

Institut für Stahlbau

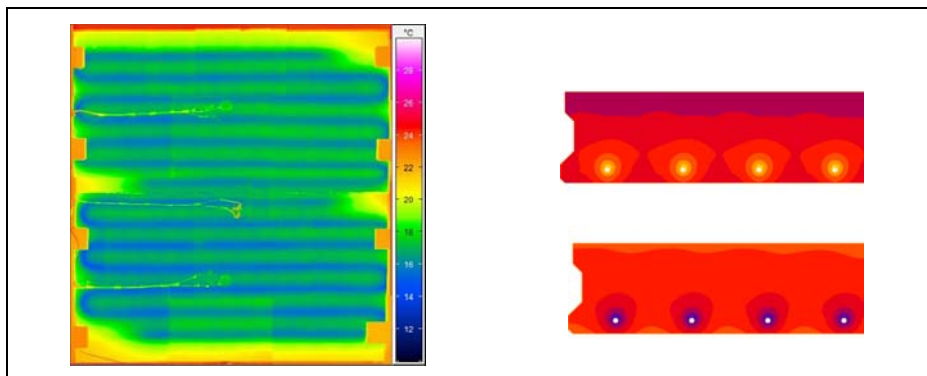
Prof. Dr.-Ing. M. Kuhnhenne

Mies-van-der-Rohe-Str. 1

52074 Aachen

Dennert DX Therm

Messung und Berechnung der thermischen Leistung



- Messergebnisse Prüfstand, Kühlfall und Heizfall
- Simulationsergebnisse FEM

Aachen, 31. Januar 2018

M. Kuhnhenne

Prof. Dr.-Ing. Markus Kuhnhenne

B. Döring

Prof. Dr.-Ing. Bernd Döring

Auftraggeber: Dennert Baustoffwelt GmbH & Co.KG
Veit-Dennert-Strasse 7
96132 Schlüsselfeld

Auftragnehmer: **AINA GmbH Institut für Nachhaltiges Bauen
Aachen**
Grüner Weg 1
52070 Aachen

Tel: +49 (0)241 990 356 47

Bearbeitet von: Prof. Dr.-Ing. Bernd Döring
Prof. Dr.-Ing. Markus Kuhnhenne

in Zusammenarbeit mit:

Institut für Stahlbau
RWTH Aachen
Mies-van-der-Rohe-Str. 1
D - 52074 Aachen

Seiten: 1 - 23

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung.....	4
2	Aufbau der Deckenplatten und Messtechnik.....	5
2.1	Aufbau der Deckenplatten.....	5
2.2	Messtechnik	6
3	Messergebnisse Kühlfall	9
3.1	Einschaltvorgang.....	9
3.2	Stationärer Zustand	9
3.3	Thermografie Kühlfall	12
4	Messergebnisse Heizfall.....	13
4.1	Einschaltvorgang.....	13
4.2	Messreihe mit stationären Zuständen.....	14
4.3	Thermografie Heizfall.....	16
5	Simulationsergebnisse	18
5.1	Kühlfall	18
5.2	Heizfall.....	19
5.3	Einschaltvorgang Kühlfall	20
5.4	Einschaltvorgang Heizfall.....	21
5.5	Erläuterungen Einschaltvorgang	22
6	Zusammenfassung	23

1 Aufgabenstellung

Vorgefertigte Vollmontagedecken mit integriertem Temperierungssystem stellen eine neuartige Produktgruppe dar. Für eine bestimmte Ausführung dieser Elemente (Dennert DX Therm) soll anhand von Messungen an Probekörpern sowie durch numerische Berechnungen die thermische Leistung für den Heiz- und Kühlfall ermittelt werden.

2 Aufbau der Deckenplatten und Messtechnik

2.1 Aufbau der Deckenplatten

Der Querschnitt der zu untersuchenden Deckenplatten Dennert DX Therm ist in Bild 1 dargestellt.

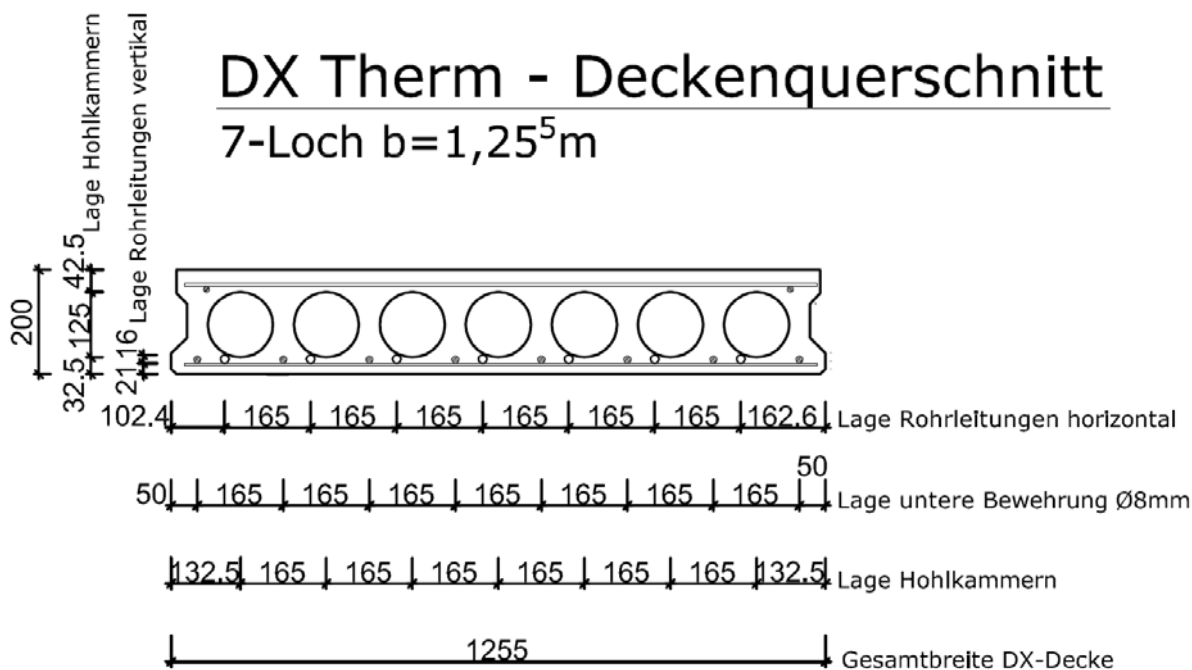


Bild 1: DX Therm 20, 7-Loch, Querschnitt (Quelle: Dennert Pdf 2017)

Die Probekörper der Fertigteildecke haben eine Breite von 1,255 m und eine Länge von 2,5 m, d.h. eine Fläche von 6,275 m² bei zwei Elementen.

Die Deckenhöhe beträgt 20 cm. In der zu untersuchenden Klimadecke sind Mehrschichtverbundrohre mit integriertem Alu-Kernrohr mit 16 mm Außendurchmesser verbaut. Die im unteren Abschnitt der Hohlkörperdecke verbauten Rohre (16 x 2 mm) liegen in einem Raster von 16,5 cm und haben eine Betondeckung von 2,1 cm.

In der Messung und bei den Simulationen wird eine turbulente Strömung vorausgesetzt, die einen Wärmeübergangskoeffizienten von größer 1000 W/m²K ergibt. Eine turbulente Strömung stellt sich bei dem gegebenen Rohrdurchmesser bei einem Volumenstrom von größer als etwa 80 l/h ein.

2.2 Messtechnik

Die Messungen werden im Deckenprüfstand des Lehrstuhls für Stahlbau und Leichtmetallbau an der RWTH Aachen durchgeführt. Bild 2 zeigt das Prinzip und Bild 3 ein Foto des geöffneten Prüfstandes.

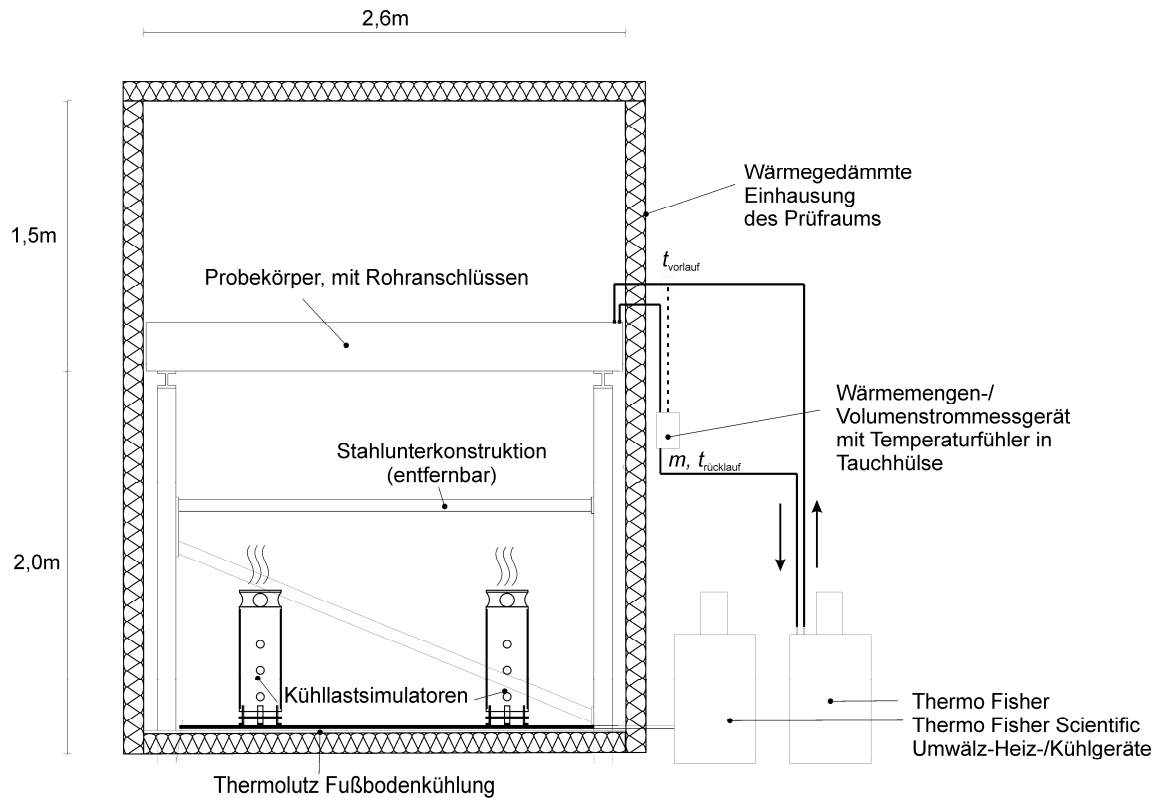


Bild 2: Deckenprüfstand (schematisch), Kühlfall



Bild 3: Geöffneter Deckenprüfstand mit installierter Messtechnik sowie Dämmung des Versuchskörpers

Bild 4 zeigt die Position der eingesetzten Messfühler. Es kommen insgesamt siebzehn Temperaturfühler zur Messung der Oberflächen-, Luft- und Wassertemperaturen zum Einsatz.

Die Temperatursensoren T8, T10 sowie T2, T4 werden auf der Deckenunterseite platziert und zeichnen paarweise die Temperaturwerte unterhalb eines Rohrs sowie zwischen zwei Rohren auf.

Auf der Oberseite der Fertigteildecke sind die Temperaturfühler T12 und T5 jeweils auf Höhe der wasserführenden Rohre verklebt.

Des Weiteren kommt auf jeder Deckenoberfläche eine Wärmestrommessplatte (WMS1-WMS4) zum Einsatz.

Die Temperatursensoren T9/T16, T1/T17, T20 und T18 messen jeweils die Wassertemperaturen an den Rohren an Ein- und Austritt der Mehrschichtverbundrohre. Der Wärmemengenzähler ist außerhalb des Prüfstandes angebracht und nimmt die Temperaturdaten von Vorlauf und Rücklauf sowie der Strömungsgeschwindigkeit auf. Zur Analyse möglicher Temperaturschwankungen der Raumluft zeichnet der Temperatursensor T14 die Temperatur der Hallenluft auf.

Weiterhin werden vier Wärmestrommessplatten (WSM1 - WSM4) sowie ein Wärmemengenzähler (WMZ) für den Heiz- bzw. Kühlkreislauf verwendet.

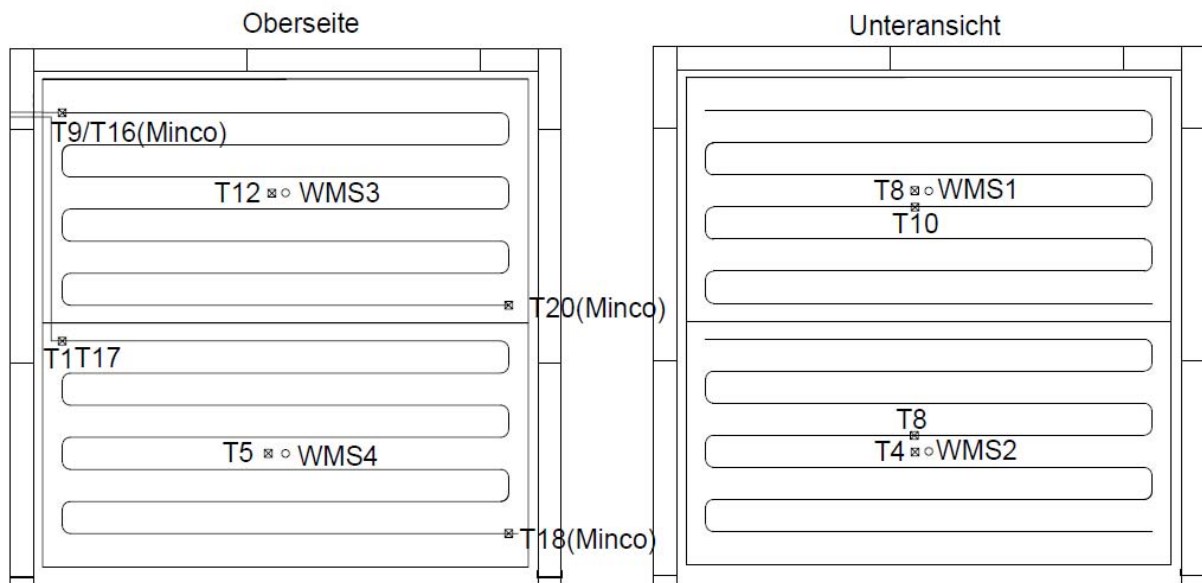


Bild 4: Messfühler

Für die Messung des Kühlfalls wird der Prüfstand durch die Kühllastsimulatoren ("Dummys") erwärmt. Diese elektrisch beheizten Kühllastsimulatoren werden durch einen elektronischen Regler angesteuert, über den eine konstante Temperatur im Prüfstand eingestellt werden kann, unabhängig von der Temperatur in der Halle und der Vorlauftemperatur des Kaltwasserkreislaufs.

Für den Heizfall kommt im Prinzip die gleiche Technik zum Einsatz, allerdings ist der Versuchsaufbau zur Nachbildung einer Heizlast aufwändiger als das Generieren einer Kühllast durch die "Dummys": Zu diesem Zweck wird ein wasserführender Kreislauf auf dem Boden des Prüfstandes installiert und mit einem weiteren Umwälzthermostaten, der Kaltwasser liefert, verbunden. Dieser Umwälzthermostat läuft immer mit maximaler Kühlleistung. Um hier einstellbare und konstante Temperaturen im Prüfstand zu erzielen, werden zusätzlich die Kühllastsimulatoren über die Regelung angesteuert.

3 Messergebnisse Kühlfall

Nachfolgend werden die Versuchsergebnisse der experimentellen Untersuchung des Deckensystems im instationären (Einschaltvorgang) sowie stationären Zustand dargestellt.

3.1 Einschaltvorgang

Für den Kühlfall werden exemplarisch die Messergebnisse für einen Schaltvorgang der Vorlauftemperatur dargestellt. Ausgehend einer Decke im stationären Zustand mit einer Vorlauftemperatur von 26°C wird die Wassertemperatur zum Zeitpunkt $t=0$ schlagartig auf etwa 20 Grad herabgesetzt und die Raumtemperatur wird möglichst konstant bei 26,7 Grad über die gesamte Prüfdauer gehalten (Bild 5).

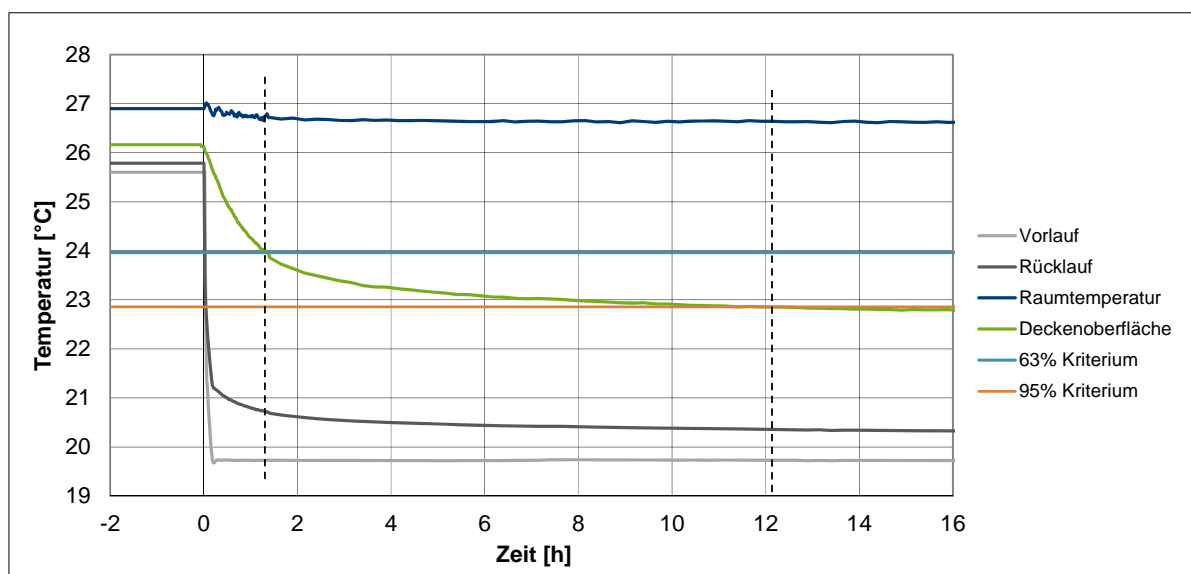


Bild 5: Temperaturverlauf ausgewählter Messfühler bei Schalten der Vorlauftemperatur im Kühlfall

Die Platte kühlt herunter, nach 83 Minuten sind die 63 % des neuen stationären Zustandes erreicht, dieser Wert wird als Zeitkonstante bezeichnet. Nach etwa 12:15 h sind 95% des neuen stationären Zustandes erreicht, der transiente Vorgang ist damit praktisch abgeschlossen.

3.2 Stationärer Zustand

Über einen Zeitraum von etwa drei Wochen wurde eine Messreihe aufgenommen, bei der die Vorlauftemperatur in Zwei-Grad-Schritten zwischen 14 °C und 26 °C eingestellt wurde (Bild 6). Es dauert dann etwa 15 Stunden, bis sich ein stationärer Zustand einstellt (siehe Abschnitt 3.1). Wenn ein stationärer Zustand erreicht ist, können die Messdaten ausgewertet werden. Die Auswahl der ausgewerteten Intervalle ist ebenfalls in Bild 6 dargestellt.

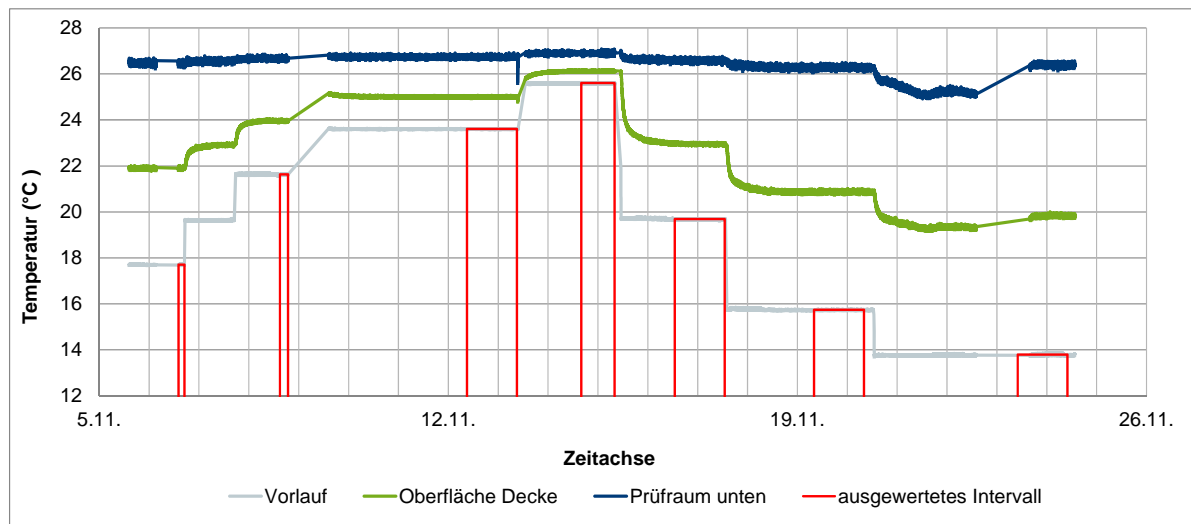


Bild 6: Temperaturen ausgewählter Messfühler über die gesamte Messperiode (Kühlfall) und Kennzeichnung der ausgewerteten Intervalle

Aus Kenntnis von Volumenstrom und Vor- und Rücklauftemperatur lässt sich die Wärmeleistung ermitteln, die über die Deckenplatten abgeführt wird.

Parallel dazu werden Messungen mit Wärmestrommessplatten zur Plausibilitätsprüfung durchgeführt.

In der nachfolgenden Grafik sind nun die die Ergebnisse der ausgewerteten Intervalle dargestellt (Bild 7, Bild 8). Wichtig für die Charakterisierung der thermischen Leistungsfähigkeit ist die Temperaturdifferenz zwischen Wasserkreislauf (mittlere Temperatur $T_{w,m}$) und der operativen Temperatur im Prüfraum T_{op} .

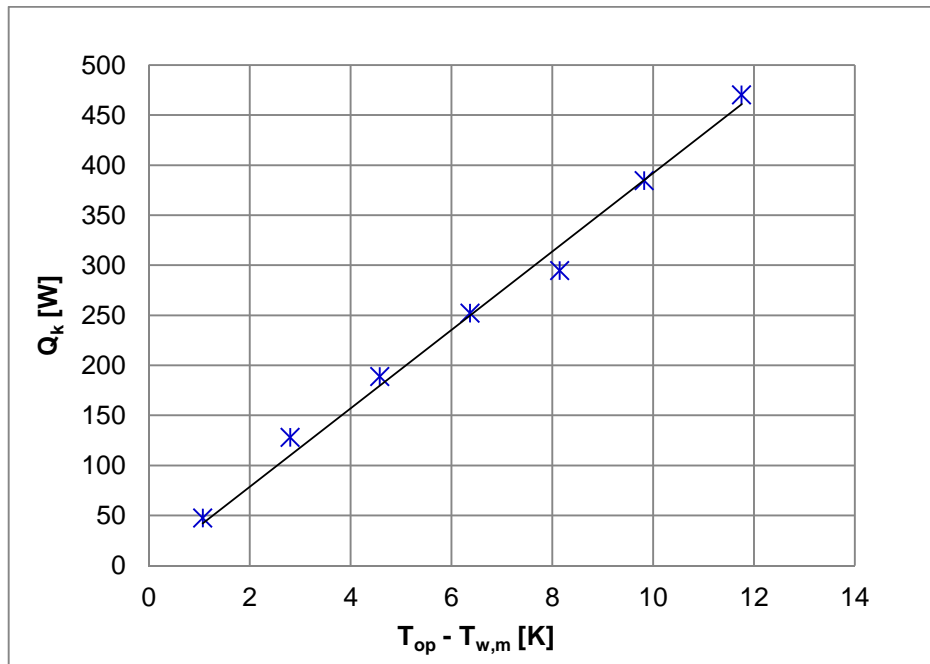


Bild 7: Kühlleistung des Deckenelementes bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen

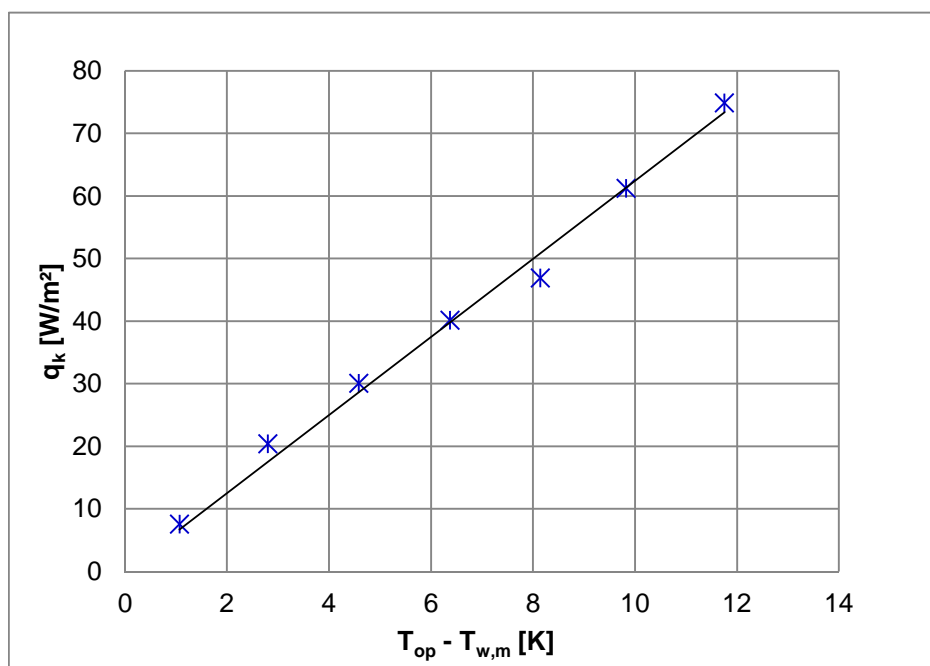


Bild 8: Spezifische Kühlleistung des Deckenelementes bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen

Diese Messwerte werden zunächst linear interpoliert. Die lineare Interpolation liefert folgende Betriebskennlinie:

$$q_k = 6,24 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot \Delta T \text{ [in K]}$$

mit $\Delta T = T_{op} - T_{w,m}$

und $T_{w,m}$ mittlere Wassertemperatur

T_{op} operative Raumtemperatur

Unterstellt man, dass der Wärmeübergang bei aufwärts gerichtetem Wärmestrom von der Temperaturdifferenz abhängt, bekommt man einen etwas überproportionalen Kurvenverlauf, d.h. bei doppelter Temperaturdifferenz ist die übertragene Leistung mehr als doppelt so hoch. Bei Fußbodenheizungen bzw. Deckenkühlungen wird hierfür die sogenannte Basiskennlinie verwendet (DIN EN 1264-2). In Bild 9 ist die Interpolation unter Berücksichtigung der Basiskennlinie eingetragen (rot), zusätzlich die lineare Interpolation (schwarz).

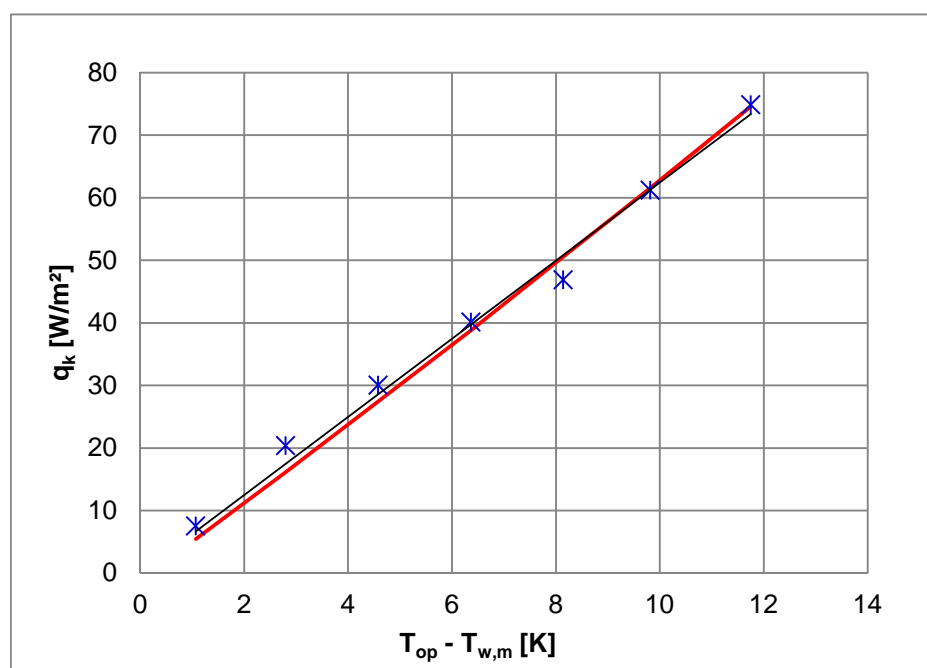


Bild 9: Spezifische Kühlleistung des Deckenelementes bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen, Interpolation unter Berücksichtigung der Basiskennlinie

3.3 Thermografie Kühlfall

Um einen visuellen Eindruck von der Temperaturverteilung zu erhalten, wurde eine Thermografieaufnahme im Deckenprüfstand bei einer Vorlauftemperatur von 12 °C angefertigt (Bild 10).

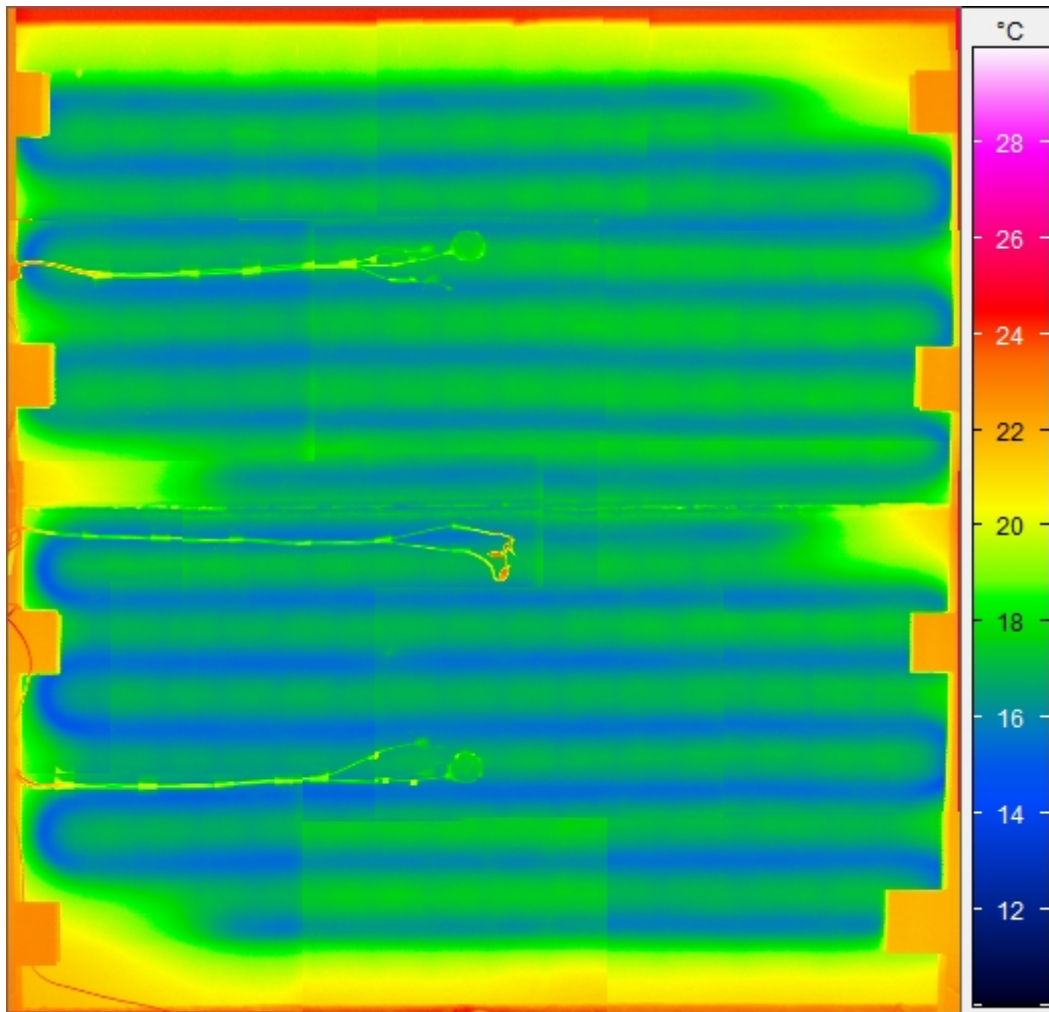


Bild 10: Thermografieaufnahme Kühlfall (Vorlauftemperatur 12 °C, Raumtemperatur 26 °C)

4 Messergebnisse Heizfall

4.1 Einschaltvorgang

Für den Heizfall werden exemplarisch die Messergebnisse für einen Schaltvorgang der Vorlauftemperatur dargestellt. Ausgehend einer Decke im stationären Zustand mit einer Vorlauftemperatur von 29,8 °C wird die Wassertemperatur zum Zeitpunkt $t=0$ schlagartig auf etwa 37,5 °C erhöht und die operative Raumtemperatur wird möglichst konstant bei 25 °C über die gesamte Prüfdauer gehalten (Bild 11).

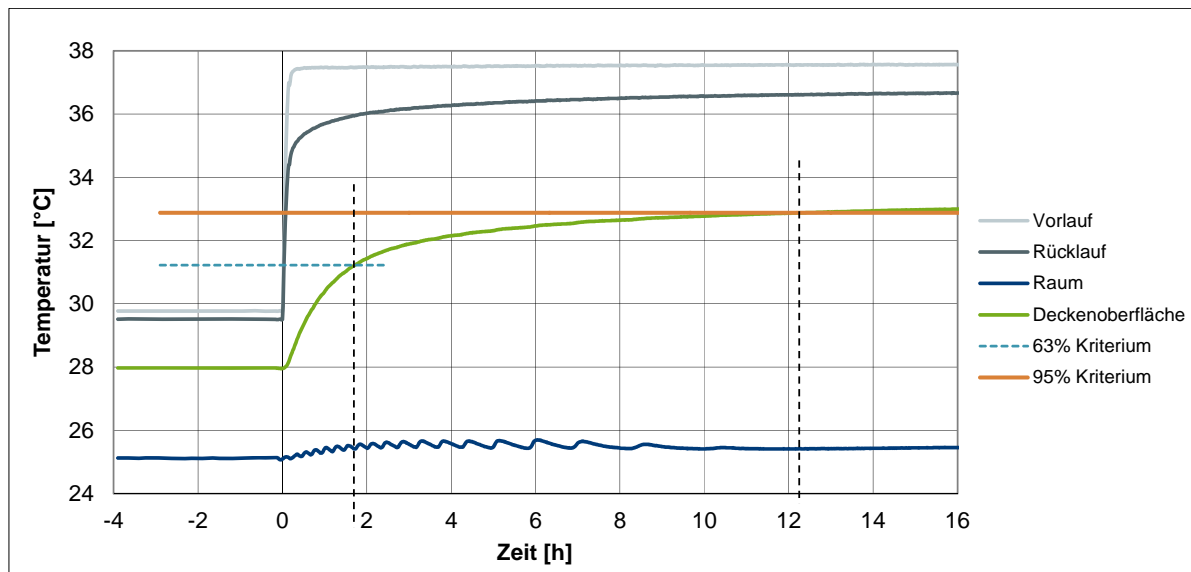


Bild 11: Temperaturverlauf ausgewählter Messfühler bei Schalten der Vorlauftemperatur im Heizfall

Die Platte heizt sich auf, nach 103 Minuten sind die 63 % des neuen stationären Zustandes erreicht, dieser Wert wird als Zeitkonstante bezeichnet. Nach etwa 12:15 h sind auch hier 95% des neuen stationären Zustandes erreicht, der transiente Vorgang ist damit praktisch abgeschlossen.

4.2 Messreihe mit stationären Zuständen

Über einen Zeitraum von etwa vier Wochen (mit einer Unterbrechung von knapp zwei Wochen um den Jahreswechsel 2017/18) wurde eine Messreihe aufgenommen, bei der die Vorlauftemperatur in Zwei-Grad-Schritten zwischen 30 °C und 38 °C eingestellt wurde (Bild 6). Es dauert dann etwa 15 Stunden, bis sich ein stationärer Zustand einstellt (siehe Abschnitt 4.1). Wenn ein stationärer Zustand erreicht ist, können die Messdaten ausgewertet werden. Die Auswahl der ausgewerteten Intervalle ist ebenfalls in Bild 12 dargestellt.

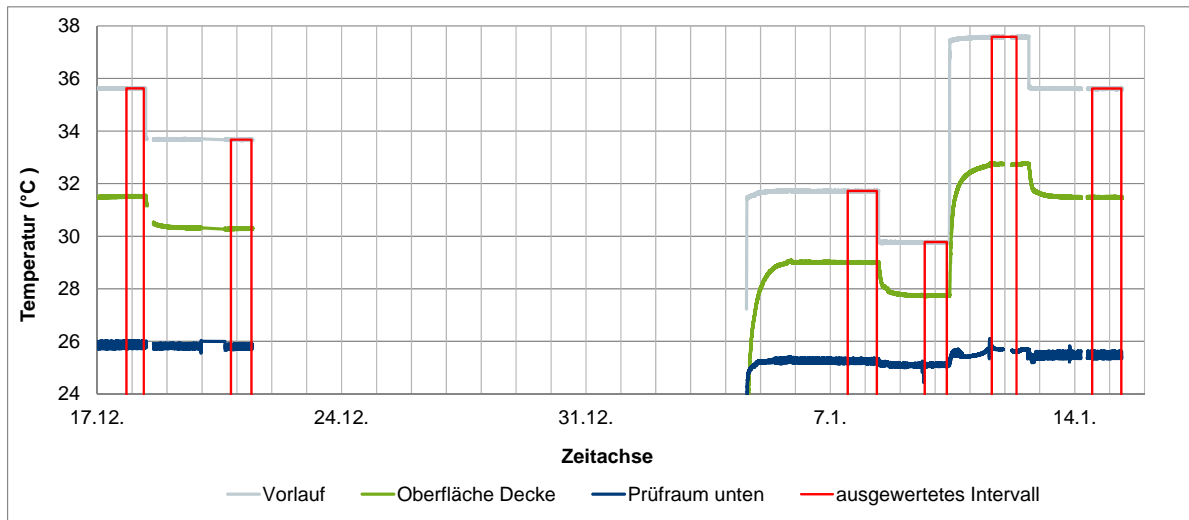


Bild 12: Temperaturen ausgewählter Messfühler über die gesamte Messperiode (Heizfall) und Kennzeichnung der ausgewerteten Intervalle

Analog zum Kühlfall kann auch hier aus dem Volumenstrom und Vor- und Rücklauftemperatur die Wärmeleistung ermittelt werden, die über die Deckenplatten dem Raum zugeführt wird.

Parallel dazu werden Messungen mit Wärmestrommessplatten zur Plausibilitätsprüfung durchgeführt.

In der nachfolgenden Grafik sind nun die die Ergebnisse der ausgewerteten Intervalle dargestellt (Bild 13, Bild 14). Wichtig für die Charakterisierung der thermischen Leistungsfähigkeit ist die Temperaturdifferenz zwischen Wasserkreislauf (mittlere Temperatur $T_{w,m}$) und der operativen Temperatur im Prüfraum T_{op} .

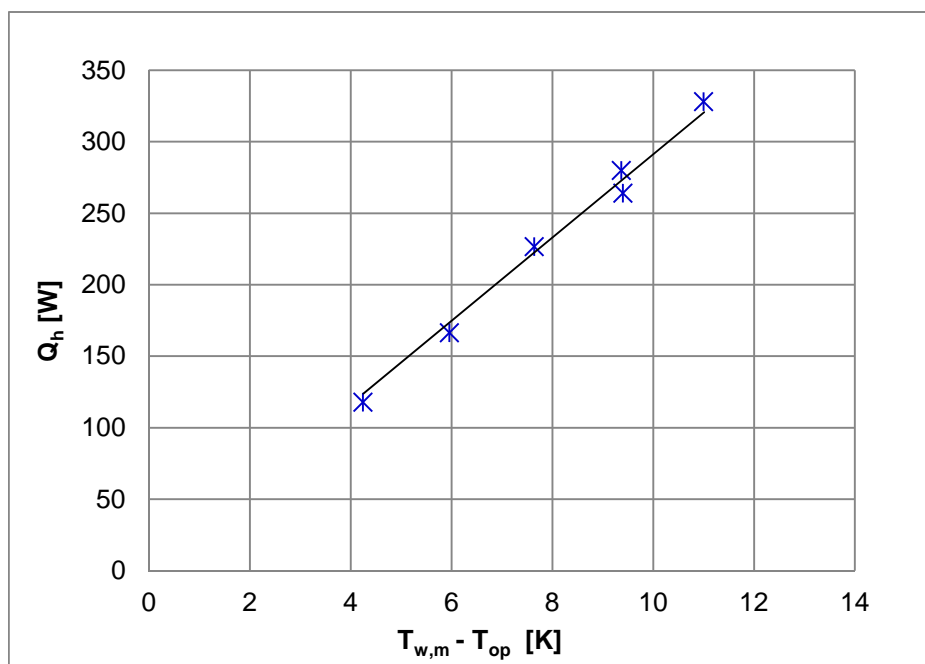


Bild 13: Heizleistung des Deckenelementes bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen

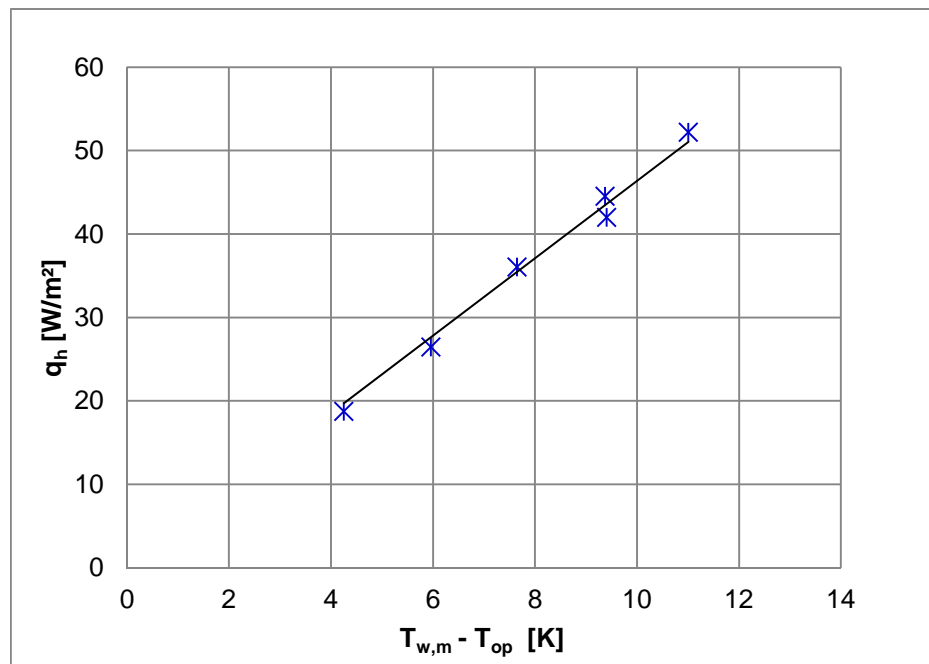


Bild 14: Spezifische Heizleistung des Deckenelementes bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen

Diese Messwerte werden linear interpoliert. Die lineare Interpolation liefert folgende Betriebskennlinie:

$$q_h = 4,64 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot \Delta T \text{ [in K]}$$

mit $\Delta T = T_{w,m} - T_{op}$

und $T_{w,m}$ mittlere Wassertemperatur

T_{op} operative Raumtemperatur

Beim abwärts gerichteten Wärmestrom ist der Wärmeübergang nur geringfügig von der Temperaturdifferenz abhängig, daher wird hier im Gegensatz zum Kühlfall keine differenzierte Analyse dazu durchgeführt.

4.3 Thermografie Heizfall

Um einen visuellen Eindruck von der Temperaturverteilung zu erhalten, wurde eine Thermografieaufnahme im Deckenprüfstand bei einer Vorlauftemperatur von 34 °C und einer operativen Raumtemperatur von 26 °C angefertigt (Bild 15).

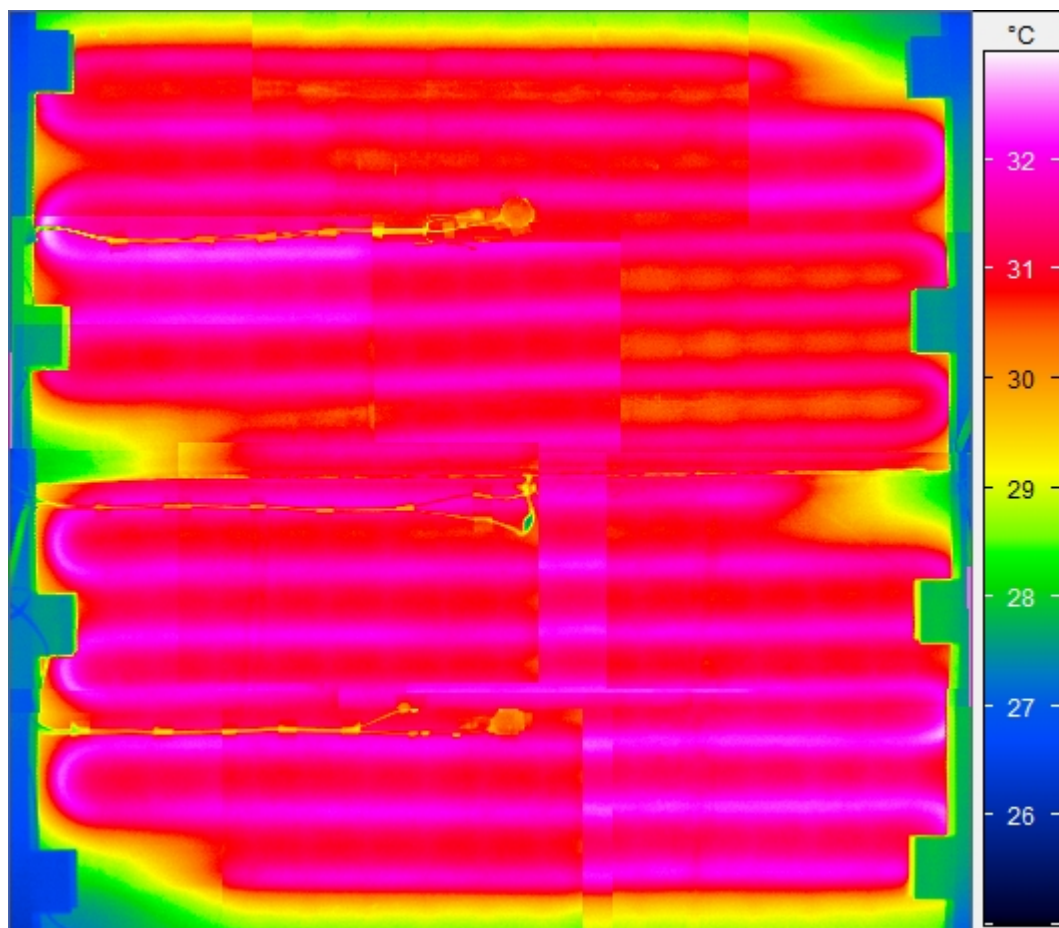


Bild 15: Thermografieaufnahme Heizfall (Vorlauftemperatur 34 °C, Raumtemperatur 26 °C)

5 Simulationsergebnisse

5.1 Kühlfall

Mit Hilfe der Finite Elemente Software Marc Mentat wird ein FEM-Modell des Deckenquerschnitts erstellt. Die Stahlmattenbewehrung wird hierbei vernachlässigt, da diese nur einen geringfügigen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Bild 16 zeigt die Geometrie des Probekörpers und die dazugehörigen Materialien.

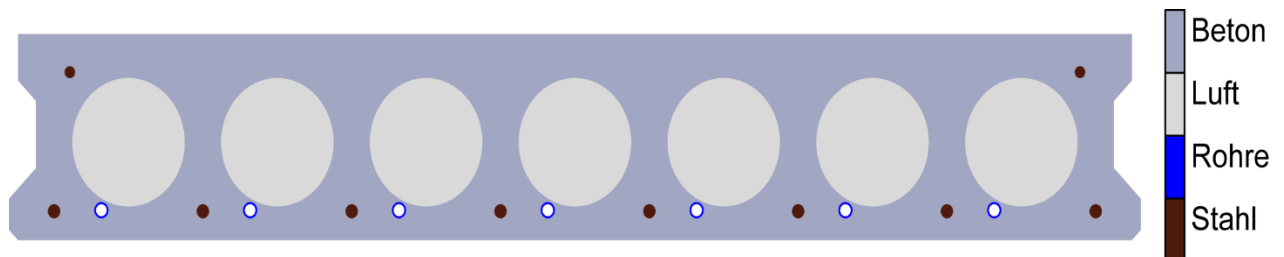


Bild 16: Deckenquerschnitt für die FEM-Simulation

Weitere Randbedingungen bzw. Annahmen für die Simulation:

Mittlere Wassertemperatur: 20°C

Operative Raumtemperatur oben und unten: 26 °C

Thermischer Widerstand Bodenaufbau: 0,8 m²K/W

Für den Bodenaufbau oberhalb des Deckenelements (Dämmung, Bodenbelag) wurden zwei Varianten betrachtet:

- a) ein thermischer Widerstand von 0,8 m²K/W, was z.B. 20 mm Dämmung mit $\lambda = 0,025$ W/mK entspricht (typischer Fall für viele Bodenaufbauten)
- b) ein thermischer Widerstand von 3 m²K/W, d.h. es findet nur ein sehr geringer Wärmetransfer über die Bodenfläche statt, entspricht dem Versuchsaufbau mit 10 cm PU-Dämmung oberhalb der Deckenplatte

Bild 17 zeigt die Temperaturverteilung im Bauteil für den Kühlfall, Variante (a).

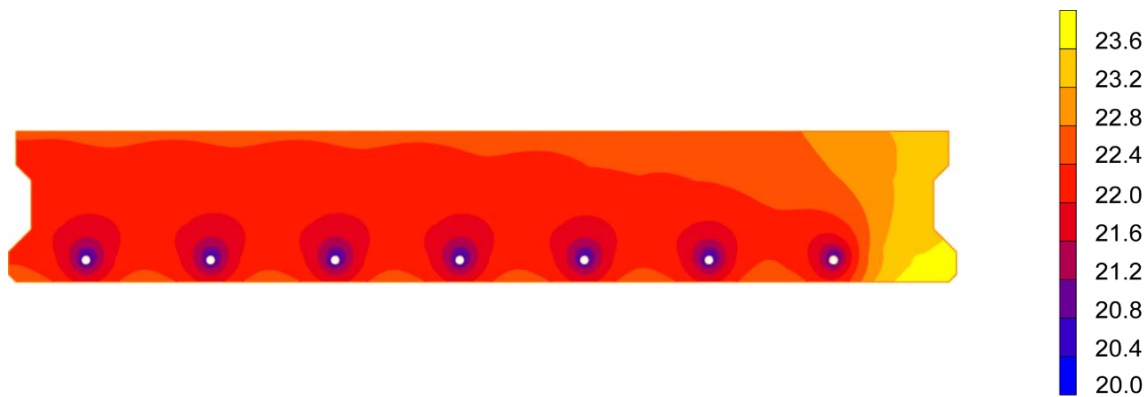


Bild 17: Simulationsergebnis Kühlfall, Variante (a)

Für den oben dargestellten Fall wird damit eine Kühlleistung von $38,95 \text{ W/m}^2$ übertragen, bezieht man den Wert auf die Temperaturdifferenz Raum - mittlere Wassertemperatur lassen sich folgende Betriebskennlinien ermitteln (vgl. Messergebnis Kap. 3.2):

$$q_k = 6,49 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot \Delta T \text{ [in K]} \text{ (Variante a)}$$

$$q_k = 6,23 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot \Delta T \text{ [in K]} \text{ (Variante b)}$$

$$\text{mit } \Delta T = T_{\text{op}} - T_{\text{w,m}}$$

$T_{\text{w,m}}$ Mittelwert der Wassertemperatur

T_{op} operative Raumtemperatur

5.2 Heizfall

Mit dem gleichen FEM-Modell wie für den Kühlfall wurde der Heizfall numerisch untersucht, auch hier mit der Variation des Bodenaufbaus.

Weitere Randbedingungen bzw. Annahmen für die Simulation:

Mittlere Wassertemperatur: $26 \text{ }^\circ\text{C}$

Operative Raumtemperatur oben und unten: $20 \text{ }^\circ\text{C}$

Bild 17 zeigt die Temperaturverteilung im Bauteil für den Heizfall (Variante a).

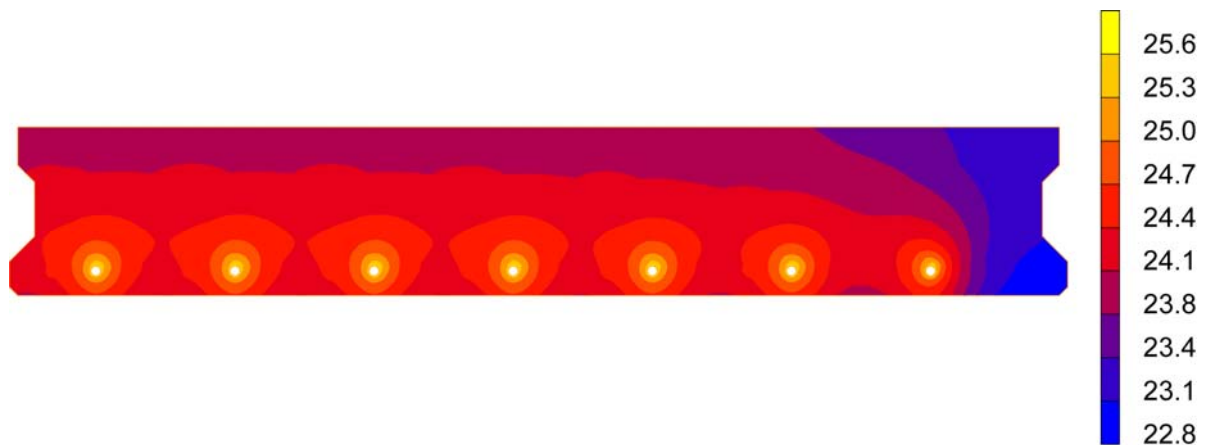


Bild 18: Simulationsergebnis Heizfall

Für den oben dargestellten Fall wird damit eine Heizleistung von $26,86 \text{ W/m}^2$ übertragen, bezieht man den Wert auf die Temperaturdifferenz Raum - mittlere Wassertemperatur lassen sich folgende Betriebskennlinien ermitteln (vgl. Messergebnis Kap. 4.2):

$$q_h = 4,82 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot \Delta T \text{ [in K]} \text{ (Variante a)}$$

$$q_h = 4,48 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot \Delta T \text{ [in K]} \text{ (Variante b)}$$

$$\text{mit } \Delta T = T_{w,m} - T_{op}$$

$T_{w,m}$ Mittelwert der Wassertemperatur

T_{op} operative Raumtemperatur

5.3 Einschaltvorgang Kühlfall

Um das instationäre Verhalten zu untersuchen, wird ein Einschaltvorgang betrachtet. Ausgangspunkt ist, dass die Decke und das Wasser in den Rohrleitungen die gleiche Temperatur von $26 \text{ }^\circ\text{C}$ besitzen wie der angrenzende Raum. Dann erfolgt ein Einschalten in der Simulation in der Form, dass die Wassertemperatur zu einem Zeitpunkt $t = 0$ auf $20 \text{ }^\circ\text{C}$ springt. In der Realität addieren sich zur Zeitkonstanten des Deckenelementes selbst die Trägheiten, die sich aus dem Aufheizen des Wassers und der Strömungsgeschwindigkeit durch das Element ergeben. Diese Effekte sind aber unabhängig vom Deckensystem und werden hier nicht weiter berücksichtigt.

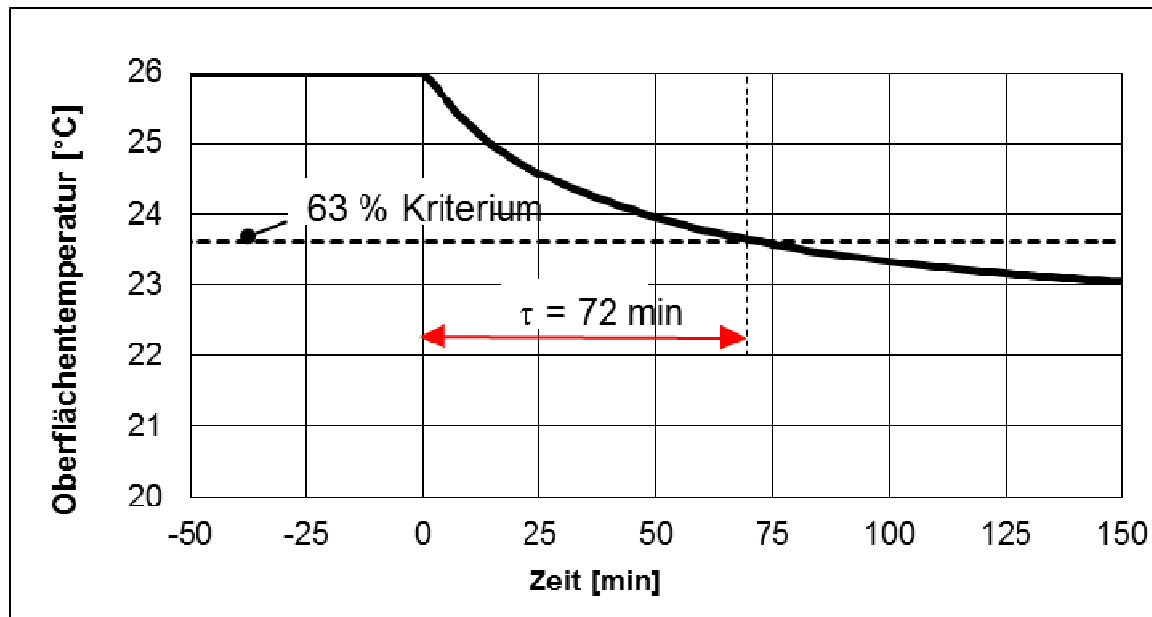


Bild 19: Zeitverlauf Oberflächentemperatur bei Einschaltvorgang Kühlen

Charakteristische Größe zur Beschreibung eines Einschaltvorgangs ist die Zeitkonstante τ . Sie gibt an in welcher Zeit eine Funktion den 1/e-Teil des Endwertes (= 63 %) erreicht hat. Für den betrachteten Fall beträgt die Zeitkonstante 72 min, nach der 63 % der Kühlleistung zur Verfügung stehen (Bild 19). Das Ergebnis entspricht dem Wert aus der Messung (Kap. 3.1).

5.4 Einschaltvorgang Heizfall

Auch hier wurde eine sprungförmige Änderung der Wassertemperatur betrachtet (Bild 20). Die numerisch ermittelte Zeitkonstante beträgt 85 Minuten. Dieser Wert weicht etwas von den Messergebnissen ab (103 Minuten), Ungenauigkeiten bei der Messwerterfassung, bei der Regelung, aber auch Toleranzen in der Fertigung können Ursache dafür sein, in der Tendenz wird aber das Messergebnis bestätigt.

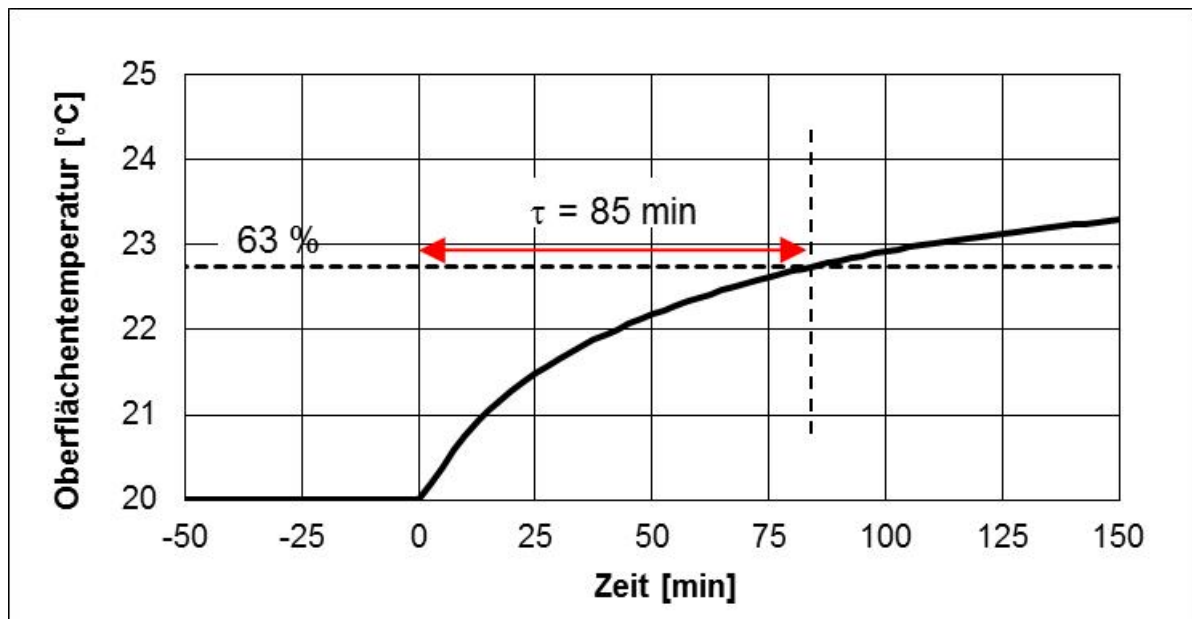


Bild 20: Zeitverlauf Oberflächentemperatur bei Einschaltvorgang Heizen

5.5 Erläuterungen Einschaltvorgang

Die flächenbezogene Leistung (W/m^2) wird durch Wärmeleitwerte bzw. Wärmewiderstände bestimmt. Setzt man Material mit hoher Leitfähigkeit ein (z.B. Metalle) und realisiert man geringe Abstände von der wasserführenden Leitung untereinander und bis zur wärmeübertragenden Oberfläche, können höhere Leistungen erzielt werden. Die Masse hat auf die stationäre Leistung keinen Einfluss.

Die Zeitkonstante, die den Einschaltvorgang beschreibt, ergibt sich aus dem Verhältnis von Masse zu thermischem Widerstand, hinzu kommt der geometrische Einfluss, d.h. der Aspekt wo sich die Masse befindet.

Daraus folgt, dass es keinen einfachen Zusammenhang zwischen Leistung und Zeitkonstante gibt. Eine höhere Leistung im stationären Fall kann je nach Aufbau des Deckensystems zu höheren oder geringeren Zeitkonstanten führen.

6 Zusammenfassung

Die thermische Leistungsfähigkeit der Vollmontagedeckenplatte Dennert DX Therm wurde für den Heiz- und Kühlfall messtechnisch und rechnerisch (FEM) ermittelt. Die messtechnisch und rechnerisch ermittelten Kenngrößen liegen recht gut beieinander, so dass keine weiteren Interpretationen oder Kalibrierungen erforderlich sind.

Tabelle 1: Spezifische Heiz- und Kühlleistungen (alle Angaben in W/m²K)

	Deckenprüfstand	FEM	
		Var. a - therm. Widerstand Boden 0,8 m ² K/W	Var. b - therm. Widerstand Boden 3,0 m ² K/W
Heizfall	4,64	4,82	4,48
Kühlfall	6,24	6,49	6,23

Die Korrelation der gewonnenen Ergebnisse ist gut, die Vergleichsmessungen mit den Wärmestrommessplatten konnte diese Werte bestätigen. Es wird vorgeschlagen, die Messwerte des Deckenprüfstandes als Auslegungswert anzugeben.

Beim Heizfall dominiert der Wärmeaustausch durch Strahlung, wird die Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Raum erhöht, z.B. durch eine Lüftungsanlage, ergeben sich höhere spezifische Heizleistungen.

Zeitkonstante

Die Zeitkonstanten können aus instationären FEM-Untersuchungen sowie aus Schaltvorgängen im Prüfstand ermittelt werden.

Für den Kühlfall ergibt sich:

$$\tau_k = 72 \text{ min (FEM-Simulation)} \quad 83 \text{ min (Messung)}$$

Für den Heizfall ergibt sich:

$$\tau_h = 85 \text{ min (FEM-Simulation)} \quad 103 \text{ min (Messung)}$$

Durch Messungengenauigkeit, aber auch durch die Schwankungen in der Temperaturregelung sowie Fertigungstoleranzen sind gewisse Abweichungen nicht zu vermeiden.