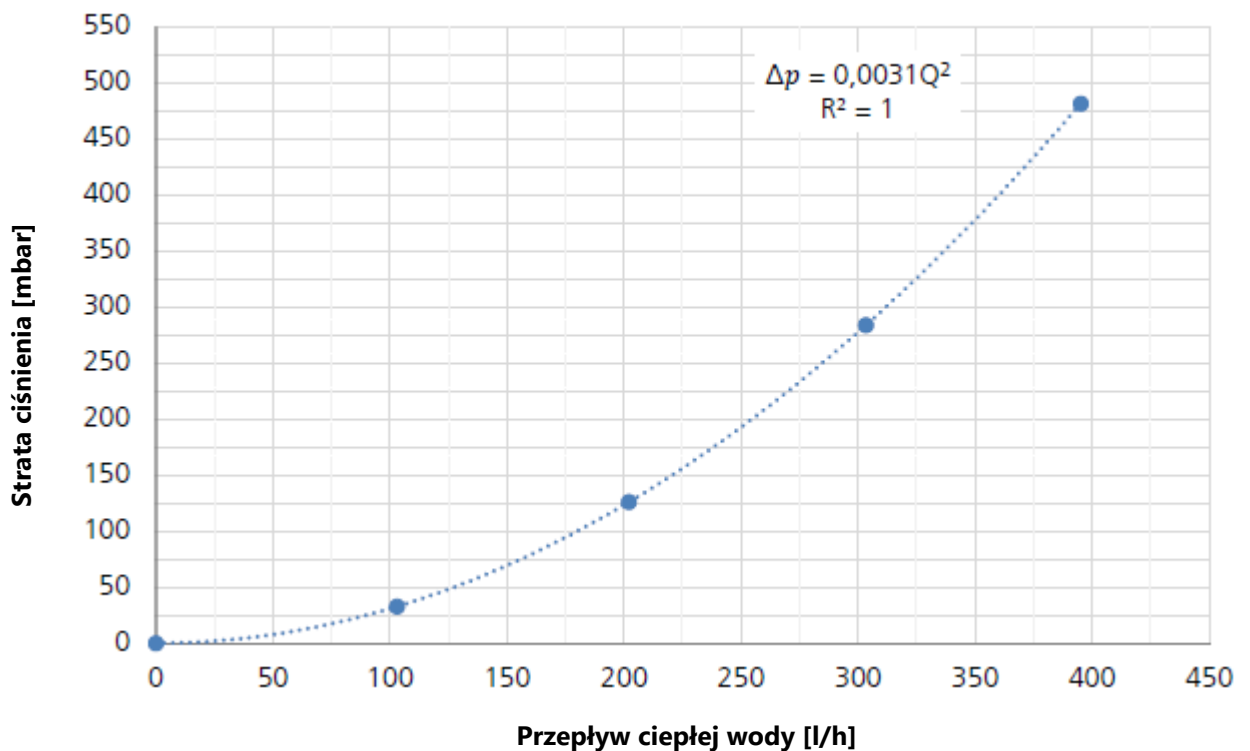
Rysunek 15: Krzywe temperatury powierzchni podczas pracy przy temperaturze zasilania 60°C i przepływie ciepłej wody 400 kg/h.

Jak widać na dwóch rysunkach 14 i 15, temperatury powierzchni w odpowiednich punktach pomiarowych są przy temperaturze zasilania 60°C o około 10°C wyższe i rozmieszczone bliżej siebie niż przy temperaturze zasilania 40°C. Na całej ścianie próbnej można było zmierzyć jednorodną temperaturę powierzchni wynoszącą ok. 35°C.

2.4 Straty ciśnienia w systemie ogrzewania ściennego

W celu doboru odpowiednich pomp wodnych i ogólnego projektu systemu ogrzewania ściennego niezbędne są informacje na temat wymaganej całkowitej mocy cieplnej lub liczby paneli grzewczych potrzebnych do pokrycia zapotrzebowania budynku na ciepło, jak również wynikającej z tego ogólnej straty ciśnienia.

Rysunek 16 przedstawia straty ciśnienia w systemie ogrzewania ściennego, który składa się z sześciu modułów grzewczych lub paneli grzewczych. Te krzywe na rysunku 16 pokazują całkowitą stratę ciśnienia w systemie ogrzewania ściennego wraz ze wszystkimi przynależnymi połączeniami.



Rysunek 16: Straty ciśnienia w badanym systemie ogrzewania ściennego.

Wykres na rysunku 16 pokazuje, że straty ciśnienia wzrastają wraz ze wzrostem przepływu ciepłej wody. W przeprowadzonych badaniach stwierdzono, że przy przepływie ciepłej wody wynoszącym 200 l/h, uzyskuje się ponad 90% całkowitej mocy cieplnej. Przy takim przepływie ciepłej wody w każdym module grzewczym lub płycie grzewczej wyznaczono stratę ciśnienia wynoszącą ok. 21 mbar.

Obliczenia strat ciśnienia służą do projektowania niezbędnych pomp wodnych w systemie grzewczym. Straty ciśnienia zależą zazwyczaj nie tylko od ilości zastosowanych modułów grzewczych, ale także od systemu połączeń, systemu rozprowadzenia ciepłej wody, zaworów wodnych i rurociągu (materiał, kształt, długość i średnica). Główną rolę w tym zakresie odgrywa hydrauliczne przełączanie modułów grzewczych. Dokładne obliczenie strat ciśnienia powinno być przeprowadzone indywidualnie i z uwzględnieniem wszystkich zabudowanych elementów systemu.

2.5 Badanie wytrzymałości ciśnieniowej/szczelności

Wytrzymałość ciśnieniową systemu ogrzewania ściennego przeprowadzono przy ciśnieniu wody 30 bar przed i po zakończeniu badania systemu ogrzewania ściennego w stanie zabudowanym i niezabudowanym. Nie wykryto ani wycieku wody, ani deformacji elementów systemu. Zaletą systemu ogrzewania ściennego firmy Soffio jest niewielka ilość potrzebnej wody (< 30 ml/panel grzewczy) oraz niewielka odległość przepływu w celu rozprowadzenia ciepła potrzebnego do aktywacji wypełniacza.

3 Zalecenia i charakterystyka projektowania systemu ogrzewania ściennego

W celu zaprojektowania systemu ogrzewania ściennego należy obliczyć liczbę niezbędnych paneli grzewczych oraz straty ciśnienia w całym systemie ogrzewania ściennego. Poniżej przedstawiono uproszczoną podstawę, która została stworzona na podstawie przeprowadzonych badań. Bardziej precyzyjna podstawa techniczna dla dokładnego zaprojektowania systemu ogrzewania ściennego może być ustalona i odpowiednio oceniona jedynie poprzez dalsze szczegółowe badania różnych konstelacji (typy ścian, parametry pracy, typy systemów itp.).

3.1 Obliczanie ilości wymaganych paneli grzewczych

Moc cieplną systemu ogrzewania ściennego można obliczyć w przybliżeniu przy pomocy wzoru 1, który został ustalony na podstawie przeprowadzonych badań (patrz rozdział 2.2.1 i 2.2.2). Wzór 1 powinien mieć zastosowanie do projektowania systemu ogrzewania ściennego w ścianach wewnętrznych i zewnętrznych. Wpływ przepływu ciepłej wody i zastosowania systemu ogrzewania ściennego w ścianie zewnętrznej na moc cieplną jest uwzględniany przez współczynnik k_D i współczynnik k_u .

$$P = k_s \cdot k_U \cdot (1 + k_Q) \cdot 2 \cdot n \cdot 10^{-5} \cdot T_m^{(2,2056)} \quad \text{Wzór 1}$$

Albo:

$$n = \frac{P}{k_s \cdot k_U \cdot (1 + k_Q) \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot T_m^{(2,2056)}} \quad \text{Wzór 2}$$

- P -. Wymagana moc cieplna systemu ogrzewania ściennego w kW, która odpowiada wymaganemu całkowitemu zapotrzebowaniu budynku lub obiektu mieszkalnego na ciepło.
- k_u : Współczynnik korygujący uwzględniający zastosowanie systemu ogrzewania ściennego w ścianach zewnętrznych.
- k_Q : Współczynnik korygujący uwzględniający przepływ ciepłej wody.
- k_s : Współczynnik bezpieczeństwa dla uwzględnienia awarii elementów grzewczych, niskich temperatur zimą oraz zmian w sposobie użytkowania obiektu mieszkalnego.
- n : Liczba paneli grzewczych lub modułów grzewczych w całym systemie ogrzewania ściennego.
- T_m : Średnia temperatura ciepłej wody dostarczanej do systemu ogrzewania w °C.

Całkowite zapotrzebowanie budynku lub obiektu mieszkalnego na ciepło zależy od rodzaju konstrukcji (dom pasywny, nowy budynek ze standardową izolacją cieplną, wyremontowany stary budynek z izolacją ciepłą lub nowy budynek bez izolacji cieplnej, stary budynek bez izolacji cieplnej itp.). Oblicza się je w przybliżeniu przez pomnożenie specyficznego zapotrzebowania na ciepło (kW/m²) przez całkowitą powierzchnię mieszkalną przeznaczoną do ogrzania. Specyficzne zapotrzebowanie na ciepło dla różnych typów budynków przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6: Specyficzne zapotrzebowanie na ciepło dla różnych typów budynków.

Typ budynku/obiektu mieszkalnego	Specyfikacja zapotrzebowania na ciepło [kW/m ²].
Dom pasywny	0,015
Nowy budynek według EnEV	0,04
Nowy budynek o standardowej izolacji cieplnej	0,06
Wyremontowany stary budynek z izolacją cieplną lub nowy budynek bez izolacji cieplnej	0,08
Stary budynek bez izolacji cieplnej	0,12

Współczynnik k_Q można w przybliżeniu obliczyć z poniższego wzoru 3, przy czym należy zastosować przepływ ciepłej wody o wartości Q_w powyżej 100 kg/h.

$$k_Q = 0,1481 * \ln(Q_w) - 0,6803 \quad \text{Wzór 3}$$

Współczynnik k_u jest współczynnikiem korygującym, który uwzględnia zastosowanie systemu ogrzewania ściennego w ścianach wewnętrznych lub zewnętrznych. Gdy system ogrzewania ściennego jest stosowany w ścianie wewnętrznej, współczynnik k_u przyjmuje wartość 1, zaś jego wartość waha się od 0 do 1, gdy jest stosowany w ścianie zewnętrznej. Teoretycznie przyjmuje się wartość 0, jeżeli chłodzenie elementu grzewczego z zewnątrz uniemożliwia aktywację czynnika i w związku z tym ciepło z ciepłej wody nie może być przekazywane i odpowiednio wykorzystywane. W tym przypadku moc cieplna systemu ogrzewania ściennego wynosi zero. Im lepsza jest izolacja ściany zewnętrznej, tym wyższą wartość osiąga współczynnik k_u . Dla badanej ściany próbnej należy przyjąć wartość współczynnika k_u wynoszącą 0,85.

Wartość ta dotyczy temperatury zewnętrznej do -8°C . Przy niższych temperaturach zewnętrznych należy przyjąć niższe wartości współczynnika k_u .

Współczynnik k_s jest współczynnikiem bezpieczeństwa i przyjmuje wartość mniejszą niż 1 lub większą niż 0,90. Współczynnik ten ma na celu uwzględnienie niższych temperatur zimowych, przy których odpowiednio wzrasta zapotrzebowanie na ciepło. Ponadto współczynnik ten uwzględnia niedominujące wady techniczne lub usterki w niektórych elementach grzewczych, a także zmiany w użytkowaniu pomieszczeń budynku lub ścian obiektu mieszkalnego.

Średnia temperatura T_m ciepłej wody dostarczanej do systemu ogrzewania powinna być wyższa niż 40°C lub wyższa niż temperatura, przy której można dostarczyć energię cieplną niezbędną do aktywacji czynnika w elementach grzewczych. Należy zauważyć, że wzory 1 i 3 mają zastosowanie tylko dla zakresu ciepłej wody o temperaturze od 40°C do 65°C i dla przepływu ciepłej wody w zakresie od 100 kg/h do 400 kg/h, przy czym prosta ocena została dokonana w oparciu o wartości pomiarowe.

Należy wspomnieć, że opisana powyżej uproszczona podstawa techniczna powinna zostać zatwierdzona na podstawie dalszych pomiarów. Służy ona tylko do pierwszego obliczenia lub uproszczonego projektu systemu ogrzewania ściennego firmy Soffio w badanej konstelacji.

3.2 Obliczanie maksymalnej liczby paneli grzewczych w rzędzie grzewczym

Jak wspomniano w rozdziale 2.2.3, maksymalna liczba paneli grzewczych, które można podłączyć w rzędzie grzewczym systemu ogrzewania ściennego, nie naruszając jego sprawności, zależy od temperatury zasilania oraz przepływu ciepłej wody. Im wyższa jest temperatura zasilania i im mniejszy jest przepływ ciepłej wody, tym większa jest bezwzględna, a w konsekwencji specyficzna różnica temperatur pomiędzy wejściem a wyjściem systemu ogrzewania lub więcej ciepła zostanie przekazane do elementów grzewczych. Maksymalna liczba paneli grzewczych jest obliczana w przybliżeniu według wzoru 4:

$$n_R = \frac{T_{vor} - T_{min}}{\Delta T_{spz.}} \quad \text{Wzór 4}$$

Przy czym:

T_{vor} : Temperatura na wlocie ciepłej wody do systemu ogrzewania [$^{\circ}\text{C}$],

T_{min} : Minimalna temperatura wody potrzebna do aktywacji czynnika lub do efektywnej wymiany ciepła lub do pokrycia zapotrzebowania na ciepło w pomieszczeniu mieszkalnym lub w odpowiednich segmentach ścian [$^{\circ}\text{C}$],

$\Delta T_{spz.}$: Średnia, specyficzna różnica temperatur pomiędzy wejściem a wyjściem temperatury systemu ogrzewania [$^{\circ}\text{C}$ /panel grzewczy].

Minimalna temperatura wody potrzebna do aktywacji czynnika wynosiła ok. 38°C w badanym systemie ogrzewania. Specyficzna różnica temperatur AT_{spz} opisuje spadek temperatury z jednego modułu grzewczego do kolejnego modułu grzewczego. Jak już zostało wykazane, zależy to od wielu czynników, ale przede wszystkim od przepływu ciepłej wody i temperatury zasilania lub wlotu. Ustalone bezwzględne i średnie temperatury specyficzne są przedstawione na wykresie na rysunku 11 oraz w tabelach 4 i 5.

3.3 Obliczanie strat ciśnienia w systemie ogrzewania ściennego

Straty ciśnienia w systemie ogrzewania ściennego można obliczyć według wzoru 5, który zwykle stosuje się w przypadku stosowania rurociągów. Rurociąg składa się zarówno z systemu rur łączących moduły grzewcze, jak i z kanałów rurowych paneli grzewczych.

$$\Delta p = \frac{\lambda \cdot l \cdot \rho_w \cdot v^2}{2 \cdot d} \quad \text{Wzór 5}$$

Przy czym:

Δp : Strata ciśnienia w rurociągu w Pa.

v : Prędkość przepływu ciepłej wody w rurociągu w m/s.

λ : Współczynnik tarcia zastosowanego rurociągu.

l : Długość rurociągu w m.

ρ_w : Gęstość ciepłej wody w kg/m³.

d : Średnica rurociągu w m.

Prędkość przepływu w rurze obliczana jest według wzoru 6:

$$v = \frac{4 \cdot Q_w}{\pi \cdot d^2} \quad \text{Wzór 6}$$

Q_w przedstawia przepływ ciepłej wody (m³/s) podczas pracy systemu ogrzewania ściennego. Do zastosowania wzoru 5 wymagany jest współczynnik tarcia, który zazwyczaj jest określany empirycznie. Dla badanego systemu ogrzewania ściennego wyznaczono średnią wartość współczynnika tarcia $A = 0,0485$. Oprócz strat ciśnienia w rurociągu, należy uwzględnić straty ciśnienia w innych elementach systemu ogrzewania ściennego, takich jak np. zawory, rozdzielacze wody, połączenia rur itp.

**Tłumaczenie z niemieckiego oryginału wykonało biuro tłumaczeń Tlumaczenia.pl
ITAMAR Group Sp. z o.o. z siedzibą w Gliwicach, 44-100 Gliwice, przy ul. Wyszyńskiego 12/4**

ITAMAR Group Sp. z o.o.

KRS: 0000384706 VAT: PL6312630168 Regon: 241901707

ul. Wyszyńskiego 12/4, 44-100 Gliwice, Poland

tel.: +48 323 302 160 email: biuro@tlumaczenia.pl

tlumaczenia.pl • linguist.pl

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Institutsleiter
Prof. Dr. Philip Leistner
Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Dr.-Ing. Mohammad Aleya
Gruppenleiter
Verbrennungs- und Umweltschutztechnik
Abteilung Umwelt, Hygiene und Sensorik
Telefon +49 711 970-3455 | Fax -970-3385
mohammad.aleyas@ibp.fraunhofer.de
www.ibp.fraunhofer.de

BERICHT ZUR UNTERSUCHUNG DES HEIZVERHALTENS EINES AUF THERMODYNAMISCH ARBEITENDEM FÜLLMITTEL BASIERENDEM WANDHEIZSYSTEM DER FIRMA SOFFIO

Der Bericht umfasst
24 Seiten Text mit
6 Tabellen und
16 Abbildungen

Stuttgart, 30.03.2020



The stamp contains the text: 'FRAUNHOFER-GESellschaft ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V.' around the perimeter, the Fraunhofer logo, and 'IBP'.

Dr.-Ing. Mohammad Aleya

Inhaltsverzeichnis

1	Beschreibung des untersuchten Wandheizsystems	3
2	Durchgeführte Untersuchungen	5
2.1	Untersuchung der Wärmeleistung des Heizmoduls in einem nicht verbauten Zustand	6
2.2	Untersuchung des Heizverhaltens und der Wärmeleistung des Heizmoduls im verbauten Zustand	9
2.2.1	Wärmeleistung des Heizmoduls im verbauten Zustand in einer Innenwand	11
2.2.2	Wärmeleistung des Heizmoduls im verbauten Zustand in einer Außenwand	13
2.2.3	Absolute und spezifische Temperaturdifferenzen im untersuchten Heizsystem	14
2.3	Temperaturverteilung in der Probewand	16
2.4	Druckverlust des Wandheizungssystems	20
2.5	Untersuchung der Druckbeständigkeit/Leckage	21
3	Empfehlungen und Kenndaten zur Auslegung des Wandheizsystems	21
3.1	Berechnung der Anzahl der notwendigen Heizpaneele	21
3.2	Berechnung der maximalen Anzahl der Heizpaneele in einer Heizreihe	23
3.3	Berechnung des Druckverlusts im Wandheizungssystem	24

1 Beschreibung des untersuchten Wandheizsystems

Das Wandheizsystem der Firma Soffio wird aus einzelnen Heizpaneelen mit einem entsprechenden druckbeständigen wasserdichten Verbindungssystem zusammengebaut. Jedes Heizpaneel besteht in der Regel aus mehreren stabförmigen Heizelementen (Abbildung 1), die gemäß den Angaben des Auftraggebers mit einem gasförmigen umweltfreundlichen Füllmittel befüllt sind und somit im Inneren ein geringer Überdruck herrscht. Im unteren Teil jedes Heizpaneels befindet sich ein dickwandiger Wasserkanal, in den die Heizelemente gepresst oder angeschraubt werden, wobei die Heizelemente mit dem Warmwasser indirekt in Kontakt kommen. Die für die Aufwärmung des Füllmittels notwendige Wärme wird über das Warmwasser zugeführt. Bei der Durchströmung mit Warmwasser wird das Füllmittel aufgewärmt und steigt innerhalb der Heizelemente nach oben. Durch die Bewegung des Füllmittels verteilt sich die Wärme im gesamten Heizelement und wird entsprechend langsam abgegeben. Dabei gilt, je höher die Wassertemperatur bzw. größer der Warmwasserdurchsatz, desto mehr Wärme kann über die Heizelemente übertragen und zum Heizen bereitgestellt werden.



Abbildung 1: Heizpaneel der Firma Soffio,

Zur Herstellung der Heizelemente bzw. -paneele wird gemäß den Angaben des Herstellers zwecks hoher Druckfestigkeit und hoher Produktqualität reines Aluminium verwendet. Die genauen technischen Daten des verwendeten Füllmittels sowie das Innenleben der Heizstäbe sind nicht bekannt und sind das Knowhow des Herstellers.

Es ist zu erwähnen, dass die oben dargelegten Informationen bzw. die Produktbeschreibung den Angaben sowie den Unterlagen des Herstellers entnommen sind.

2 Durchgeführte Untersuchungen

Für die Ermittlung und Charakterisierung des Heizverhaltens des Wandheizungssystems der Firma Soffio wurde eine spezielle technische Einrichtung (sogenannter Kalorimeterraum) verwendet, welcher sich zur Bestimmung von Energiebilanzen von verschiedenen Heizsystemen und Bauelementen eignet und im Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP entwickelt wurde.



Abbildung 2: Technische Versuchseinrichtung (Kalorimeterraum) zur Bestimmung von Energiebilanzen.

Anhand des Kalorimeterraums können außerdem konstante klimatische Betriebsbedingungen (Druck, relative Feuchte und Temperatur) eingestellt werden, welche in der Regel die Leistung des Heizsystems durch die Wärmeübertragung sowie die Wärmeverteilung im Raum in unterschiedlichem Maß beeinflussen können.

Bei der Untersuchung des Heizverhaltens des Wandheizungssystems der Firma Soffio wurden folgende Einsatzfälle betrachtet.

- ❖ Ermittlung der Wärmeleistung des Heizmoduls in einem nicht verbauten Zustand, um die höchstmögliche Wärmeleistung zu messen bzw. den Einfluss des Einbaus des Systems unter der Putzschicht zu erkennen.
- ❖ Ermittlung der Wärmeleistung des Heizmoduls im verbauten Zustand, wobei eine Probewand gemäß den Angaben des Herstellers verwendet wurde. Bei diesem Einsatzfall wurde der Einsatz des

Heizsystems in Innenwänden sowie in Außenwänden durch eine starke Kühlung der Außenseite der Probewand untersucht.



Abbildung 3: Verschiedene Schichten der Probewand.

Die Versorgung des Heizsystems mit Warmwasser bei definierten und konstanten Temperaturen sowie Warmwasserdurchsätzen erfolgt über eine zusätzliche Einrichtung, welche außerhalb des Kalorimeterraums eingesetzt wird. Diese Einrichtung besteht aus drei parallelgeschalteten elektrischen Durchlauferhitzern, welche über eine gesamte elektrische Leistung von ca. 72 kW_{elek} verfügen. Außerdem werden mit dieser Einrichtung die Massenströme mit der Vor- und Rücklauftemperatur erfasst und entsprechend eingestellt. Alle verwendeten Wasserrohre und Armaturen außerhalb des Wandheizungssystems werden zwecks Minimierung der direkten Wärmeverluste isoliert.

2.1 Untersuchung der Wärmeleistung des Heizmoduls in einem nicht verbauten Zustand

Das Ziel dieser Untersuchungsvariante ist die Charakterisierung des Heizverhaltens der Heizmodule bzw. des Heizsystems in einem nicht verbauten Zustand, wobei eine minimale Wärmeabgabe bzw. Wärmeleistung aufgrund der ungünstigen Arbeitsbedingungen des Füllmittels zu erwarten ist. Zur Durchführung der Untersuchungen wurde ein Wandheizungssystem aus sechs in Reihe geschalteten Heizmodulen/Heizpaneelen (siehe Abbildung 1) aufgebaut und untersucht. Die Untersuchungen wurden bei einer nicht umströmenden Umgebung bei einer Temperatur von 20 ± 1 °C bzw. bei unterschiedlichen Warmwasserdurchsätzen (100 kg/h, 200 kg/h, 300 kg/h und 400 kg/h) und einer Vorlauftemperatur von 40 °C und 60 °C durchgeführt. Die Einstellung einer Umgebungstemperatur von

$20 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ erfolgte durch die Kühlung der Wände des Prüfraums (Kalorimeterraum).



Abbildung 4: Wandheizsystem der Firma Soffio im nicht verbauten Zustand.



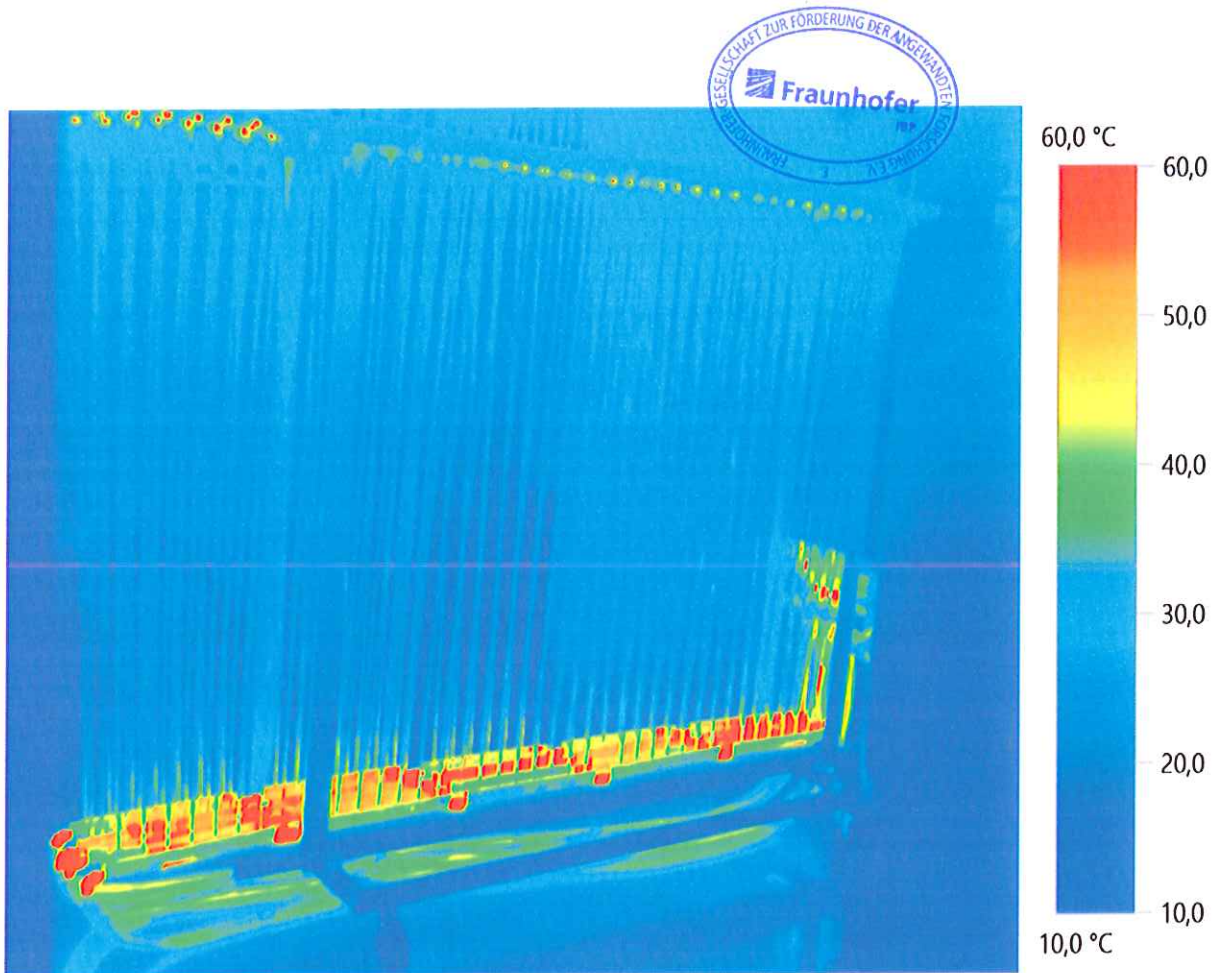


Abbildung 5: Wärmebild des Wandheizsystems der Firma Soffio im nicht verbauten Zustand.

Beim Beginn der Untersuchungen wurde ein Heizsystem aus 20 Modulen zusammengebaut und untersucht. Diese mussten aufgrund der unzureichenden Kühlleistung des Kalorimeterraums sowie für eine direkte Vergleichbarkeit mit der eingebauten Einsatzvariante auf sechs reduziert werden. Sowohl bei den 20 als auch bei den sechs Modulen hat das System ein vergleichbares Heizverhalten aufgewiesen.

Die gesamte Wärmeleistung des untersuchten Heizmoduls, welches aus sechs Heizpaneelen zusammengebaut ist, ist in der Tabelle 1 sowie in der Abbildung 6 dargestellt.

Tabelle 1: Wärmeleistung in Kilowatt [kW] des Heizmoduls im nicht verbauten Zustand.

Vorlauftemperatur [°C]	Warmwasserdurchsatz [kg/h]			
	100	200	300	400
40 [°C]	0,347	0,389	0,412	0,430
60 [°C]	0,852	0,899	0,961	1,024



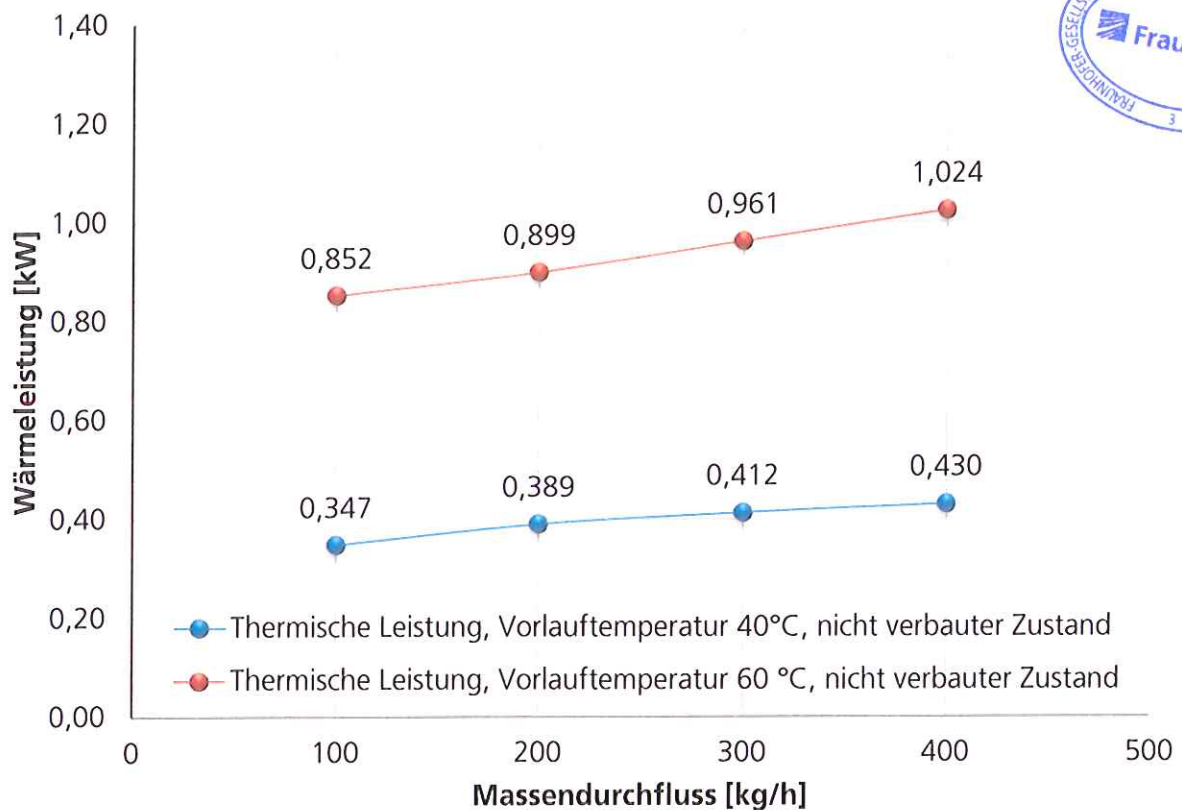


Abbildung 6: Wärmeleistung in Kilowatt [kW] des Heizmoduls im nicht verbauten Zustand.

Der Tabelle 1 sowie dem Diagramm der Abbildung 6 ist zu entnehmen, dass je höher der Warmwasserdurchsatz und die Vorlauftemperatur sind, umso mehr Wärme kann von den Heizelementen aufgenommen und folglich abgegeben werden. Außerdem ist ersichtlich, dass über 80 % der Wärmeleistung bei einem Warmwasserdurchsatz von 100 kg/h erreicht werden kann. Die Erhöhung der Vorlauftemperatur hat einen deutlich größeren Einfluss auf die Wärmeleistung des Heizsystems als die Erhöhung des Warmwasserdurchsatzes.

Die Wärmeleistung im nicht verbauten Zustand stellt aufgrund der fehlenden Aktivierungsenergie des Füllmittels die minimale Wärmeleistung dar, die das Heizsystem bei den jeweiligen Raumtemperaturen bereitstellen kann. Bei den Untersuchungen wurde festgestellt, dass je höher die Umgebungstemperatur der Heizelemente ist, umso schneller und aktiver wird die Wärmeübertragung und Wärmeverteilung durch das Füllmittel. Im verbauten Zustand ist, unabhängig von den verwendeten Putzmitteln, eine höhere Wärmeleistung zu erwarten.

2.2 Untersuchung des Heizverhaltens und der Wärmeleistung des Heizmoduls im verbauten Zustand

In dieser Untersuchungsvariante wurde ein Heizsystem aus sechs Heizelementen mit jeweils sechs in Reihe geschalteten Heizmodulen, in Analogie zu der ersten Untersuchungsvariante aufgebaut und in eine

Probewand gemäß den Angaben des Auftraggebers integriert. Dabei wurde die Leistung des Heizsystems bei einem nicht gekühlten Raum hinter der Probewand ermittelt, wodurch versucht wurde, den Einbau des Heizsystems in den Innenwänden des Gebäudes zu simulieren. Dazu wurde der Einsatzfall einer Außenwand des Gebäudes simuliert, bei welchem ein Raum hinter der im Prüfraum aufgebauten Wand stark (bis -6 °C) gekühlt wurde.

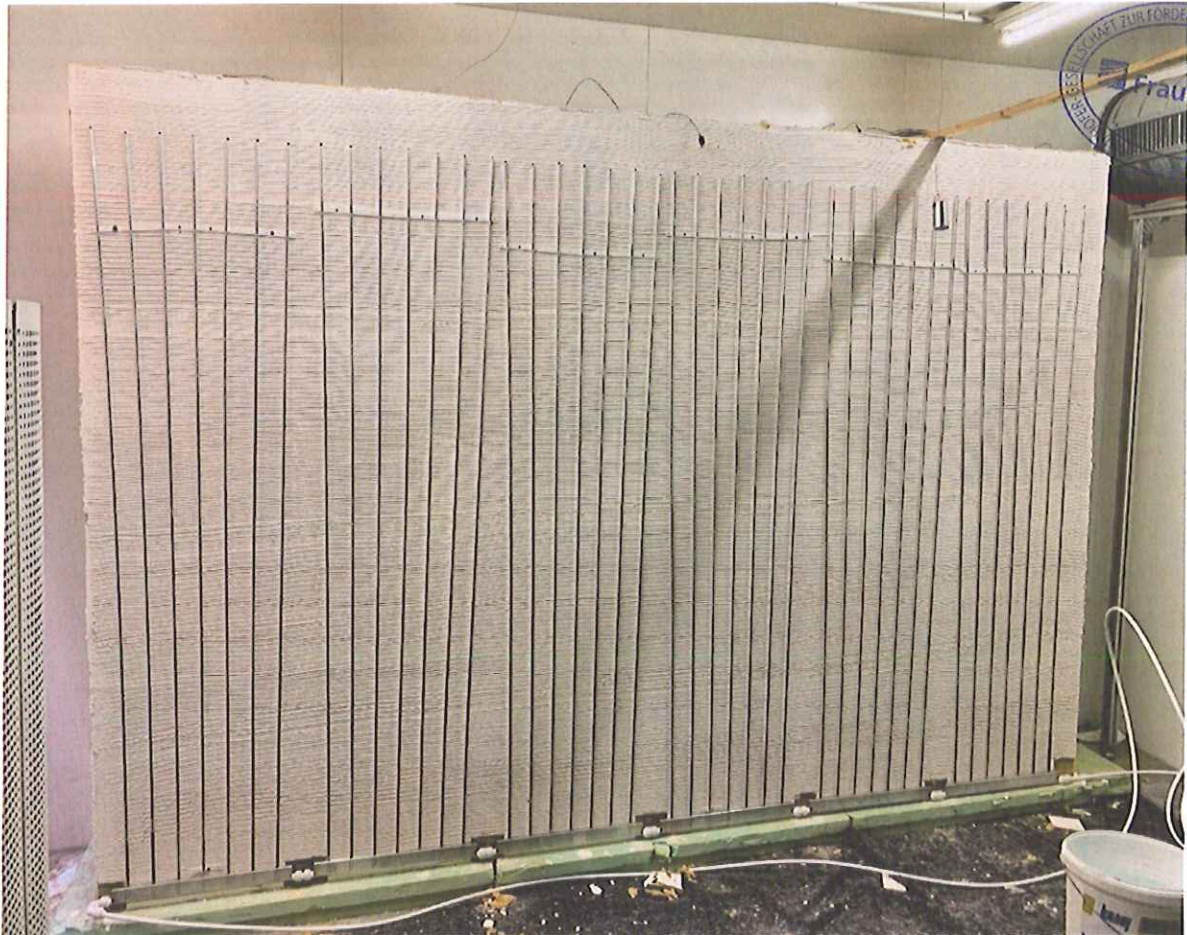


Abbildung 7: Das Wandheizsystem zusammgebaut aus sechs in Reihe geschalteten Heizmodulen, welche an der Musterwand angebracht sind.

Die Untersuchungen bei den Innen- und Außenwandbedingungen wurden bei einer nicht umströmenden Umgebung bei einer Temperatur von $20 \pm 1\text{ °C}$ bzw. bei unterschiedlichen Warmwasserdurchsätzen (100, 200, 300 und 400 kg/h) und einer Vorlauftemperatur von 40 °C und 60 °C durchgeführt. Die Einstellung einer Umgebungstemperatur von $20 \pm 1\text{ °C}$ erfolgt hauptsächlich durch die Kühlung der Wände des Prüfraums (Kalorimeterraum). Zusätzlich zu der Untersuchung der Wärmeleistung wurden bei dieser Untersuchungsvariante die Druckfestigkeit des Heizsystems, der Strömungswiderstand bzw. der Druckverlust bei unterschiedlichen Warmwasserdurchsätzen und die Oberflächentemperaturen gemessen. Die Oberflächentemperaturen wurden sowohl punktuell (Abbildung 8) durch entsprechende Temperaturfühler als auch durch eine Wärmebildkamera gemessen. Dabei wurde die notwendige

Zeit ermittelt, bei der sich die maximalen Temperaturen an der Probewand bei den jeweiligen Einstellungen eingestellt haben.

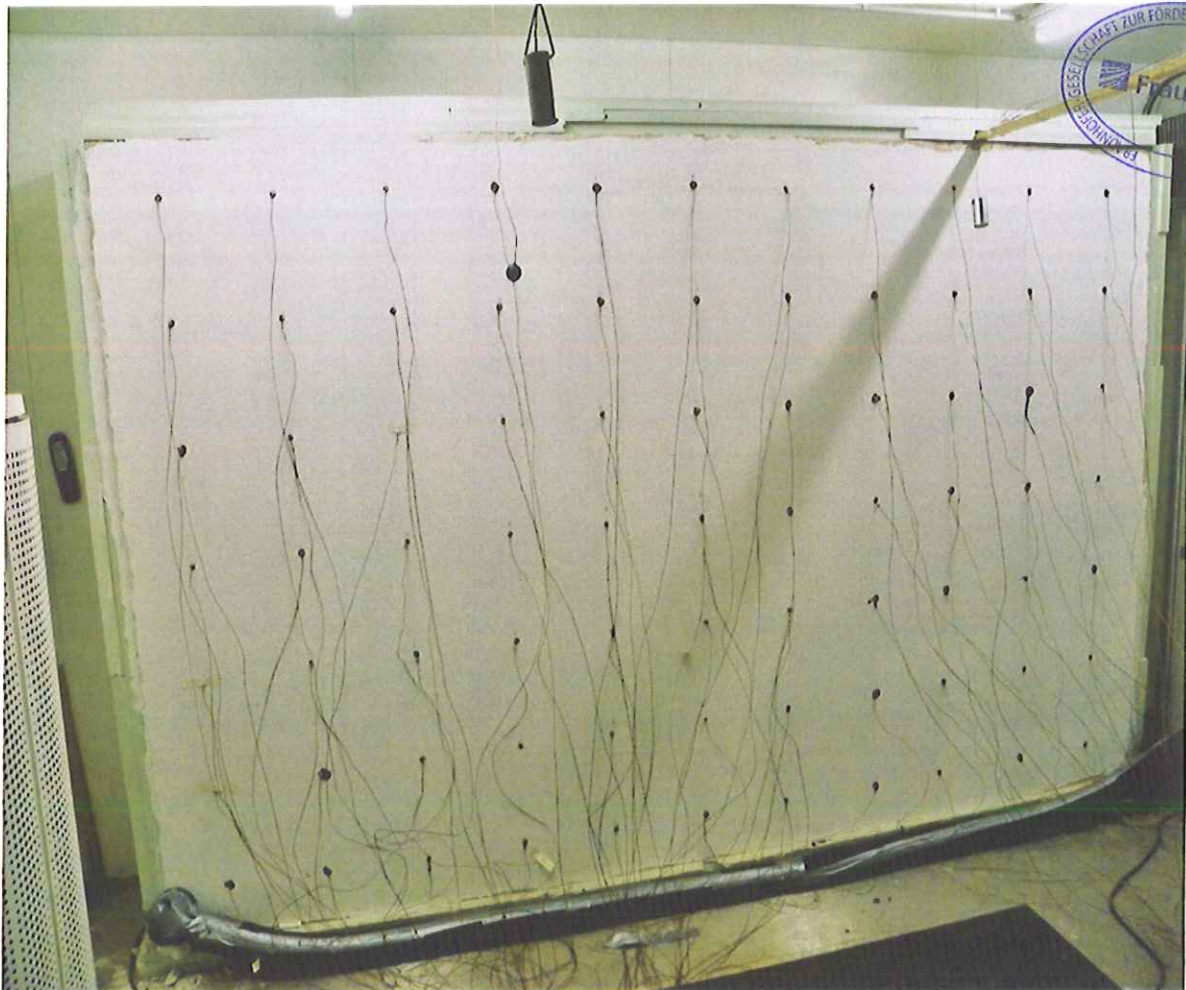


Abbildung 8: Die Messung der Oberflächentemperaturen an der Probewand im eingebauten Zustand des Heizsystems.

Die Abbildung 7 stellt das untersuchte, aus sechs Heizmodulen zusammengesetzte Heizsystem dar, welches in der aufgebauten Probewand in dem Untersuchungsraum installiert wurde.

2.2.1 Wärmeleistung des Heizmoduls im verbauten Zustand in einer Innenwand

In der Tabelle 2 sowie im Diagramm der Abbildung 9 sind die Werte bzw. Verläufe der Wärmeleistung des Wandheizsystems (bestehend aus sechs in Reihe geschalteten Heizpaneelen) dargestellt. Der Tabelle 2 bzw. der Abbildung 9 ist zu entnehmen, dass das Wandheizsystem bei den gleichen Vorlauftemperaturen bzw. Warmwasserdurchsätzen eine höhere Wärmeleistung bereitstellt als im nicht verbauten Zustand. Das ist damit zu begründen, dass die Aktivierungsenergie für das Füllmittel effektiver bereitgestellt werden und das Wandheizsystem damit den günstigen Arbeitspunkt schneller erreichen kann. Entsprechend der Untersuchung im nicht verbauten Zustand weist das Heizsystem ein vergleichbares Heizverhalten bzw. einen ähnlichen Kurvenverlauf auf.

Tabelle 2: Wärmeleistung in Kilowatt [kW] des Heizmoduls im verbauten Zustand in einer Innenwand (der Raum hinter der Probewand ist nicht gekühlt).

Vorlauftemperatur [°C]	Warmwasserdurchsatz [kg/h]			
	100	200	300	400
40 [°C]	0,386	0,412	0,433	0,445
60 [°C]	0,944	1,084	1,120	1,121

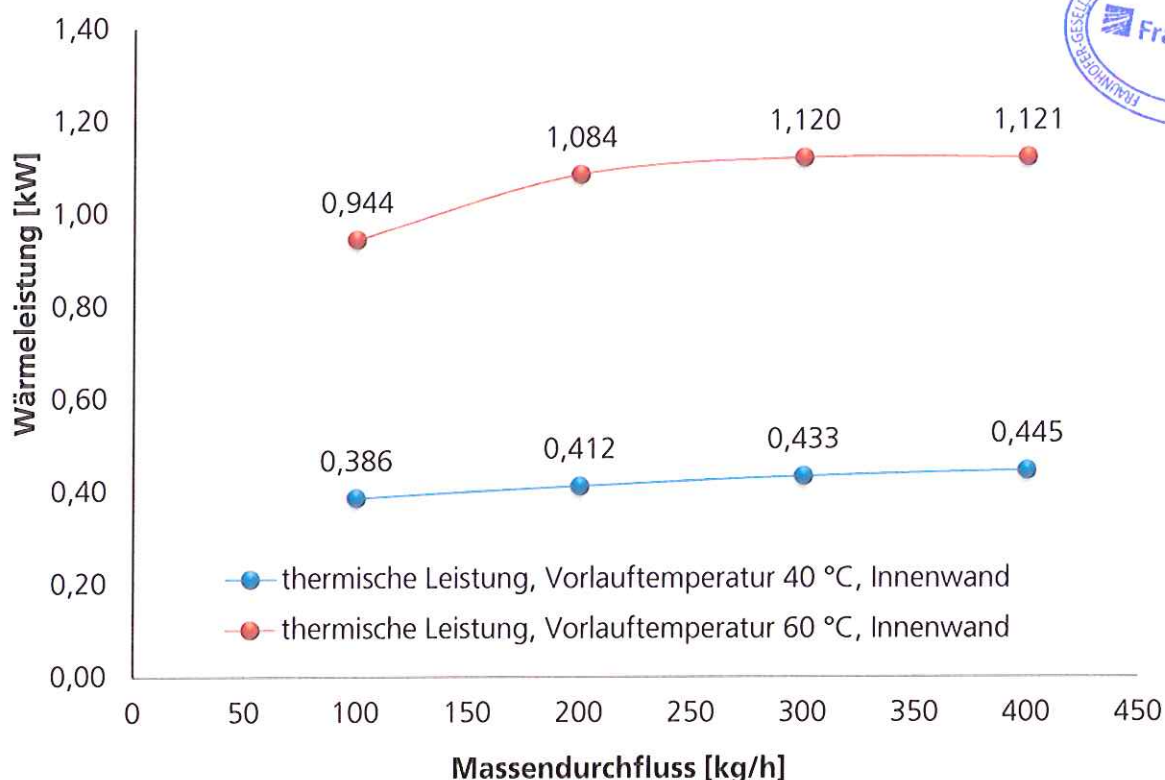


Abbildung 9: Wärmeleistung in Kilowatt [kW] des Heizmoduls im verbauten Zustand in einer Innenwand (der Raum hinter der Probewand ist nicht gekühlt).

Dabei ist zu sehen, dass je höher der Warmwasserdurchsatz und die Vorlauftemperatur sind, umso mehr Wärme kann von den Heizelementen aufgenommen und folglich abgegeben werden. Außerdem ist ersichtlich, dass über 85 % der Wärmeleistung bei einem Warmwasserdurchsatz von 100 kg/h erreicht werden kann. Die Erhöhung der Vorlauftemperatur hat dabei deutlich größeren Einfluss auf die Wärmeleistung des Wandheizsystems als die Erhöhung des Warmwasserdurchsatzes. Aus diesem Grund ist der Parameter Vorlauftemperatur für die Regelung der Wärmeleistung des Wandheizungssystems technisch sinnvoller als der Parameter Massendurchfluss des Warmwassers. Die Erhöhung des Warmwasserdurchsatzes auf über 200 kg/h ist nicht zielführend, da dadurch lediglich eine begrenzte Steigerung der Wärmeleistung sowie eine exorbitante Erhöhung des Druckverlusts erreicht werden können.

2.2.2 Wärmeleistung des Heizmoduls im verbauten Zustand in einer Außenwand

Bei dem Einsatz des Wandheizungssystems in einer Außenwand kann die Funktion des Füllmittels aufgrund der niedrigen Temperaturen auf der Außenseite negativ beeinflusst werden. Je tiefer die Temperatur auf der Außenseite der Wand bzw. des Heizmoduls sind, um so höhere Vorlauftemperaturen und Warmwasserdurchsätze müssen eingestellt werden, um die notwendige Wärmeenergie zur Aktivierung des Füllmittels bereitstellen zu können.

Tabelle 3: Wärmeleistung in Kilowatt [kW] des Heizmoduls im verbauten Zustand in einer Außenwand (der Raum hinter der Probewand ist bis - 8 °C gekühlt).

Vorlauftemperatur [°C]	Warmwasserdurchsatz [kg/h]			
	100	200	300	400
40 [°C]	0,311	0,375	0,406	0,421
60 [°C]	0,900	0,985	1,017	1,018

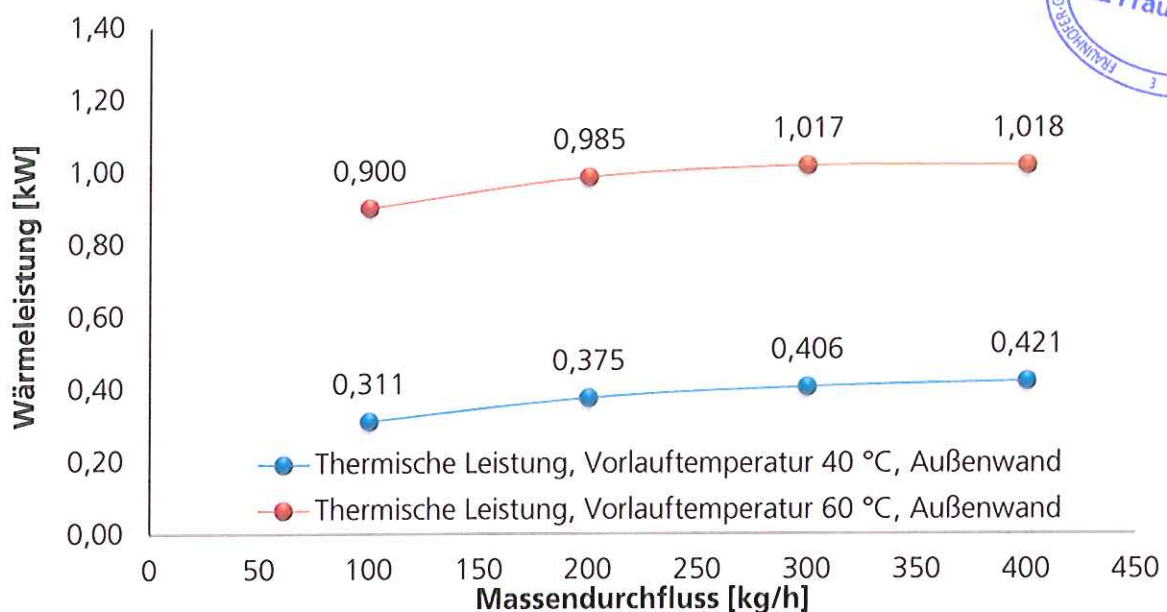


Abbildung 10: Wärmeleistungsverteilung im verbauten Zustand mit simulierter Außenwand (der Raum hinter der Probewand ist bis - 8 °C gekühlt).

Bei dem Vergleich der Kurven der Wärmeleistungen von der Innen- und Außenwand lässt sich feststellen, dass die Kurvenverläufe identisch sind, wobei die Wärmeleistung des verwendeten Wandheizungssystems bei dem Einsatz in der Innenwand um ca. 10 %, wie z. B. bei einer Vorlauftemperatur von 60 °C, höher ist als beim Einsatz in der Außenwand. Bei den Untersuchungen wurde außerdem beobachtet, dass das Wandheizungssystem bei dem Einsatz in der Innenwand und bei hohen Vorlauftemperaturen schneller den günstigen Arbeitspunkt und somit den Beharrungszustand

oder die maximal möglichen Oberflächentemperaturen erreichen kann als bei dem Einsatz in der Außenwand.

Für den Betrieb des Wandheizungssystems vor allem bei dem Einsatz in einer Außenwand ist zu empfehlen, die Vorlauftemperatur zum Beginn maximal einzustellen und diese, sobald eine günstige Betriebstemperatur erreicht wurde, wieder auf ein niedrigeres bzw. entsprechendes Temperaturniveau in Abhängigkeit des bestehenden Wärmebedarfs zurückzustellen.

2.2.3 Absolute und spezifische Temperaturdifferenzen im untersuchten Heizsystem

Beim Fließen des Warmwassers durch die Heizpaneele bzw. durch das Heizsystem nimmt die Wassertemperatur von Heizpaneel zu Heizpaneel aufgrund der Wärmeübertragung an das Füllmittel ab. Die Temperaturabnahme entlang der Probewand bzw. des Heizsystems ist nicht linear und verhält sich proportional zu der Fließstrecke. Bei hohen Temperaturen ist die Abnahme höher als bei niedrigeren Temperaturen.

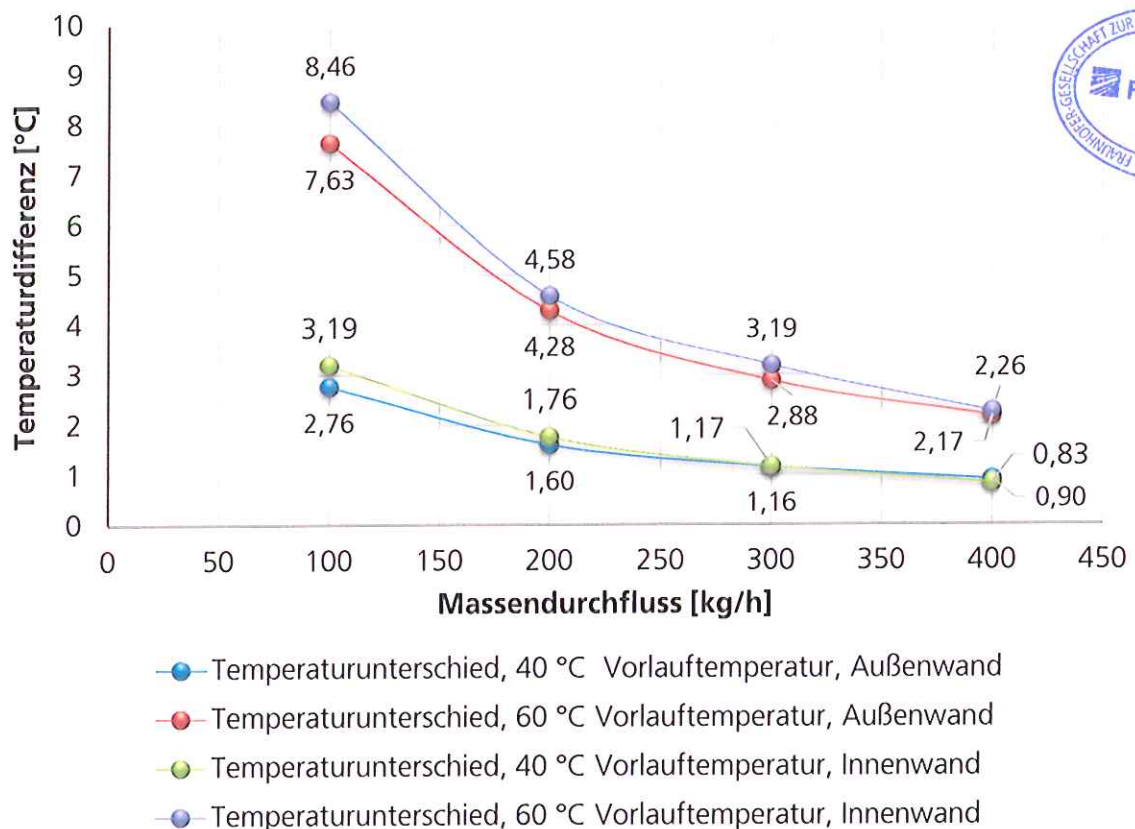


Abbildung 11: Temperaturdifferenz bzw. -unterschied zwischen dem Ein- und Austritt des untersuchten Heizsystems (Probewand aus sechs eingebauten Heizmodulen) (Abbildung 7, Abbildung 8) bei unterschiedlichen Warmwasserdurchflüssen und Vorlauf- bzw. Eintrittstemperaturen von 40 °C und 60 °C.

Tabelle 4: Spezifische und absolute Temperaturdifferenz beim Einsatz des Wandheizungssystems in einer Außenwand bei unterschiedlichen

Warmwasserdurchsätzen und Vorlauftemperaturen (Eintrittstemperaturen) von 40 °C und 60 °C.

Vorlauftemperatur [°C]	Warmwasserdurchsatz [kg/h]			
	100	200	300	400
Absolute Temperaturdifferenz [°C]				
40 [°C]	1,86	1,61	1,16	0,90
60 [°C]	7,63	4,28	2,88	2,17
Spezifische Temperaturdifferenz [°C/Heizpaneel]				
40 [°C]	0,31	0,27	0,19	0,15
60 [°C]	1,27	0,71	0,48	0,36



Tabelle 5: Spezifische und absolute Temperaturdifferenz beim Einsatz des Wandheizungssystems in einer Innenwand bei unterschiedlichen Warmwasserdurchsätzen und Vorlauftemperaturen (Eintrittstemperaturen) von 40 °C und 60 °C.

Vorlauftemperatur [°C]	Warmwasserdurchsatz [kg/h]			
	100	200	300	400
Absolute Temperaturdifferenz [°C]				
40 [°C]	3,19	1,77	1,17	0,84
60 [°C]	8,46	4,58	3,19	2,26
Durchschnittliche spezifische Temperaturdifferenz ΔT_{spz} [°C/Heizpaneel]				
40 [°C]	0,53	0,30	0,20	0,14
60 [°C]	1,41	0,76	0,53	0,38



Die absolute und die spezifische Temperaturdifferenz beim Einsatz des Wandheizungssystems in einer Außenwand sowie einer Innenwand bei unterschiedlichen Warmwasserdurchsätzen und Vorlauftemperaturen (Eintrittstemperaturen) von 40 °C und 60 °C sind im Diagramm der Abbildung 11 sowie in der Tabelle 4 und der Tabelle 5 dargestellt. Dem Diagramm der Abbildung 11 sowie der Tabelle 4 und der Tabelle 5 ist zu entnehmen, dass je höher die Vor- bzw. Eintrittstemperatur und je geringer der Warmwasserdurchsatz ist, umso höher ist die absolute und folglich die spezifische Temperaturdifferenz zwischen dem Eintritt und dem Austritt des Heizsystems. Die an das Füllmittel übertragene Wärme verhält sich dabei proportional zu der Temperaturabnahme. Die Ermittlung der Temperaturabnahme beim Fließen des Warmwassers in das Heizungssystem bzw. in der eingesetzten Probewand ist notwendig, um die maximale Anzahl der Heizpaneele zu berechnen, die in einer Reihe ohne Beeinträchtigung der Funktion angeschlossen werden dürfen.

2.3 Temperaturverteilung in der Probewand

Abbildung 12 zeigt eine Aufnahme einer Wärmebildkamera bei dem Betrieb des Wandheizsystems bei einer Vorlauftemperatur von 40 °C bzw. einem Warmwasserdurchsatz von 200 kg/h. Dabei ist zu erkennen, dass die Heizelemente, die näher an dem Warmwassereintritt angeordnet sind, schneller agieren und entsprechend wärmer werden als die Heizelemente, die sich näher am Warmwasseraustritt befinden. Nach einer gewissen Zeit von ca. 100 Minuten erreichen alle Heizelemente sowie die Oberfläche der Probewand die maximalen Temperaturen.

Bei dem Betrieb des Wandheizsystems wurde mit Hilfe der Wärmebildkameraaufnahmen festgestellt, dass sich relativ hohe Temperaturen an der Wandoberfläche einstellen, welche im direkten Kontakt mit den Heizelementen ist. Je höher die Vorlauftemperatur bzw. der Durchsatz des Warmwassers sind, umso höhere und gleichmäßigere Temperaturen können an der Oberfläche der Probewand erreicht werden.

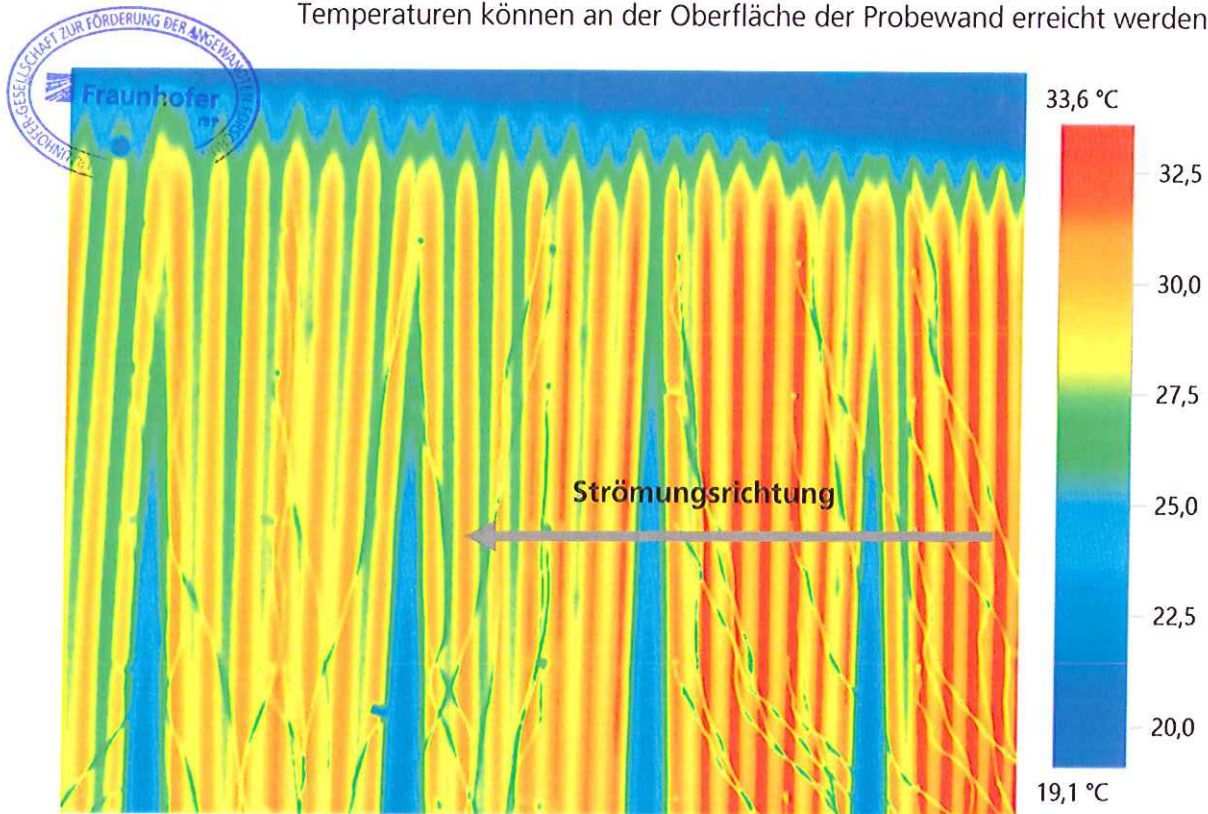
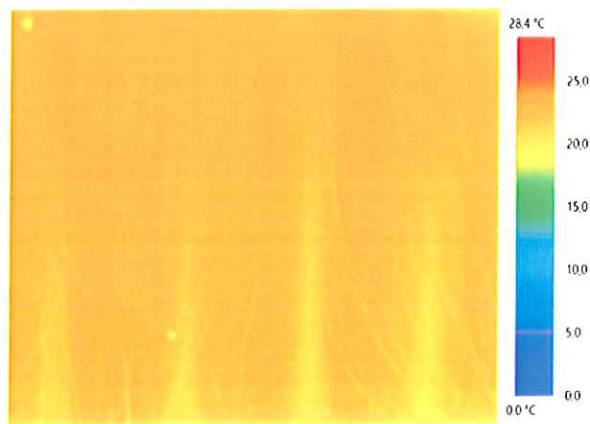


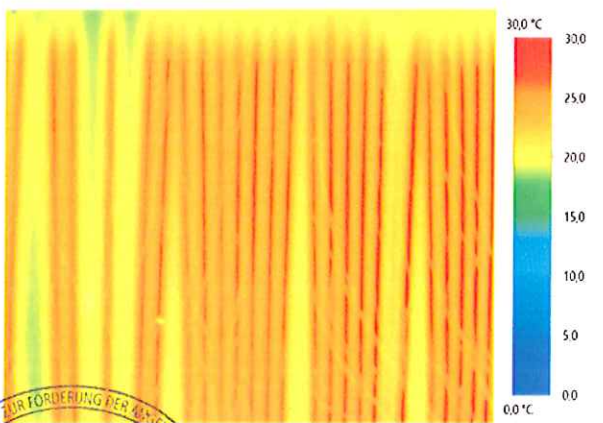
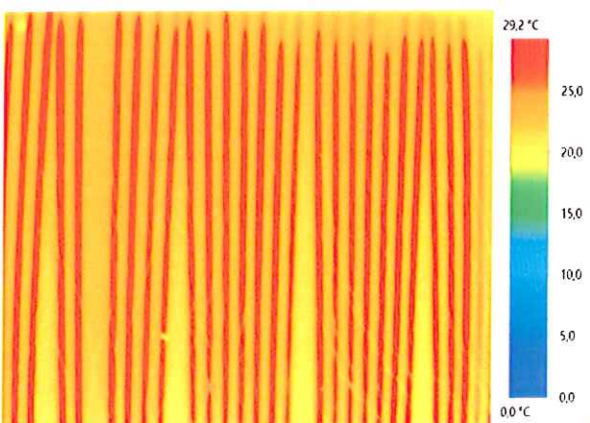
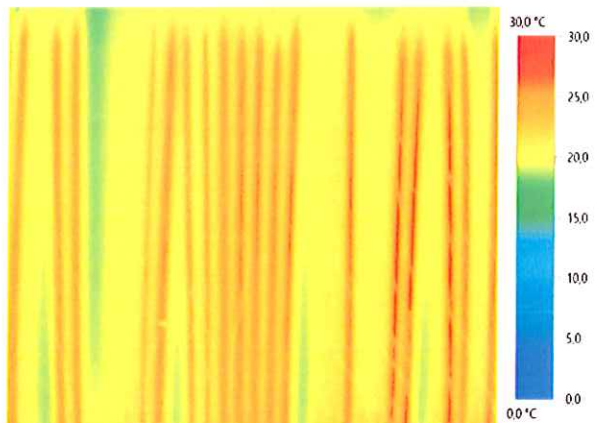
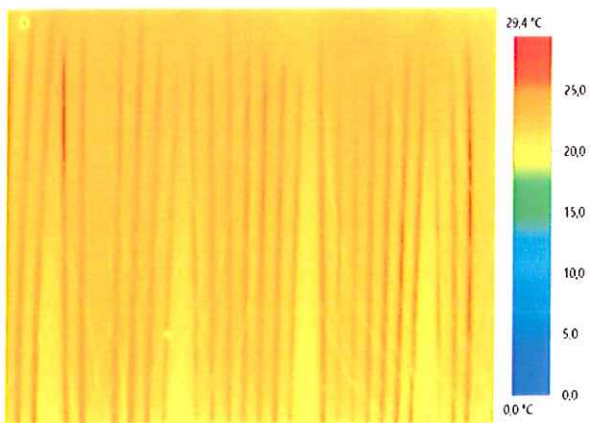
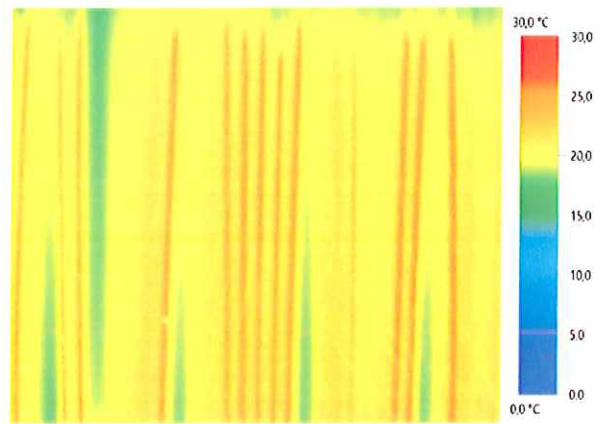
Abbildung 12: Wärmeverteilung innerhalb der Probewand beim Einsatz des Wandheizungssystems (sechs Heizpaneele bzw. Heizmodule) der Firma Soffio.

Die Abbildung 13 zeigt die Entwicklung der Oberflächentemperaturen bei dem Betrieb des Wandheizsystems bei einer Vorlauftemperatur von 40 °C (rechte Bilderreihe) und 60 °C (linke Bilderreihe) bei einem Warmwasserdurchsatz von 200 kg/h. Dabei ist zu erkennen, dass sich bei einer Vorlauftemperatur von 60 °C höhere und gleichmäßigere Temperaturen an der Oberfläche der Probewand im Beharrungszustand einstellen können als bei einer Vorlauftemperatur von 40 °C.

Vorlauftemperatur 60 [°C],
Warmwasserdurchsatz 200 [kg/h]



Vorlauftemperatur 40 [°C],
Warmwasserdurchsatz 200 [kg/h]



Vorlauftemperatur 60 [°C],
Warmwasserdurchsatz 200 [kg/h]

Vorlauftemperatur 40 [°C],
Warmwasserdurchsatz 200 [kg/h]

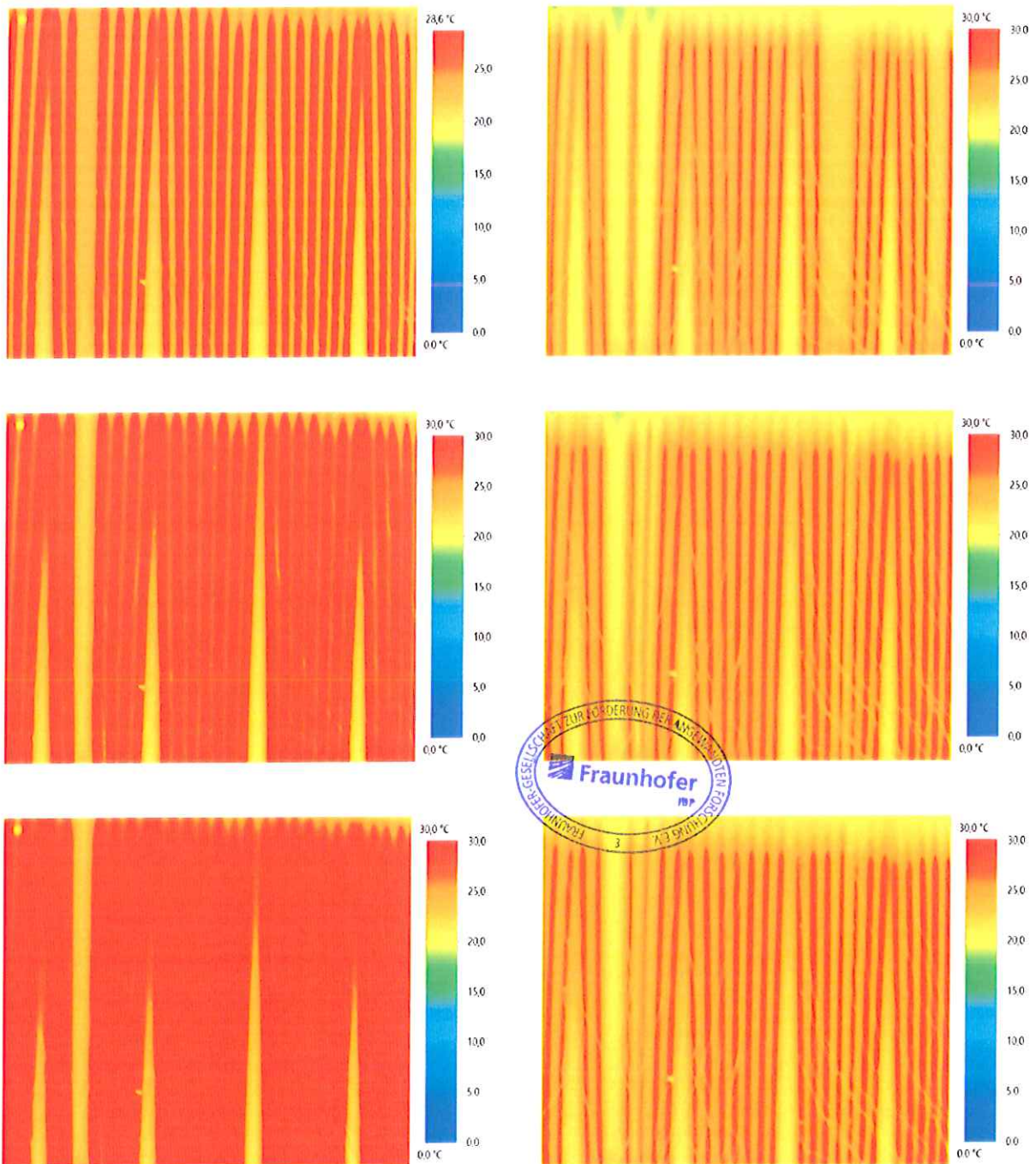


Abbildung 13: Entwicklung der Oberflächentemperaturen bei dem Betrieb des Wandheizsystems bei einer Vorlauftemperatur von 40 °C (rechte Bilderreihe) und 60 °C (linke Bilderreihe) bei einem Warmwasserdurchsatz von 200 kg/h.

Die Abbildung 14 sowie die Abbildung 15 zeigen die punktuell gemessenen Oberflächentemperaturen zum Beginn des Betriebs bei einer Temperatur von 20 °C bis zum Erreichen des Beharrungszustands bzw. eines konstanten Temperaturverhaltens.

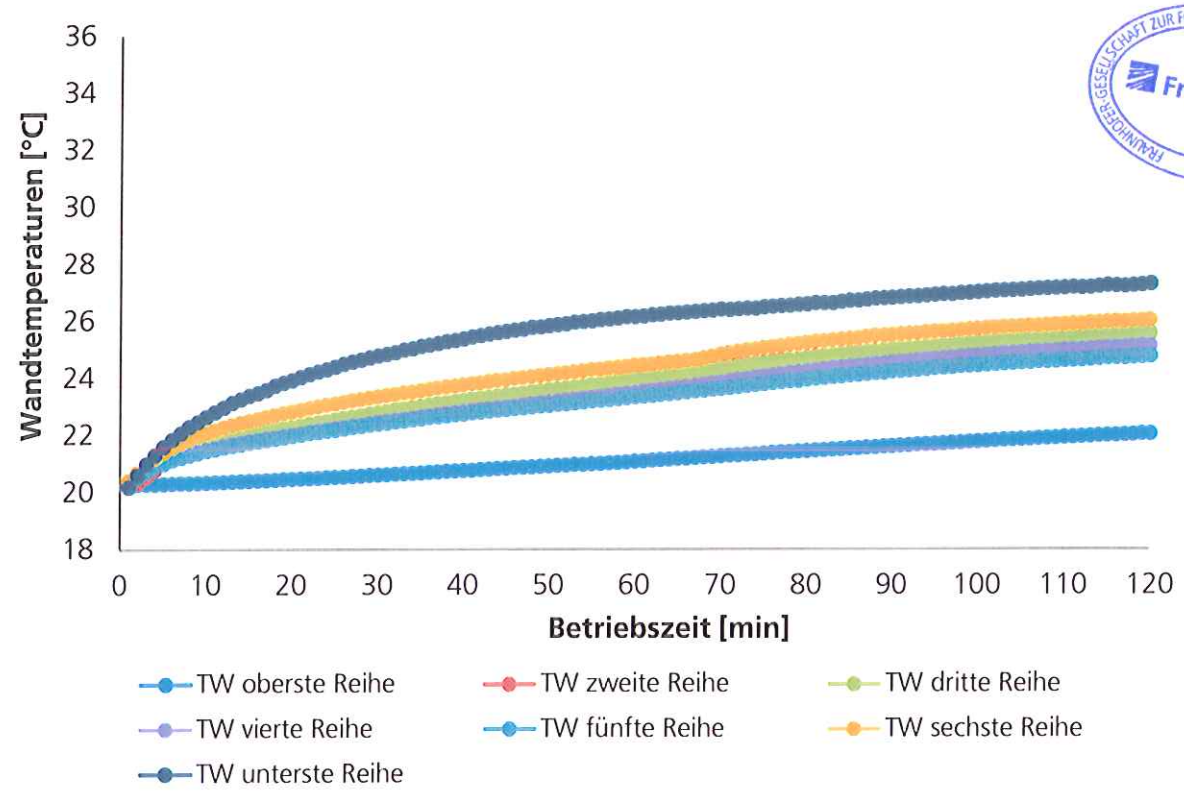


Abbildung 14: Verläufe der Oberflächentemperaturen beim Betrieb bei einer Vorlauftemperatur von 40 °C sowie einem Warmwasserdurchsatz von 400 kg/h.

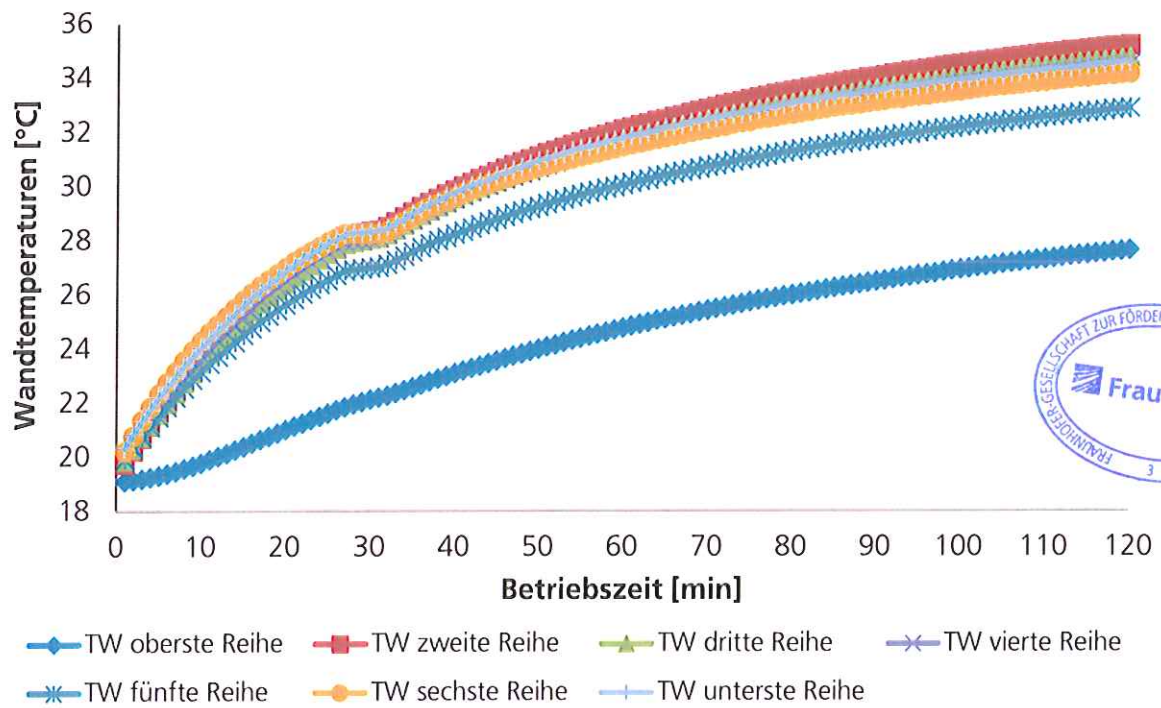


Abbildung 15: Verläufe der Oberflächentemperaturen beim Betrieb bei einer Vorlauftemperatur von 60 °C sowie einem Warmwasserdurchsatz von 400 kg/h.

Wie den beiden Diagrammen bzw. Abbildung 14 sowie Abbildung 15 zu entnehmen ist, liegen die Oberflächentemperaturen in den jeweiligen Messpunkten bei einer Vorlauftemperatur von 60 °C um ca. 10 °C höher und dichter beieinander als bei einer Vorlauftemperatur von 40 °C. Es konnten homogene Oberflächentemperaturen von ca. 35 °C über die gesamte Probewand gemessen werden.

2.4 Druckverlust des Wandheizungssystems

Zur Auswahl geeigneter Wasserpumpen und der allgemeinen Auslegung des Wandheizungssystems sind Angaben zur erforderlichen Gesamtwärmeleistung bzw. der Anzahl der erforderlichen Heizpaneele zur Deckung des Wärmebedarfs des Gebäudes sowie zum daraus resultierenden Gesamtdruckverlust notwendig.

In der Abbildung 16 ist der Druckverlust des Wandheizungssystems dargestellt, welches aus sechs Heizmodulen bzw. Heizpaneelen zusammengesetzt ist. Diese Kurven der Abbildung 16 stellen den gesamten Druckverlust im Wandheizungssystem mit allen dazugehörigen Verbindungsstücken dar.

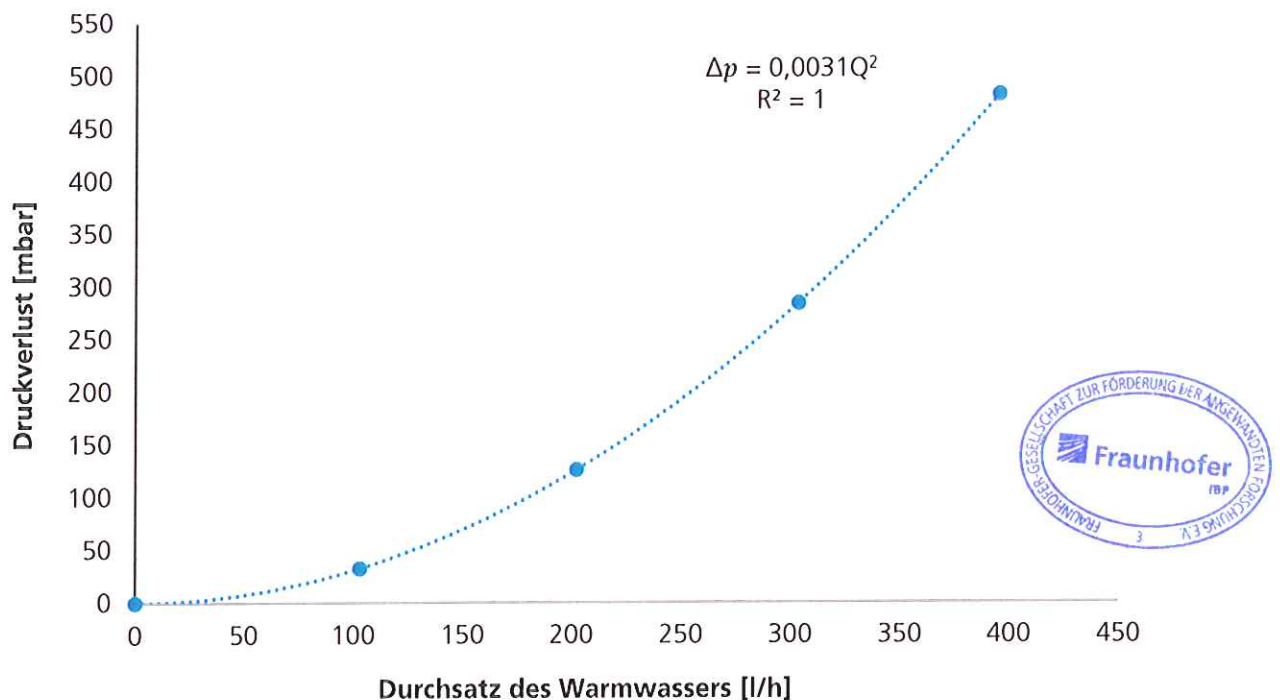


Abbildung 16: Druckverlust bei dem untersuchten Wandheizungssystem.

Dem Diagramm der Abbildung 16 ist zu entnehmen, dass der Druckverlust mit einem ansteigenden Durchsatz des Warmwassers ansteigt. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde festgestellt, dass bei einem Warmwasserdurchsatz von 200 l/h über 90 % der gesamten Wärmeleistung erreicht wird. Bei diesem Warmwasserdurchsatz wurde ein spezifischer Druckverlust von ca. 21 mbar in jedem verwendeten Heizmodul bzw. Heizpaneel ermittelt.

Die Berechnung des Druckverlustes dient zur Auslegung der notwendigen Wasserpumpen des Heizsystems. Der Druckverlust hängt in der Regel nicht nur von der Anzahl der verwendeten Heizmodule, sondern auch von dem Verbindungssystem, dem Warmwasserverteilungssystem, den Wasserventilen und von der Rohrleitung (das Material, die Form, die Länge und der Durchmesser) ab. Dazu spielt die hydraulische Schaltung der Heizmodule eine große Rolle. Die genaue Berechnung des Druckverlusts sollte individuell und unter Berücksichtigung aller verbauten Systembestandteile erfolgen.

2.5 Untersuchung der Druckbeständigkeit/Leckage

Die Druckbeständigkeit des Wandheizsystems wurde bei einem Wasserdruck von 30 bar im Neuzustand sowie nach der Untersuchung des Wandheizsystems im verbauten und nicht verbauten Zustand durchgeführt. Dabei wurden weder eine Wasserleckage noch eine Verformung der Systembestandteile festgestellt. Der Vorteil des Wandheizsystems der Firma Soffio besteht in der geringen notwendigen Wassermenge (< 30 ml/Heizpaneel) sowie in der kurzen Strömungstrecke für die Verteilung der für die Aktivierung des Füllmittels erforderlichen Wärmemenge.

3 Empfehlungen und Kenndaten zur Auslegung des Wandheizsystems

Zur Auslegung des Wandheizungssystems sollen unter anderem die Anzahl der notwendigen Heizpaneele sowie der Druckverlust im gesamten Wandheizungssystem berechnet werden. Im Folgenden wird eine vereinfachte Grundlage dargelegt, welche auf Basis der durchgeführten Untersuchungen erstellt wurde. Eine genauere verfahrenstechnische Grundlage für eine präzise Auslegung des Wandheizungssystems lässt sich nur anhand von weiteren ausführlichen Untersuchungen an unterschiedlichen Konstellationen (Wandtypen, Betriebsparameter, Systemtypen usw.) erstellen und entsprechend validieren.

3.1 Berechnung der Anzahl der notwendigen Heizpaneele

Die Wärmeleistung des Wandheizungssystems kann approximativ anhand der Formel 1 berechnet werden, welche auf Basis der durchgeführten Untersuchungen (siehe Abschnitt 2.2.1 und Abschnitt 2.2.2) abgeleitet wurde. Die Formel 1 soll für den Aufbau des Wandheizsystems in Innen- sowie Außenwänden gelten. Der Einfluss des Warmwasserdurchsatzes sowie der Einsatz des Wandheizsystems in der Außenwand auf die Wärmeleistung werden durch den Faktor k_D sowie den Faktor k_U berücksichtigt.

$$P = k_s \cdot k_U \cdot (1 + k_Q) \cdot 2 \cdot n \cdot 10^{-5} \cdot T_m^{(2,2056)} \quad \text{Formel 1}$$

Oder:

$$n = \frac{P}{k_s \cdot k_U \cdot (1 + k_Q) \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot T_m^{(2,2056)}} \quad \text{Formel 2}$$

Wobei:

- P : Die notwendige Wärmeleistung des Wandheizsystems in kW, welche dem erforderlichen gesamten Wärmebedarf des Gebäudes bzw. Wohnobjekts entspricht.
- k_U : Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Einsatzes des Wandheizsystems in Außenwänden.
- k_Q : Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Warmwasserdurchsatzes.
- k_S : Sicherheitsfaktor für die Berücksichtigung von Funktionsstörungen in Heizelementen, von tiefen Wintertemperaturen und von den Änderungen in der Art der Nutzung des Wohnobjekts.
- n : Anzahl der Heizpaneele bzw. der Heizmodule im gesamten Wandheizsystem.
- T_m : Die mittlere Temperatur des in das Heizsystem zugeführte Warmwassers in °C.

Der Gesamtwärmebedarf des Gebäudes bzw. des Wohnobjekts hängt von dem Bautyp (Passivhaus, Neubau mit Standardwärmedämmung, Sanierter Altbau mit oder Neubau ohne Wärmedämmung, Altbau ohne Wärmedämmung usw.) ab. Er errechnet sich approximativ aus der Multiplikation des spezifischen Wärmebedarfs (kW/m²) mit der gesamten zu beheizenden Wohnfläche. Der spezifische Wärmebedarf von unterschiedlichen Gebäudetypen ist in der Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Spezifischer Wärmebedarf bei unterschiedlichen Gebäudetypen.

Gebäude/Wohnobjekttyp	spez. Wärmebedarf [kW/m ²]
Passivhaus	0,015
Neubau nach EnEV	0,04
Neubau mit Standardwärmedämmung	0,06
Sanierter Altbau mit oder Neubau ohne Wärmedämmung	0,08
Altbau ohne Wärmedämmung	0,12



Der Faktor k_Q lässt sich aus der folgenden Formel 3 approximativ berechnen, wobei ein Warmwasserdurchsatz Q_W von größer als 100 kg/h einzusetzen ist.

$$k_Q = 0,1481 * \ln(Q_W) - 0,6803 \quad \text{Formel 3}$$

Der Faktor k_U ist ein Korrekturfaktor, der den Einsatz des Wandheizungssystems in Innen- oder Außenwänden berücksichtigt. Beim Einsatz des Wandheizungssystems in einer Innenwand nimmt der Faktor k_U einen Wert von eins an, wobei sein Wert beim Einsatz in einer Außenwand zwischen 0 und 1 variiert. Ein Wert von 0 wird theoretisch angenommen, wenn die Kühlung des Heizelements durch die Außenseite die Aktivierung des Füllmittels verhindert und infolgedessen die Wärme von dem Warmwasser nicht übertragen und entsprechend genutzt werden kann. In diesem Fall ist die Wärmeleistung des Wandheizsystems gleich null. Je besser die Außenwand isoliert ist, umso höher kann der Wert des Faktors k_U angesetzt werden. Bei der verwendeten Probewand ist ein Wert für den Faktor k_U von 0,85 anzunehmen. Dieser Wert gilt bei einer Außentemperatur

von bis - 8 °C. Bei niedrigeren Außentemperaturen sollten für diesen Faktor k_u niedrigere Werte angenommen werden.

Der Faktor k_s ist ein Sicherheitsfaktor und nimmt einen Wert von kleiner als eins bzw. größer als 0,90 an. Mit diesem Faktor sollen tiefere Wintertemperaturen berücksichtigt werden, bei denen der Heizwärmebedarf entsprechend ansteigt. Außerdem werden durch diesen Faktor nicht vorherrschende technische Mängel oder Funktionsstörungen in manchen Heizelementen sowie Änderungen in der Nutzung der Gebäuderäume bzw. der Wände des Wohnobjekts betrachtet.

Die mittlere Temperatur T_m des dem Heizsystem zugeführten Warmwassers soll größer als 40 °C bzw. größer als die Temperatur sein, bei der die nötige Wärmeenergie zur Aktivierung des Füllmittels der Heizelemente bereitgestellt werden kann. Es ist zu erwähnen, dass die Formel 1 sowie die Formel 3 nur für einen Bereich des Warmwassers zwischen 40 °C und 65 °C bzw. für einen Warmwasserdurchsatz zwischen 100 kg/h und 400 kg/h gelten, wobei eine einfache Validierung anhand der Messwerte durchgeführt wurde.

Es ist zu erwähnen, dass die oben geschilderte vereinfachte verfahrenstechnische Grundlage anhand von weiteren Messungen validiert werden sollte. Diese dient nur für die erste Berechnung bzw. vereinfachte Auslegung des Wandheizungssystems der Firma Soffio in der untersuchten Konstellation.

3.2 Berechnung der maximalen Anzahl der Heizpaneele in einer Heizreihe

Wie im Abschnitt 2.2.3 erwähnt wurde, hängt die maximale Anzahl der Heizpaneele, die in einer Heizreihe des Wandheizungssystems ohne Beeinträchtigung der Funktion angeschlossen werden, von der Vorlauf- bzw. der Eingangstemperatur sowie von dem Durchsatz des Warmwassers ab. Je höher die Vorlauf- und je niedriger der Warmwasserdurchsatz sind, umso höher stellt sich die absolute und folglich die spezifische Temperaturdifferenz zwischen dem Eingang und Ausgang des Heizsystems ein bzw. mehr Wärme wird an die Heizelemente bzw. das Füllmittel übertragen. Die maximale Anzahl der Heizpaneele errechnet sich approximativ gemäß der Formel 4:

$$n_R = \frac{T_{vor} - T_{min}}{\Delta T_{spz.}} \quad \text{Formel 4}$$

Wobei:

T_{vor} : Die Temperatur beim Eintritt des Warmwassers in das Heizsystem [°C].

T_{min} : Die minimale notwendige Wassertemperatur für die Aktivierung des Füllmittels bzw. für eine effektive Übertragung der Wärme oder für die Deckung des Wärmebedarfs in dem Wohnraum bzw. in den jeweiligen Wandsegmenten [°C].

$\Delta T_{spz.}$: Durchschnittliche spezifische Temperaturdifferenz zwischen Temperatureingang und -ausgang des Heizsystems [°C/Heizpaneele].

Die minimale notwendige Wassertemperatur für die Aktivierung des Füllmittels lag bei dem untersuchten Heizsystem bei ca. 38 °C. Die spezifische Temperaturdifferenz $\Delta T_{spz.}$ beschreibt die Temperaturabnahme von einem Heizmodul zum darauffolgend angeströmten Heizmodul. Diese hängt, wie bereits dargestellt wurde, von vielen Faktoren ab, vor allem jedoch von dem Warmwasserdurchsatz und der Vorlauf- bzw. Eintrittstemperatur. Die ermittelten absoluten sowie die durchschnittlichen spezifischen Temperaturen sind im Diagramm der Abbildung 11 sowie in der Tabelle 4 sowie der Tabelle 5 dargestellt.

3.3 Berechnung des Druckverlusts im Wandheizungssystem

Der Druckverlust im Wandheizungssystem kann gemäß der Formel 5 berechnet werden, welche in der Regel beim Einsatz von Rohrleitungen verwendet wird. Die Rohrleitung setzt sich sowohl aus dem Rohrsystem zur Verbindung der Heizmodule, als auch aus den rohrförmigen Kanälen der Heizpaneele zusammen.

$$\Delta p = \frac{\lambda \cdot l \cdot \rho_W \cdot \vartheta^2}{2 \cdot d} \quad \text{Formel 5}$$

Wobei:

Δp : Druckverlust in der Rohrleitung in Pa.

ϑ : Strömungsgeschwindigkeit des Warmwassers in der Rohrleitung in m/s.

λ : Reibungskoeffizient der verwendeten Rohrleitung.

l : Länge der Rohrleitung in m.

ρ_W : Die Dichte des Warmwassers in kg/m³.

d : Der Durchmesser der Rohrleitung in m.

Die Strömungsgeschwindigkeit im Rohr errechnet sich gemäß der Formel 6:

$$\vartheta = \frac{4 \cdot Q_W}{\pi \cdot d^2} \quad \text{Formel 6}$$

Q_W stellt den Durchsatz des Warmwassers (m³/s) beim Betrieb des Wandheizungsystems dar. Für die Anwendung der Formel 5 wird der Reibungskoeffizient benötigt, welcher in der Regel empirisch ermittelt wird. Bei dem untersuchten Wandheizungssystem wurde ein durchschnittlicher Wert für den Reibungskoeffizienten von $\lambda = 0,0485$ ermittelt. Zusätzlich zu dem Druckverlust in der Rohrleitung soll der Druckverlust in den sonstigen Bestandteilen des Wandheizungsystems wie z. B. in den Ventilen, Wasserverteiler, Rohrverbindungsstücken usw. berücksichtigt werden.