# Studie über den Einfluss baulicher Maßnahmen an Deckenstrahlplatten auf den durch Wärmestrahlung übertragenen Wärmestrom („Strahlungsanteil“)

**Verfasser:**
**Forschungsgesellschaft**
**Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart mbH**

**Dipl.-Ing. Bing Gu**
**Dr.-Ing. Christoph Beck**
**Dipl.-Ing. Jörg Schmid**

**Forschungsvorhaben 2020-01**
**gefördert vom**
**Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V.**

Verein der Förderer
der Forschung im Bereich
Heizung • Lüftung • Klimatechnik
Stuttgart e.V.

HLK
STUTTGART

**Dezember 2020**

**Kurzfassung**

Deckenstrahlplatten eignen sich bekanntermaßen besonders gut zur Beheizung hoher Räume. Dabei wirkt nahezu ausschließlich die Wärmestrahlung in die Anforderungszone („Aufenthaltsbereich“). Die konvektive Wärmeabgabe kommt der Anforderungszone dagegen so gut wie nicht zugute und sollte bzw. muss deshalb gezielt minimiert werden.

Bauliche Maßnahmen an typischen Deckenstrahlplatten wie z. B. Anbau von seitlichen Schürzen oder Veränderung der auf den Platten liegenden Wärmedämmung haben bekanntermaßen einen Einfluss auf den Anteil der durch Wärmestrahlung übertragenen Wärme an der Gesamtleistung des Systems („Strahlungsanteil“). Die bisherigen Herangehensweisen an diese Fragestellung waren und sind teils aufwendige Messreihen im Labor.

Neben herkömmlichen Deckenstrahlplatten gibt es am Markt bereits Sonderkonstruktionen mit entsprechenden baulichen Maßnahmen, die die konvektive Wärmeabgabe reduzieren und damit den Strahlungsanteil erhöhen. In dieser Studie geht es jedoch darum, bislang noch nicht betrachtete bzw. möglicherweise noch gar nicht erdachte bauliche Maßnahmen im Hinblick auf den Anteil der Wärmestrahlung zu untersuchen. – Der Weg dahin führt über die Entwicklung von Simulationsmodellen für verschiedene Arten von Deckenstrahlplatten, um genau diesen Fragen nachgehen zu können.

In dieser Studie werden insgesamt drei Bauarten der Deckenstrahlplatten mittels Näherungsverfahren (Computational Fluid Dynamics) untersucht; und die numerisch ermittelten Ergebnisse werden mit Labormessungen verglichen. Es wird gezeigt, dass die gebildet Simulationsmodelle gute Abbildungsqualität besitzen und für weitere Untersuchungen bei baulichen Maßnahmen der Deckenstrahlplatten geeignet sind.

# Inhaltsverzeichnis


1 Einleitung ... 1

2 Grundlagen zur Ermittlung der Wärmeleistung von Deckenstrahlplatten ... 4

2.1 Experimentelles Verfahren und Auswertungen ... 4

2.2 Numerisches Verfahren ... 6

2.3 Verfahren zur Abschätzung der Abbildungsqualität der Simulationsmodelle ... 7

3 Aufbau und Randbedingungen der numerischen Ermittlungen ... 9

3.1 Modellierungen der untersuchten Deckenstrahlplatten und Prüfräume ... 9

3.1.1 Deckenstrahlplatten vom Typ 1200 / 16 ohne Schürzen ... 9

3.1.2 Deckenstrahlplatten vom Typ 1200 / 16 mit Schürzenhöhe 53 mm ... 12

3.1.3 Deckenstrahlplatte vom Typ ZIP 840-12 ... 15

3.2 Relevanten Randbedingungen der numerischen Ermittlungen ... 17

3.3 Ausführungen der numerischen Untersuchungen ... 18

4 Vergleich der Ergebnisse aus Messung und Simulation ... 19

4.1 Deckenstrahlplatten vom Typ 1200 / 16 ohne Schürzen ... 19

4.2 Deckenstrahlplatten mit Typ 1200 / 16 mit Schürzenhöhe 53 mm ... 21

4.3 Deckenstrahlplatten mit Typ ZIP 840-12 ... 23

4.4 Fazit ... 25

5 Einfluss der Schürzenhöhe auf den Strahlungsanteil der Deckenstrahlplatten des Typen 1200/16 ... 27

5.1 Numerische Modellierung der Deckenstrahlplatten ... 27

5.2 Vergleich der Ergebnisse der Deckenstrahlplatten mit verschiedenen Schürzenhöhen ... 29

5.3 Fazit ... 32

6 Zusammenfassung ... 33

7 Literaturverzeichnis ... 35

8 Anhang ..... 36
8.1 Bezeichnung der Deckenstrahlplatten ..... 36
8.2 Vergleich der Ergebnisse aus Messung und Simulation ..... 37
8.2.1 Deckenstrahlplatte vom Typ 1200 / 16 ohne Schürzen ..... 37
8.2.2 Deckenstrahlplatte vom Typ 1200 / 16 mit Schürzenhöhe 53 mm ..... 40
8.2.3 Deckenstrahlplatte vom Typ ZIP 840-12 ..... 43
8.3 Vergleich der Ergebnisse bei verschiedenen Schürzenhöhen ..... 46
8.3.1 Deckenstrahlplatten vom Typ 1200 / 16 mit der Schürzenhöhe 25 mm ..... 46
8.3.2 Deckenstrahlplatten vom Typ 1200 / 16 mit der Schürzenhöhe 100 mm ..... 49

# 1 Einleitung

Deckenstrahlplatten eignen sich bekanntermaßen besonders gut zur Beheizung hoher Räume. Dabei wirkt nahezu ausschließlich die Wärmestrahlung in die Anforderungszone (Aufenthaltsbereich). Die konvektive Wärmeabgabe kommt der Anforderungszone dagegen so gut wie nicht zugute und sollte bzw. muss deshalb gezielt minimiert werden; dies ganz im Gegensatz zu früheren Verkaufsstrategien, bei denen es hauptsächlich darum ging, möglichst viel Wärmeleistung zu einem möglichst günstigen Preis anzubieten völlig unabhängig von der Frage nach dem Strahlungsanteil.

Die Strahlungsanteile herkömmlicher Deckenstrahlplatten liegen zwischen etwa 50 % und 80 % wobei hier allein schon die Breite der Strahlplatten einen großen Einfluss hat. Die schmalsten Ausführungen am Markt haben eine Baubreite von 0,3 m und einen Strahlungsanteil von etwa 50 %, während die typischerweise größten Baubreiten am Markt mit 1,5 m bereits einen Strahlungsanteil von 80 % erzielen. Je breiter Deckenstrahlplatten sind, desto stärker wird die konvektive Wärmeabgabe unterdrückt.

Dabei kann der Strahlungsanteil auf Seiten der durch Wärmestrahlung abgegebenen Wärme praktisch nicht beeinflusst werden; vielmehr geht es darum, zum Beispiel durch Dämmung auf der Oberseite der Strahlplatte, durch seitliche Schürzen, durch in Querrichtung gebogene Konturen etc. die konvektive Wärmeabgabe zu reduzieren.

Neben herkömmlichen Deckenstrahlplatten gibt es am Markt bereits Sonderkonstruktionen mit entsprechenden baulichen Maßnahmen, die die konvektive Wärmeabgabe reduzieren und damit den Strahlungsanteil erhöhen. In dieser Studie geht es unter anderem jedoch darum, bislang noch nicht betrachtete bauliche Maßnahmen im Hinblick auf den Anteil der Wärmestrahlung zu untersuchen.

Abschätzung bzw. Beurteilung der durch bauliche Maßnahmen verbesserten oder optimierten Deckenstrahlplatten benötigt teils aufwendige Messreihen im Labor. Eine Alternative ist ein Einsatz der numerischen Näherungsverfahren (CFD). Diese nume-

rische Methode ist ein immer wichtigeres Werkzeug für Untersuchungen der Raumluftströmung und der Behaglichkeit sowie der Raumluftqualität.

Der Weg dahin führt über die Entwicklung von Simulationsmodellen für verschiedene Arten von Deckenstrahlplatten, um genau diesen Fragen nachgehen zu können.

Näherungsverfahren innerhalb der verwendeten numerischen Modelle (besonders Turbulenzmodelle in der Heiz- und Raumlufttechnik) sind zur Begrenzung des Rechenaufwands erforderlich, müssen aber wiederum anhand experimenteller Methoden überprüft werden.

Die Studie gliedert sich im Wesentlichen in zwei Phasen:

In der ersten Phase werden insgesamt drei Bauarten von Deckenstrahlplatten numerisch untersucht und die Ergebnisse werden mit Messungen im Labor verglichen. Die betrachteten Deckenstrahlplatten sind vom Typ 1200/16[1] ohne Schürzen und der gleiche Typ mit einer 53 mm hohen Schürze. Die dritte Bauart ist eine abgewinkelte Deckenstrahlplatte (ZIP 840-12[2], siehe erste drei Typen in Tab. 1-1).

In der zweiten Phase werden die oben genannten Deckenstrahlplatten mittels Simulationsmethoden (CFD) untersucht. Dabei wird insbesondere der Einfluss der Schürzenhöhe auf den Strahlungsanteil untersucht, siehe letzte zwei Typen in Tab. 1-1, weil man die Plausibilität der Ergebnisse leicht überprüfen kann. Der Variation der Schürzenhöhen liegt der Ausgangswert von 53 mm des Typs 1200/16 zugrunde.

[1] Baubreite 1.200 mm, 16 parallele Rohre
[2] Baubreite 840 mm, 12 parallele Rohre

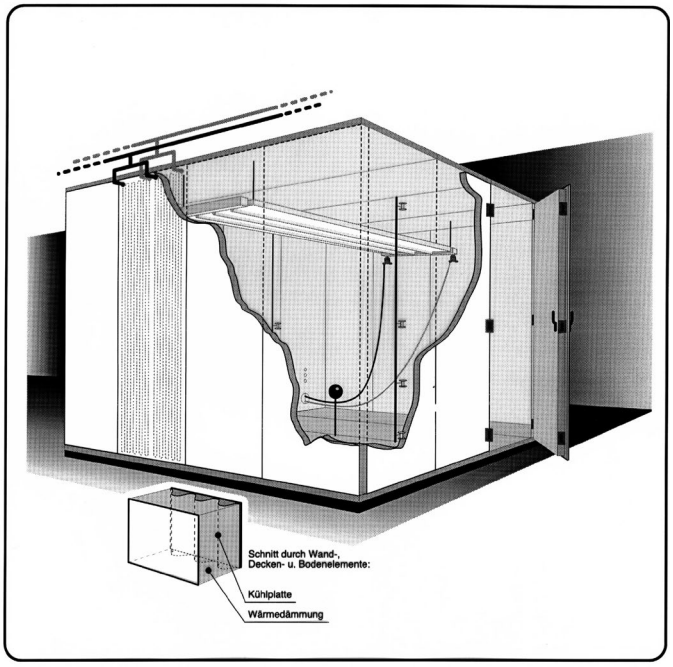
*Tab. 1-1: Untersuchte Deckenstrahlplatten (DSP)*

| Typ der DSP | Anordnung der DSP | Versuchsart |
|---|---|---|
| Typ 1200/16, RA 75mm ohne Schürzen | horizontal | Labormessung & Simulation |
| Typ 1200/16, RA 75mm (Schürzenhöhe 53 mm) | horizontal | Labormessung & Simulation |
| Typ ZIP 840-12 | abgewinkelt (45°) | Labormessung & Simulation |
| Typ 1200/16, RA 75mm (Schürzenhöhe 25 mm) | horizontal | Simulation |
| Typ 1200/16, RA 75mm (Schürzenhöhe 23 mm) | horizontal | Simulation |

Mit RA: Rohrabstand (Teilung).

# 2 Grundlagen zur Ermittlung der Wärmeleistung von Deckenstrahlplatten

## 2.1 Experimentelles Verfahren und Auswertungen




Deckenstrahlplatten werden in geschlossenen Prüfräumen nach DIN EN 14037-2 [ 1 ] geprüft (Bild 2-1). Parallel zur Bestimmung der Wärmeabgabe bei verschiedenen Temperaturdifferenzen zwischen Heizwasser und Raum wird die Wärmeabgabe durch Strahlung gemessen bzw. ermittelt.

Grundlage der Bestimmung der Wärmeabgabe durch Strahlung ist die thermographische Ermittlung der mittleren Oberflächentemperatur der nach unten in den Raum strahlenden projizierten Fläche. Bild 2-2 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer solchen Untersuchung.

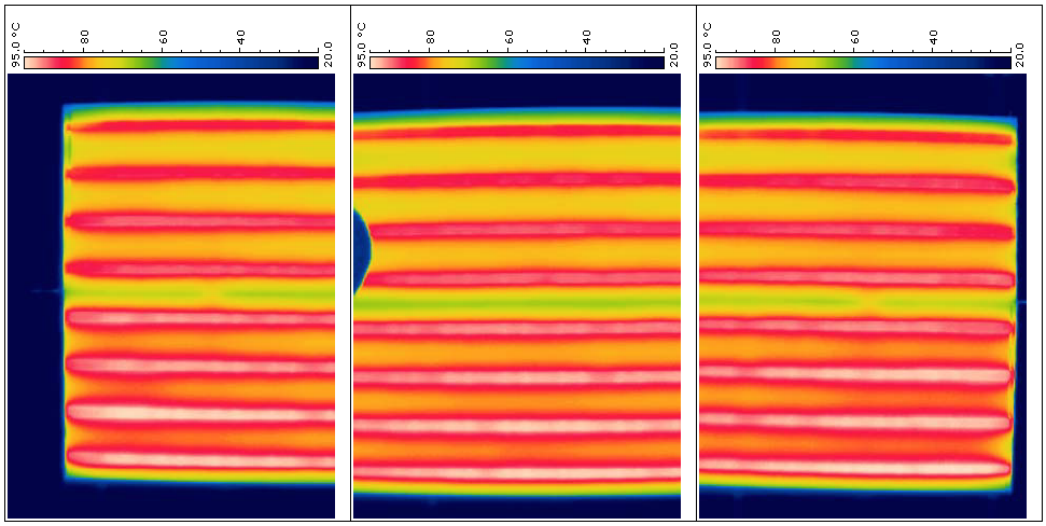



*Bild 2-2: Beispiel für die thermographische Bestimmung der mittleren Oberflächentemperatur der Strahlfläche*

Nach DIN EN 14037-3 [ 2 ] wird die Strahlungsleistung dann mit Hilfe des folgenden Berechnungsansatzes bestimmt:

$$\Phi_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon_{rp} \cdot (T_{rp}^4 - T_w^4) \cdot A_{rp}$$

mit

| | | |
|---|---|---|
| $\Phi_{rad}$ | Strahlungswärmeleistung | $[W]$ |
| $\sigma$ | Stefan-Boltzmann-Konstante | $[W/(m^2K^4)]$ |
| $\varepsilon_{rp}$ | Emissionsgrad der Unterseite der Deckenstrahlplatte | $[-]$ |
| $T_{rp}$ | Mittlere Oberflächentemperatur der Deckenstrahlplatte | $[°C]$ |
| $T_w$ | Oberflächentemperatur der Innenflächen (Wände und Boden) der Prüfkabine | $[°C]$ |
| $A_{rp}$ | Wirksame Strahlplattenfläche | $[m^2]$ |

Der prozentuale Strahlungsanteil ist dann der Quotient aus der wie beschrieben ermittelten Strahlungsleistung und der gemessenen Gesamtleistung der Deckenstrahlplatten:

$$r = \frac{\Phi_{rad}}{\Phi_{act}} \cdot 100$$

mit

| | | |
|---|---|---|
| $r$ | Strahlungsanteil der Deckenstrahlplatte | $[-]$ |
| $\Phi_{act}$ | Wärmeleistung der aktiven Länge | $[W]$ |

Dieser kann und wird für verschiedene Temperaturdifferenzen zwischen Heizwasser und Raum ermittelt.

## 2.2 Numerisches Verfahren

Die in dieser Arbeit verwendete numerische Methode (Computational Fluid Dynamics) ist ein Näherungsverfahren, das zum approximativen Lösen strömungsmechanischer Probleme dient. Diese Methode umfasst Strömungsmechanik, numerische Mathematik und Computertechnik.

In der Heiz- und Raumlufttechnik werden sehr oft Turbulenzmodelle in Forschung und Praxis im Hinblick auf Behaglichkeit im Raum und Raumluftqualität eingesetzt. Ihr Vorteil liegt in der Möglichkeit der schnellen Überprüfung von Konzepten, der Untersuchung des Einflusses der zu betrachtenden Parameter; im vergleichsweise geringen Aufwand an Zeit und Kosten sowie der anschaulichen Visualisierungen der Ergebnisse. Ihre Nachteile sind, dass die verwendeten numerischen Modelle – besonders Turbulenzmodelle – auf empirischen Ansätzen basieren. Dies Führt zu unvermeidbaren Abweichungen der simulierten physikalischen Phänomene von der Realität. Es ist somit bei ihrer Verwendung erforderlich, dass die ausgewählten Mo-

delle hinsichtlich Einsatzbereich, Modellierung und physikalischer Eigenschaften verifiziert und validiert werden.

Die numerischen Untersuchungen werden in drei Phasen aufgeteilt. Preprocessing gilt für die Generierung der betrachteten Geometrien und deren Netzbildungen sowie die Festlegung der entsprechenden Randbedingungen. Bei numerischem Lösen wird das ausgewählt Modell aus der ersten Phase mittels der Grundgleichungen der Erhaltungsgesetze für Masse, Impuls und Energie sowie zusätzlicher Gleichungen z. B. für kinetische Energie $k$ und Dissipation $\varepsilon$ turbulenter Strömungen unter den definierten Randbedingungen berechnet. In der letzten Phase – Postprocessing – werden die Ergebnisse ausgewertet, bewertet und visualisiert [ 3 ].

Die numerisch ermittelten Ergebnisse werden in diese Arbeit ebenfalls in Anlehnung an DIN EN 14037-3 [ 2 ] nach dem im Abschnitt 2.1 beschriebenen Verfahren ausgewertet.

## 2.3 Verfahren zur Abschätzung der Abbildungsqualität der Simulationsmodelle

Zur Abschätzung der Abbildungsqualität der Simulationsmodelle wird ein Prozentsatz eingeführt, nämlich „Differenz“. Der Unterschied der gesamten Wärmeleistung sowie der Strahlungswärmeleistung zwischen Labormessungen und Simulation werden durch diesen Prozentsatz beurteilt und nach der folgenden Gleichung definiert:

$$Abw = \frac{\dot{Q}_{Mess.} - \dot{Q}_{Sim}}{\dot{Q}_{Mess.}} \cdot 100\%$$

| | | |
|---|---|---|
| $Abw$ | relative Abweichung der Wärmeleistungen | $[-]$ |
| $\dot{Q}_{Mess.}$ | gemessene Wärmeleistung | $[W]$ |
| $\dot{Q}_{Sim}$ | numerisch ermittelte Wärmeleistung | $[W]$ |

# 3 Aufbau und Randbedingungen der numerischen Ermittlungen

## *3.1 Modellierungen der untersuchten Deckenstrahlplatten und Prüfräume*

Die Prüfstelle HLK Stuttgart ist ein unter anderem für Prüfungen von Deckenstrahlplatten nach DIN EN 14037-2 [ 1 ] anerkanntes Prüflabor und verfügt hier über Ergebnisse zahlreicher experimenteller Untersuchungen. Nicht zuletzt deshalb orientieren sich die Simulationsmodelle an der Prüfsituation von Deckenstrahlplatten im geschlossenen Prüfraum. Neben der Deckenstrahlplatte ist darin nur das Globe-Thermometer zur Bestimmung der Referenz-Raumtemperatur zu berücksichtigen.

Die Simulationsmodelle in dieser Arbeit werden im Maßstab 1:1 nach dem Aufbau im Labor nachgebildet. In folgenden Abschnitten werden die ermittelten Deckenstrahlplatten je nach ihren Bauarten separat beschrieben.

### 3.1.1 Deckenstrahlplatten vom Typ 1200 / 16 ohne Schürzen

Bild 3-1 und Bild 3-2 zeigen den Aufbau und die relevanten Abmessungen der numerischen untersuchten Deckenstrahlplatte ohne Schürzen. Diese Deckenstrahlplatte ist aus Stahl und besitzt eine aktive Länge von 3 m und Breite von 1,2 m. Der Durchmesser des Stahlrohrs ist ∅ 15 mm mit 1,25 mm Wandstärke. Der Abstand zwischen Rohren ist 75 mm. Die durchgehenden Wasserkanäle werden innen durch Trennflächen komplett getrennt, jedes Kanalelement verbindet zwei Rohre. Bild 3-3 zeigt die Anordnung der Dämmungen an der ermittelten Deckenstrahlplatte. Die oberen Dämmungen sind aus alu-kaschierten Mineralfasern. Die Dämmungen an den beiden Enden sind aus Polystyrol.

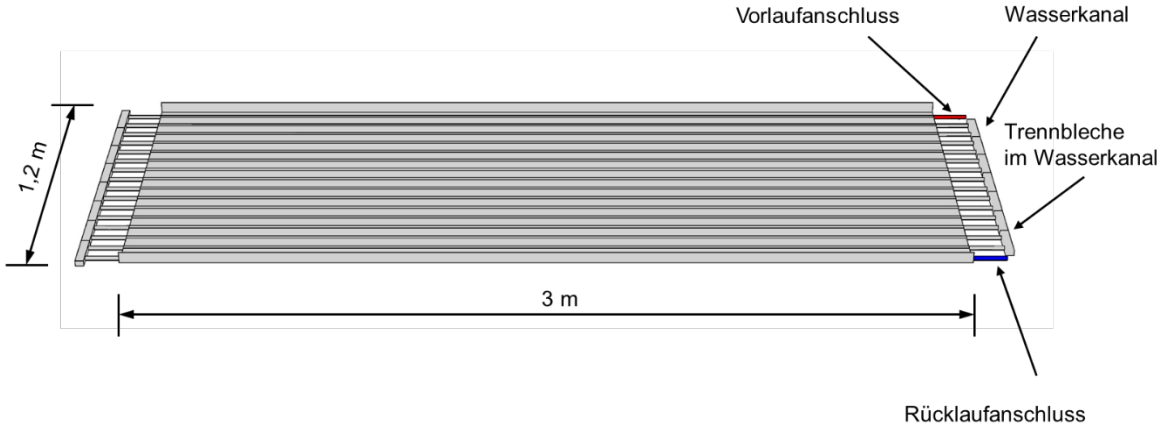



*Bild 3-1: Abmessungen I der numerischen untersuchten DSP (Typ 1200 / 16) ohne Schürzen*

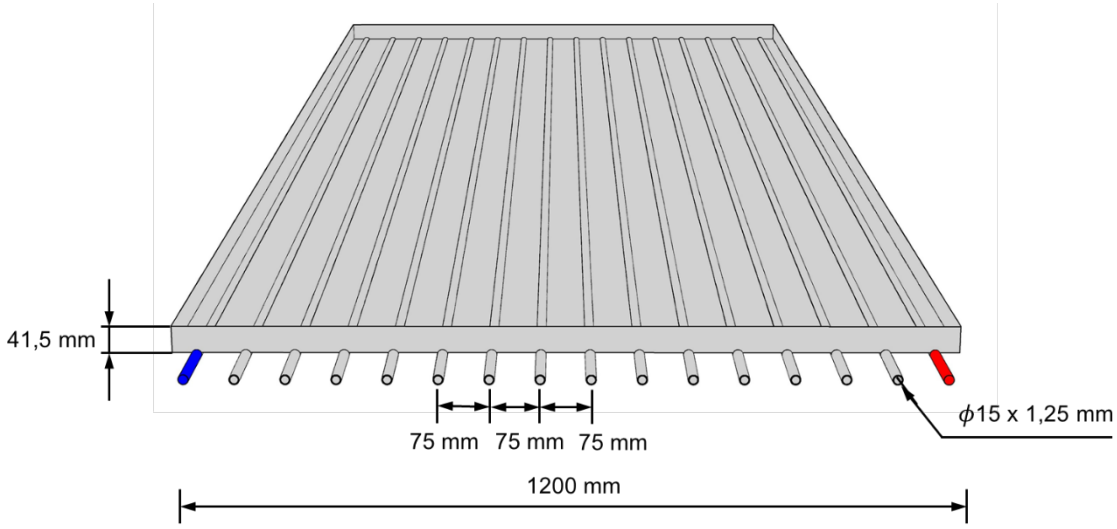



*Bild 3-2: Abmessungen II der numerischen untersuchten DSP (Typ 1200 / 16) ohne Schürzen*

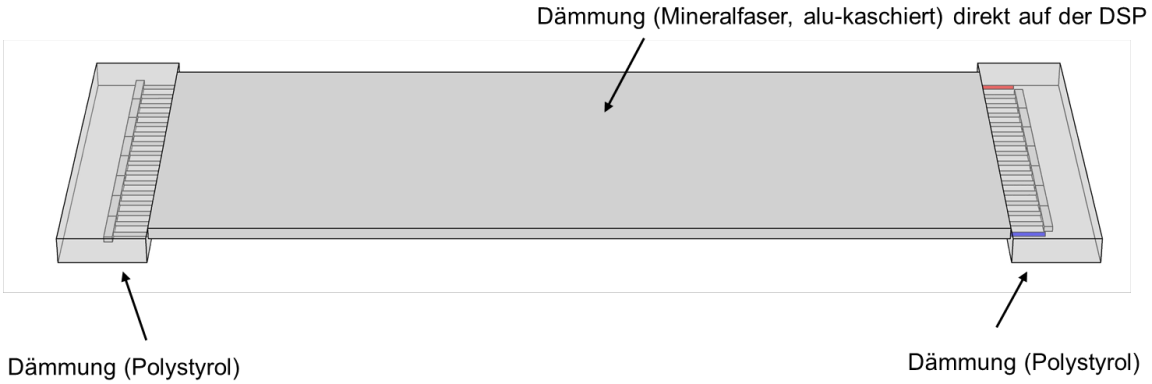



*Bild 3-3: Aufbau der Dämmungen bei der numerischen untersuchten DSP (Typ 1200 / 16) ohne Schützen*

Die Anordnung der untersuchten Deckenstrahlplatten in Prüfraum ist in Bild 3-4 dargestellt. Die Deckenstrahlplatte sowie das Globe-Thermometer werden nach DIN EN 14037-2 [ 1 ] im Raum angeordnet. Die Abmessungen des Raums sind 4 m x 4 m x 3 m (L x T x H). Die Deckenstrahlplatten werden in der Mitte des Raums mit einem Abstand von 2,5 m zwischen der unteren Fläche des Blechs und dem Boden angeordnet. Das Globe-Thermometer (Ø 150 mm) aus Kupfer wird mit einem Abstand von 0,75 m zum Boden in der Raummitte aufgestellt.

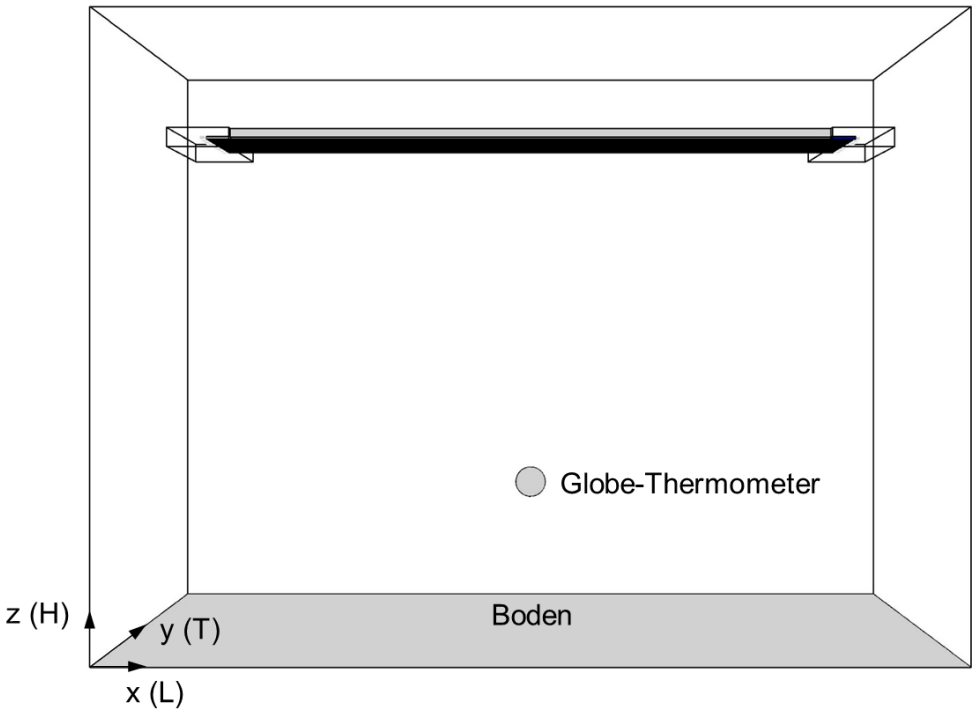



*Bild 3-4: Anordnung der numerischen untersuchten DSP (Typ 1200 / 16) ohne Schürzen im Prüfraum*

### 3.1.2 Deckenstrahlplatten vom Typ 1200 / 16 mit Schürzenhöhe 53 mm

Abgesehen von den Schürzen hat diese Deckenstrahlplatte die gleiche Konstruktion und Abmessungen wie die Deckenstrahlplatten im Abschnitt 3.1.1. Statt 1,2 m beträgt die aktive Breite 1,44 m, siehe Bild 3-5 und Bild 3-6. Das Modell der ermittelten Deckenstrahlplatte und der Aufbau der Dämmung sind in Bild 3-7 dargestellt. Die untersuchte Deckenstrahlplatte wird nach DIN EN 14037-2 [ 1 ] in demselben wie im Abschnitt 3.1.1dargestellten Prüfraum angeordnet, siehe Bild 3-8. Die Deckenstrahlplatten werden in der Mitte des Raums mit einem Abstand von 2,5 m zwischen der unteren Fläche des Blechs und dem Boden angeordnet. Das Globe-Thermometer (Ø 150 mm) aus Kupfer wird mit einem Abstand von 0,75 m zum Boden in die Raummitte gestellt.

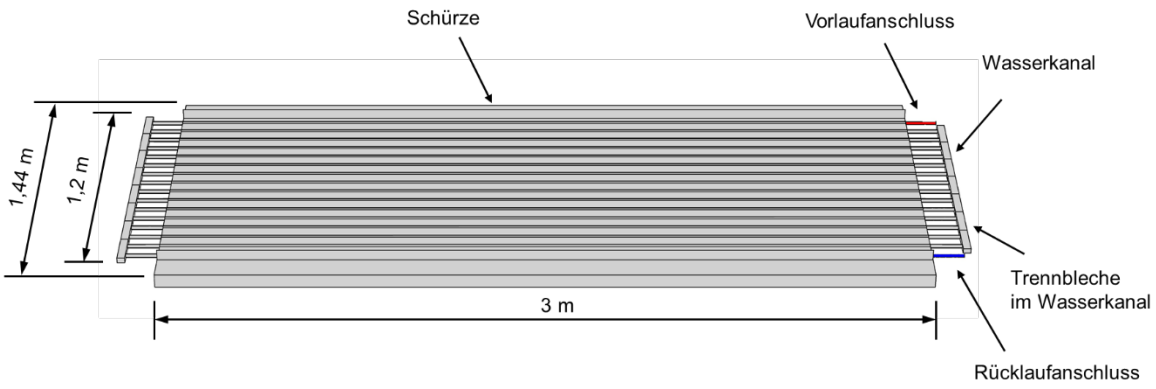



*Bild 3-5: Abmessungen I der numerisch untersuchten DSP (Typ 1200/16) mit Schürzen*

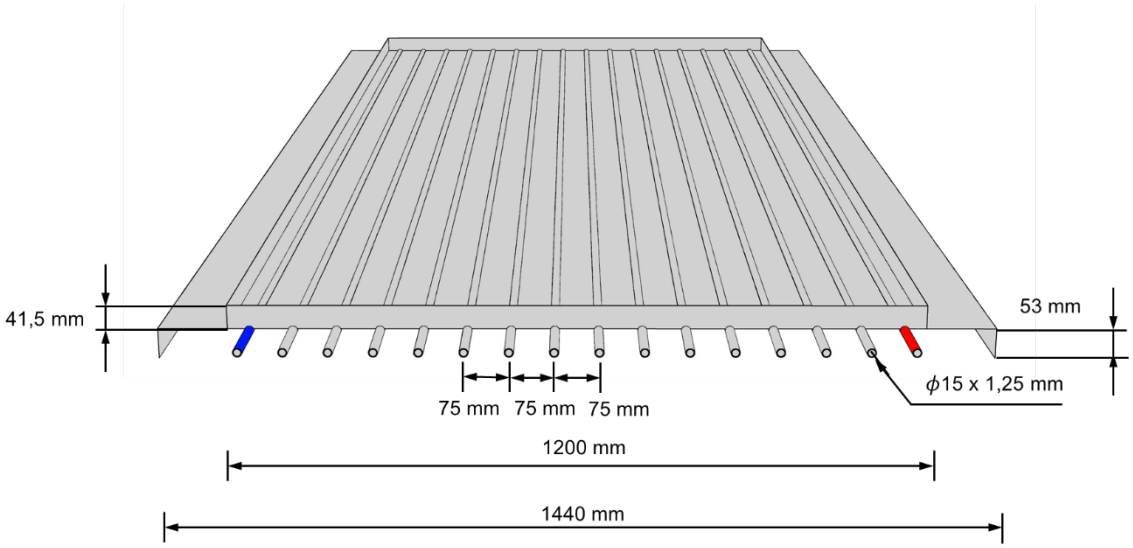



*Bild 3-6: Abmessungen II der numerisch untersuchten DSP (Typ 1200 / 16) mit Schürzenhöhe 53 mm*

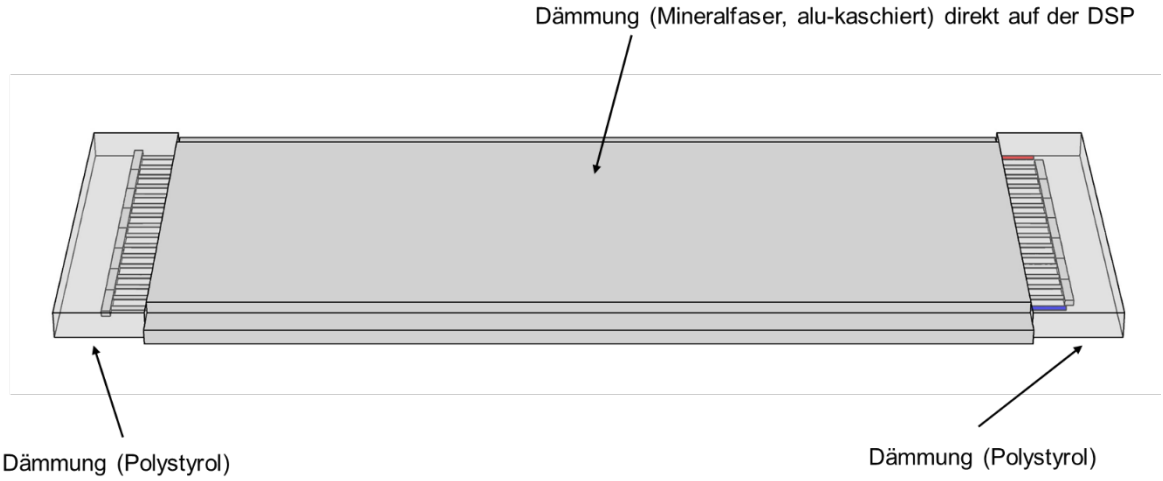



*Bild 3-7: Aufbau der Dämmungen der numerisch untersuchten DSP (Typ 1200 / 16) mit Schürzen*

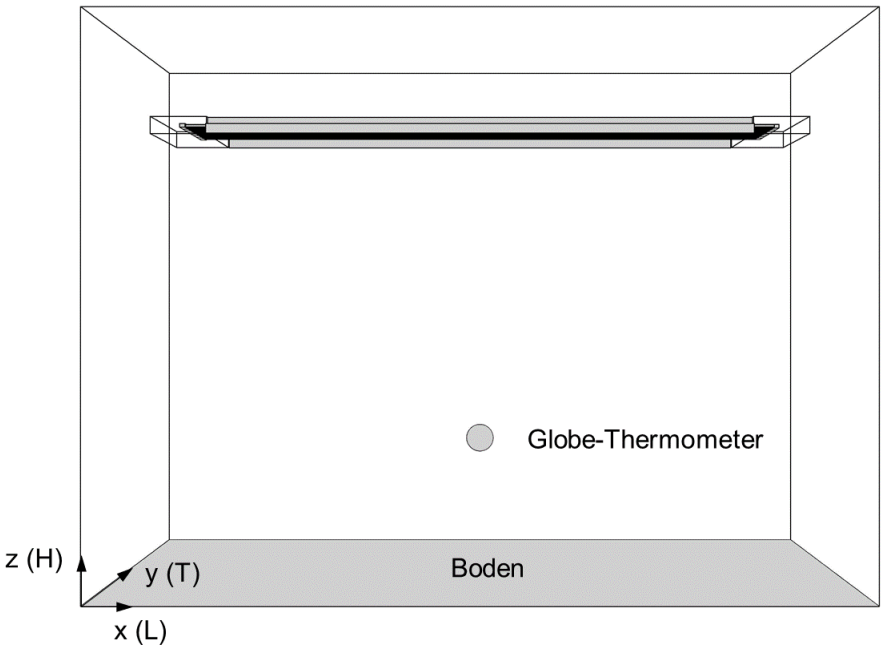



*Bild 3-8: Anordnung der numerischen untersuchten DSP (Typ 1200 / 16) mit Schürzen im Prüfraum*

### 3.1.3 Deckenstrahlplatte vom Typ ZIP 840-12

Die Deckenstrahlplatten vom Typ ZIP 840-12 bestehen aus drei Einzelmodulen mit jeweils 3 m aktiver Länge und 320 mm Baubreite. Das mittlere Modul wird horizontal angeordnet; die Module links und rechts davon werden mit 45 ° nach unten zum Boden hingeneigt angeordnet, siehe Bild 3-9 und Bild 3-10. Diese Deckenstrahlplatte ist ebenfalls aus Stahl. Der Durchmesser des Strahlrohrs ist ∅ 15 mm mit 1,25 mm Wandstärke. Der Abstand zwischen den Rohren (Teilung) beträgt mm. Die projizierte Breite dieser Deckenstrahlplatte beträgt nun 840 mm.

Bild 3-11 zeigt den Aufbau der Dämmung an der untersuchten Deckenstrahlplatte. Die obere Dämmung ist aus alu-kaschierten Mineralfasern. Die Dämmungen an den beiden Enden sind aus Polystyrol.

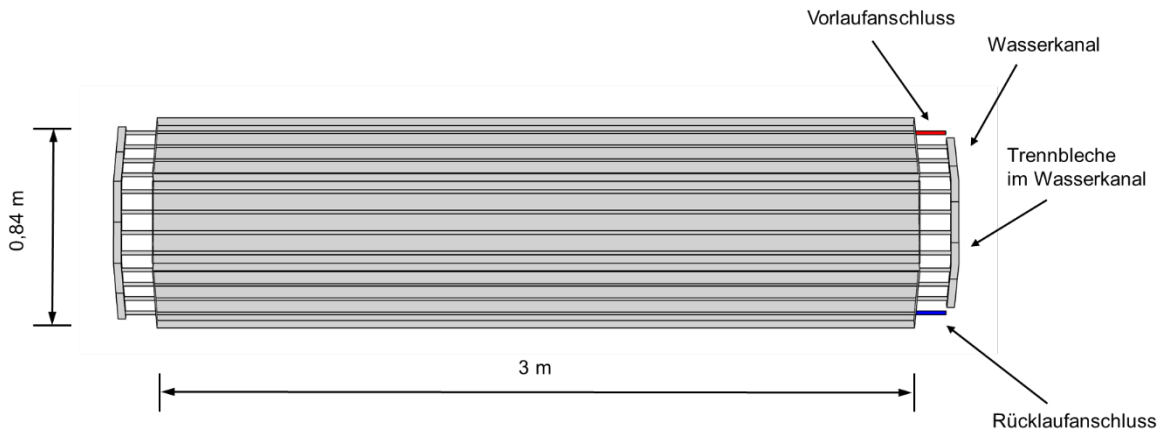



*Bild 3-9: Modell der numerisch untersuchten DSP (Type ZIP 84-12)*

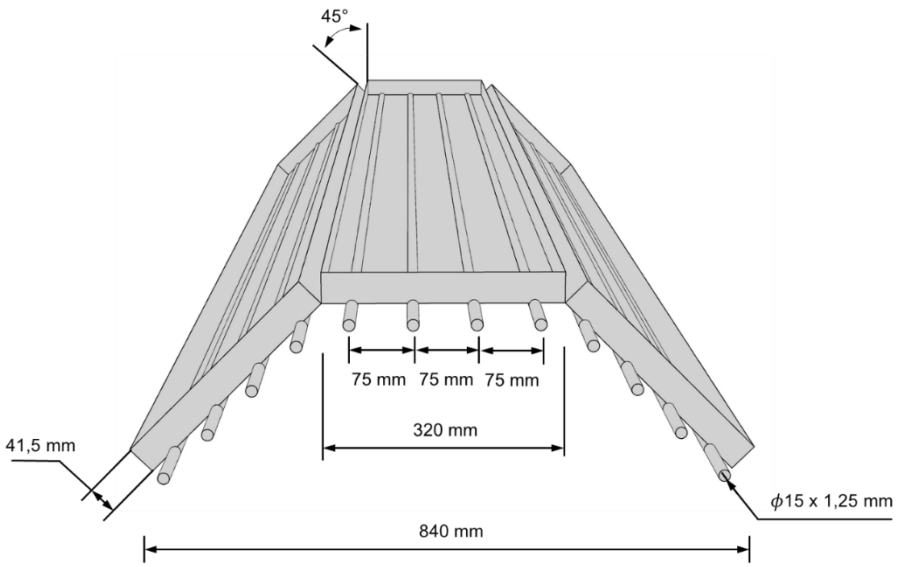



*Bild 3-10: Weitere Darstellung des Modells der numerisch untersuchten DSP (Typ ZIP 84-12)*

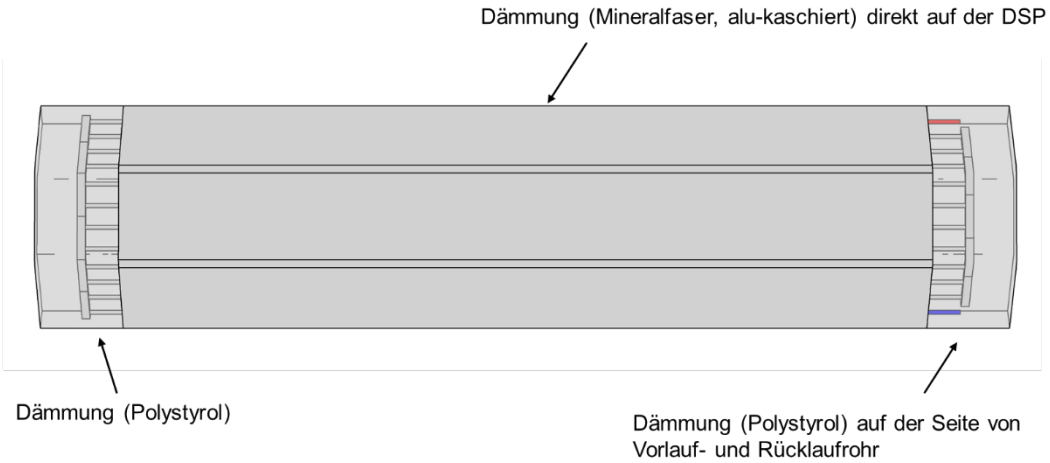



*Bild 3-11: Aufbau der Dämmungen bei der numerischen ermittelten DSP (Typ ZIP 840-12)*

Die Deckenstrahlplatte wird ebenfalls nach DIN EN 14037-2 [ 1 ] in demselben wie im Abschnitt 3.1.1dargestellten Prüfraum angeordnet, siehe Bild 3-12. Sie wird in der Mitte des Raums mit einem Abstand von 2,5 m zwischen der unteren Fläche des Blechs des mittleren Moduls und dem Boden eingerichtet. Das Globe-Thermometer (∅ 150 mm) aus Kupfer wird im Abstand von 0,75 m zum Boden in der Raummitte angeordnet.

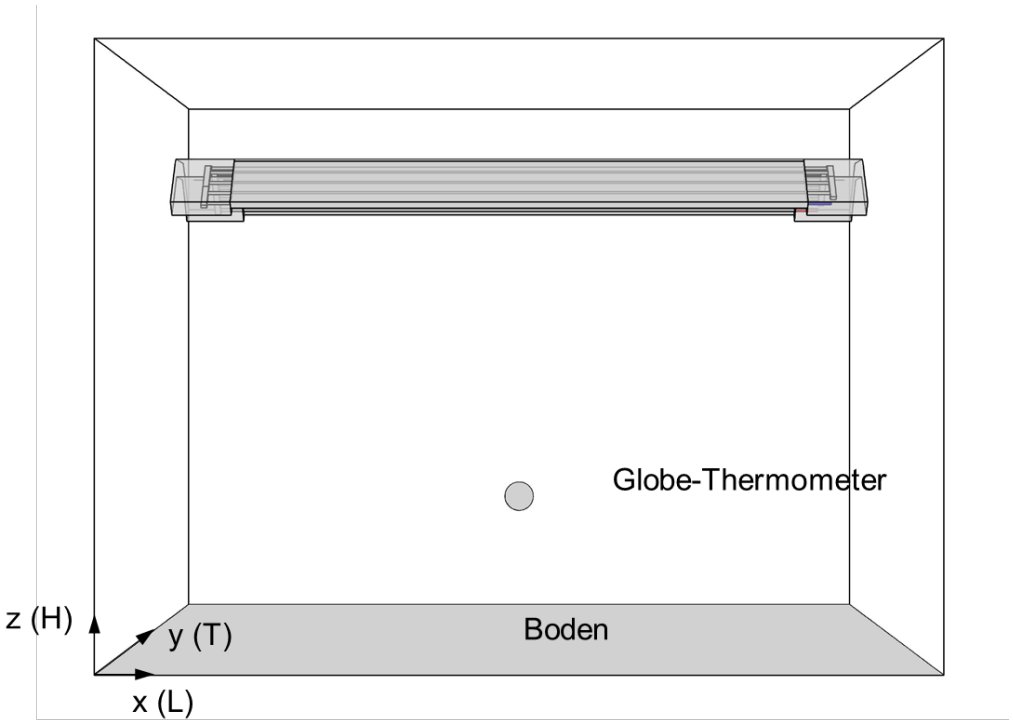



*Bild 3-12: Anordnung der numerisch untersuchten DSP (Typ ZIP 840-12) im Prüfraum*

## 3.2 Relevanten Randbedingungen der numerischen Ermittlungen

Die Randbedingungen der numerischen Ermittlungen der gesamten Wärmeleistungen und Strahlungsleistungen der Deckenstrahlplatte werden in Tab. 3-1 zusammengefasst. Neben den relevanten Abmessungen der geometrischen Modelle werden die notwendigen Randbedingungen der numerischen Ermittlungen auch in der Tabelle aufgelistet. Die Randbedingungen umfassen Luftdruck, Vorlauftemperatur des Wassers, Temperatur der Umschließungsflächen des Prüfraums sowie den Emissionsgrad der Deckenstrahlplatte, des Prüfraums sowie der inneren und äußeren Oberflächen des Globe-Thermometers.

*Tab. 3-1: Zusammenfassung der Randbedingungen der numerischen Ermittlungen*

| | DSP (Typ 1200/16) ohne Schürzen | DSP (Typ 1200/16) mit Schürzen | DSP (ZIP 840-12) |
|---|---|---|---|
| Abmessungen der DSP (aktive Flächen) (L x B) | 3 m x 1,2 m | 3 m x 1,44 m | 3m x 0,84m |
| Schürzenhöhe | - | 53 mm | - |
| Abmessungen des Rohres | $\phi$15 mm x 1,25 mm | $\phi$15 mm x 1,25 mm | $\phi$15 mm x 1,25 mm |
| Abmessungen des Prüfraums (L x T x H) | 4 m x 4 m x 3 m | 4 m x 4 m x 3 m | 4 m x 4 m x 3 m |
| Abmessung des Glob-Thermometers | $\phi$150 mm | $\phi$150 mm | $\phi$150 mm |
| Luftdruck [hPa] | 959,50 | 961,60 | 964,40 |
| Vorlauftemperatur des Wassers [°C] | 79,14 | 76,18 | 74,48 |
| Temperatur von Umschließungsflächen des Prüfraums [°C] | 16,85 | 16,15 | 17,30 |
| Wasserstrom [kg/s] | 0,02631 | 0,0264 | 0,02779 |
| Emissionsgrad der Deckenstrahlplatten | 0,93 | 0,93 | 0,92 |
| Emissionsgrad der Umschließungsflächen des Prüfraums | 0,93 | 0,93 | 0,92 |
| Emissionsgrad der inneren Oberfläche des Glob-Thermometers | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Emissionsgrad der äußeren Oberfläche des Glob-Thermometers | 0,96 | 0,96 | 0,96 |

## 3.3 Ausführungen der numerischen Untersuchungen

Die CFD Software ANSYS 19R2 dient dem Preprocessing [ 4 ], Solver [ 5 ] und dem Postprocessing [ 5 ] der numerischen Untersuchungen der Wärme- und Strahlungsleistungen der Deckenstrahlplatten. Dabei werden die Berechnungen mit dem $RNG\ k-\varepsilon$ Turbulenzmodell und dem DO-Strahlungsmodell unter SIMPLE Scheme in ANSYS-Fluent ausgeführt.

# 4 Vergleich der Ergebnisse aus Messung und Simulation

## 4.1 Deckenstrahlplatten vom Typ 1200 / 16 ohne Schürzen

In Tab. 4-1 werden die Ergebnisse aus der Messung und der Simulation für die DSP Typ 1200 / 16 ohne Schürzen aufgelistet. Die Deckenstrahlplatte gibt bei den numerischen Ermittlungen insgesamt weniger Wärmeleistung und Strahlungswärmeleistung ab; die Differenzen betragen ca. -2,4 %. Die Strahlungsanteile liegen bei beiden Ermittlungen sehr nah beieinander.

Bild 4-1 und Bild 4-2 zeigen die aus der Simulation ermittelten Temperaturverteilungen an den DSP-Oberflächen. Die Skala der Temperatur reicht von 16°C bis 80°C, was zum einen der niedrigsten Temperatur der Umschließungsflächen des Prüfraums und zum anderen der Vorlauftemperatur der DSP entspricht. Die Temperaturänderungen entlang der Rohre und der Bleche der Deckenstrahlplatte sind hier sehr gut zu sehen.

Eine weitere Darstellung der Temperaturen an den DSP-Oberflächen ist in Bild 8-1 in Abschnitt 8.2.1 des Anhangs dargestellt. Die Temperaturverteilungen und die Verteilungen der Vektor-Geschwindigkeit in mittleren Ebenen des Raums werden ebenfalls in diesem Abschnitt gezeigt, siehe Bild 8-2 bis Bild 8-5.

*Tab. 4-1: Vergleich der Ergebnisse bei DSP (Typ 1200/16) ohne Schürzen*

| | Messung | Simulation | Abweichung |
|---|---|---|---|
| **Wärmeleistung auf der Wasserseite** | | | |
| Wärmeleistung | 1647 | 1636 | -0,67% |
| **Strahlungswärmeleistung und prozentualer Strahlungsanteil** | | | |
| mittlere Oberflächentemperatur der Deckenstrahlplatten [°C] | 68,00 | 66,40 | - |
| mittlere Wandtemperatur [°C] | 16,84 | 16,85 | - |
| Emissionsgrad | 0,93 | 0,93 | - |
| Strahlungswärmeleistung (DIN EN 14037-3) | 1228 | 1181 | -3,7% |
| prozentualer Strahlungsanteil (DIN EN 14037-3) | 75,0% | ***72,2%*** | - |

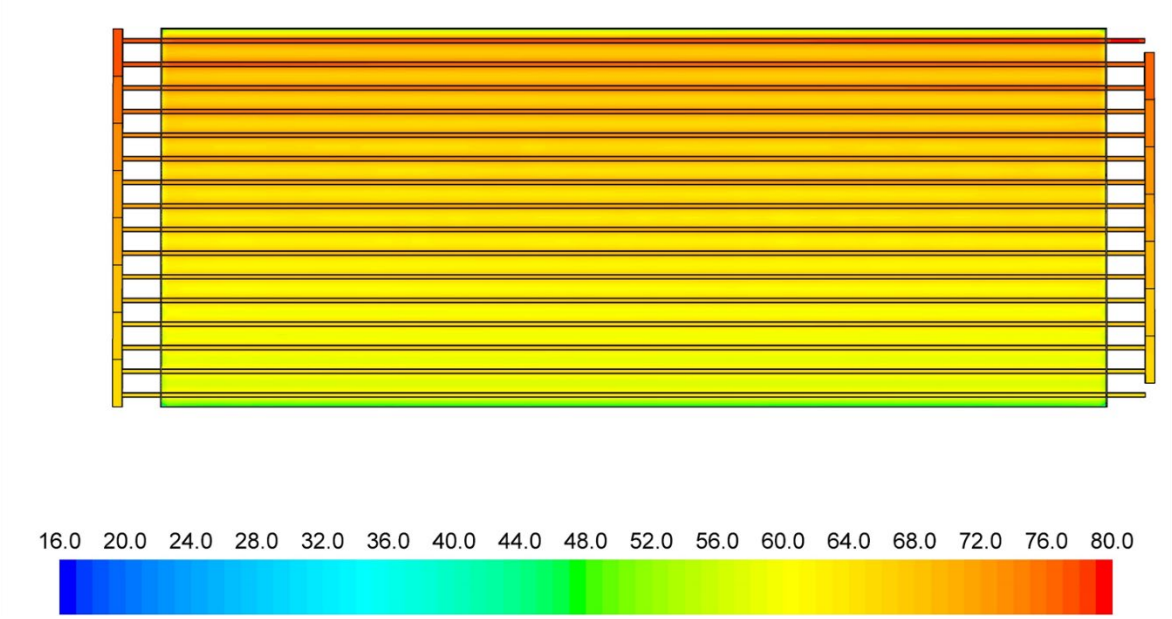



*Bild 4-1: Temperaturverteilungen an den Oberflächen der untersuchten DSP (Typ 1200 / 16) ohne Schürzen in der Draufsicht*

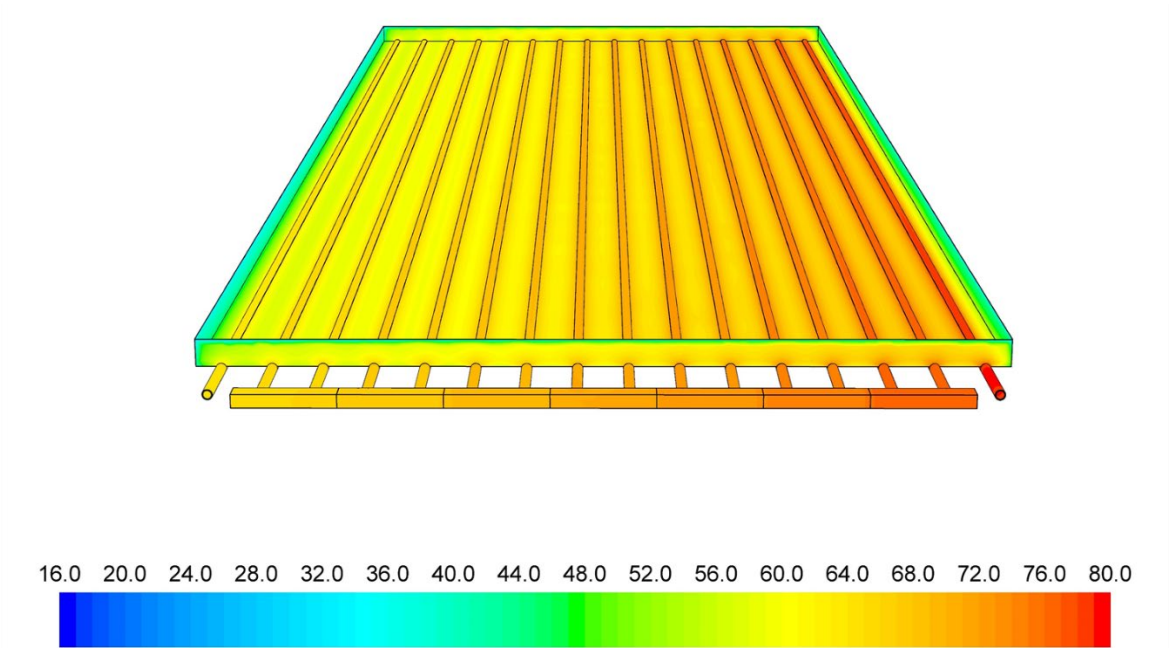



*Bild 4-2: Temperaturverteilungen an den Oberflächen der untersuchten DSP (Typ 1200 / 16) ohne Schürzen in einer Perspektiv-Ansicht auf der Anschlussseite*

## 4.2 Deckenstrahlplatten mit Typ 1200 / 16 mit Schürzenhöhe 53 mm

Die Ergebnisse für die DSP vom Typ 1200 / 16 mit Schürzen sind in Tab. 4-2 dargestellt. Mit dieser baulichen Maßnahme erhöht sich der Strahlungsanteil.

Die Differenz der gesamten Wärmeleistung beträgt rd. -1,0% und die Differenz der Strahlungswärmeleistung sogar rd. 7%.

Bild 4-3 und Bild 4-4 zeigen die aus der Simulation ermittelten Temperaturverteilungen an den DSP-Oberflächen. Die Skala der Temperatur reicht wiederum von 16°C und 80°C. Die Temperaturänderungen entlang der Rohre und der Bleche der Deckenstrahlplatte können hier ebenfalls sehr gut beobachtet werden. Der erhöhte Strahlungsanteil der Deckenstrahlplatten ergibt sich aus der Absenkung der Konvektionswärmeleistung; dies ist durch niedrigere Temperaturen an den seitlichen Blechen der Deckenstrahlplatten im Vergleich zu Deckenstrahlplatten ohne Schürzen im Abschnitt 4.1 zu erklären, siehe Bild 4-4.

Eine weitere Darstellung der Temperatur an DSP-Oberflächen ist in Bild 8-6 im Abschnitt 8.2.2 des Anhangs wiedergegeben. Die Temperaturverteilungen und die Verteilungen der Vektor-Geschwindigkeit den mittleren Ebenen des Prüfraums werden ebenfalls in diesem Abschnitt gezeigt, siehe Bild 8-7 bis Bild 8-10.

*Tab. 4-2: Vergleich der Ergebnisse bei DSP (Typ 1200/16) mit Schürzen*

| | Messung | Simulation | Abweichung |
|---|---|---|---|
| **Wärmeleistung auf der Wasserseite** | | | |
| Wärmeleistung | 1558 | 1542 | -1,03% |
| **Strahlungswärmeleistung und prozentualer Strahlungsanteil** | | | |
| mittlere Oberflächentemperatur der Deckenstrahlplatten [°C] | 62,00 | 59,19 | - |
| mittlere Wandtemperatur [°C] | 16,14 | 16,16 | - |
| Emissionsgrad | 0,93 | 0,93 | - |
| Strahlungswärmeleistung (DIN EN 14037-3) | 1279 | 1183 | -7,51% |
| prozentualer Strahlungsanteil (DIN EN 14037-3) | 82,0% | ***76,7%*** | - |

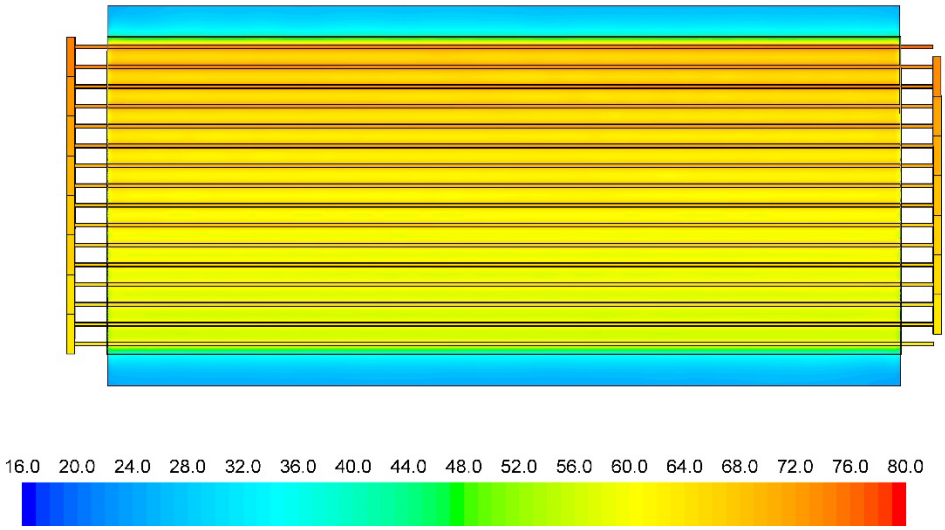



*Bild 4-3: Temperaturverteilungen an den Oberflächen der untersuchten DSP (Typ 1200 / 16) mit Schürzen in der Draufsicht*

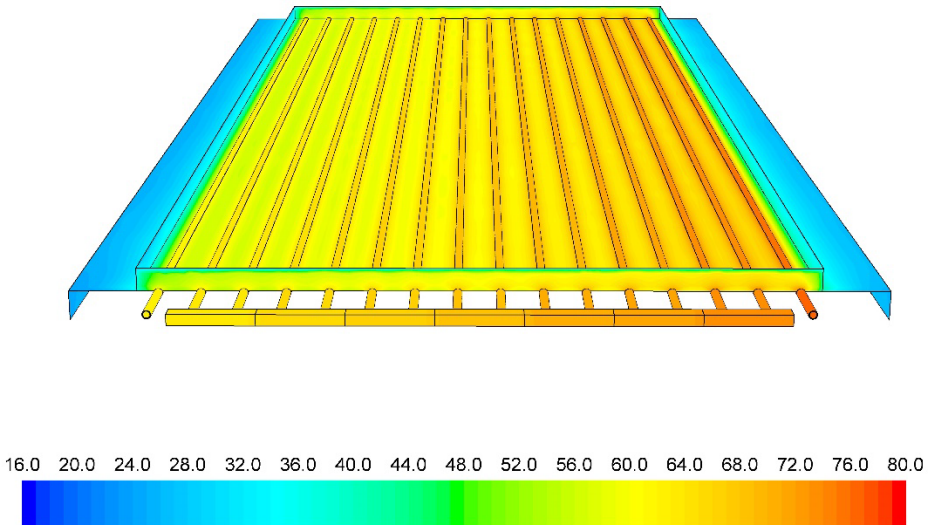



*Bild 4-4: Temperaturverteilungen an den Oberflächen der untersuchten DSP (Typ 1200 / 16) mit Schürzen in einer Perspektiv-Ansicht auf der Anschlussseite*

## 4.3 Deckenstrahlplatten mit Typ ZIP 840-12

Die Ergebnisse für die DSP von Typ ZIP 840-12 werden in Tab. 4-3 eingetragen. Der prozentualer Strahlungsanteil verschlechtert sich mit dieser baulichen Maßnahme im Verglich zu anderen zwei Typ der Deckenstrahlplatten. Die prozentualen Strahlungsanteile zwischen Messung und Simulation sind nahe zueinander. Die Differenz der gesamten Wärmeleistung und Strahlungswärmeleistung sind bei ca. -5,2% und -4,3% jeweils.

Die Temperaturverteilungen an den Oberflächen der Deckenstrahlplatten sind in Bild 4-5 und Bild 4-6 dargestellt. Die Skala der Temperatur reicht von 17°C bis 75°C. Die Temperaturänderungen entlang der Rohre und der Bleche der Deckenstrahlplatte können hier wiederum sehr gut beobachtet werden. Die etwas höheren Temperaturen an den seitlichen Blechen deuten einen etwa höhere Konventionsanteil an.

Eine weitere Darstellung der Temperatur an den DSP-Oberflächen ist in Bild 8-11 im Abschnitt 8.2.3 des Anhangs dargestellt. Die Temperaturverteilungen und die Verteilungen der Vektor-Geschwindigkeit in mittleren Ebenen des Raums werden ebenfalls in diesem Abschnitt gezeigt, siehe Bild 8-12 bis Bild 8-15.

*Tab. 4-3: Vergleich der Ergebnisse bei DSP – TYP ZIP842-12*

| | Messung | Simulation | Abweichung |
|---|---|---|---|
| **Wärmeleistung auf der Wasserseite** | | | |
| Wärmeleistung | 1239 | 1175 | -5,2% |
| **Strahlungswärmeleistung und prozentualer Strahlungsanteil** | | | |
| mittlere Oberflächentemperatur der Deckenstrahlplatten [°C] | 65,50 | 64,26 | - |
| mittlere Wandtemperatur [°C] | 17,30 | 17,30 | - |
| Emissionsgrad | 0,92 | 0,92 | - |
| Strahlungswärmeleistung (DIN EN 14037-3) | 794,00 | 760,02 | -4,3% |
| prozentualer Strahlungsanteil (DIN EN 14037-3) | 64,0% | ***64,7%*** | - |

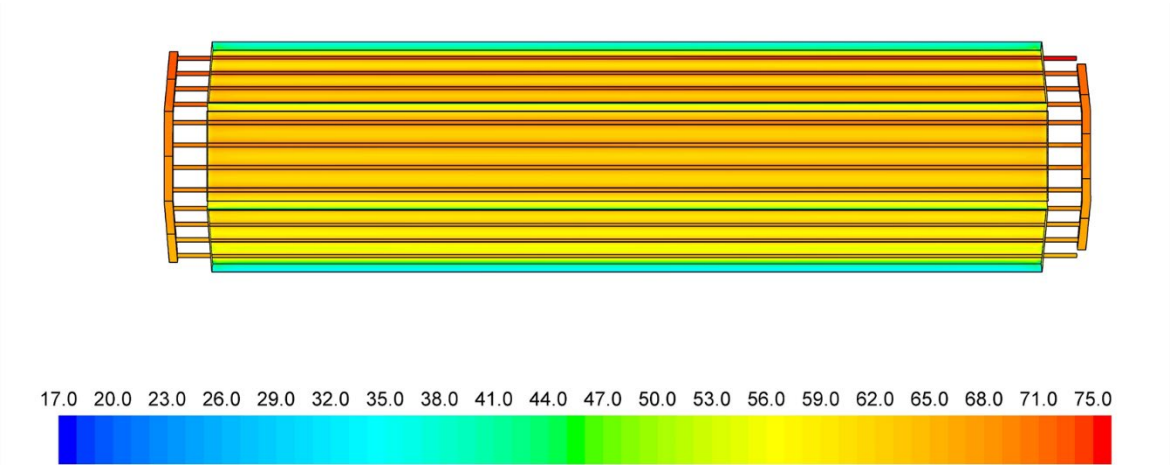



*Bild 4-5: Temperaturverteilungen an den Oberflächen der untersuchten DSP (TYP ZIP 840-12) in der Draufsicht*

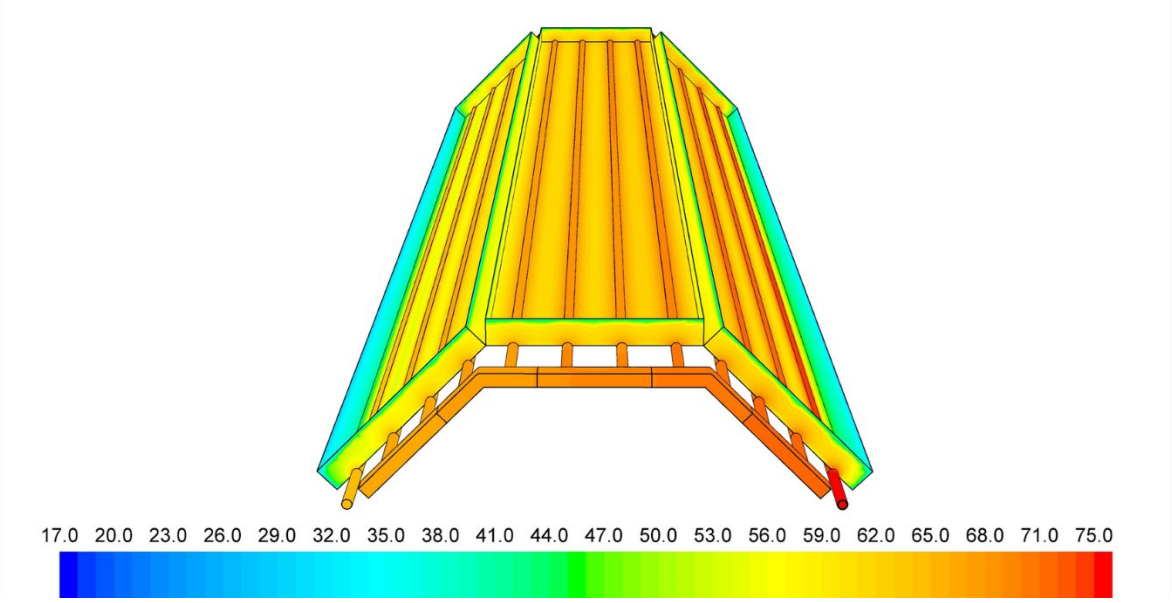



*Bild 4-6: Temperaturverteilungen an den Oberflächen der untersuchten DSP (TYP ZIP 840-12) in einer Perspektiv-Ansicht auf der Anschlussseite*

## 4.4 Fazit

Die aus numerisch ermittelten Gesamtwärmeleistungen sowie Strahlungswärmeleistungen sind für die drei ermittelten Deckenstrahlplatten etwas niedriger als deren im Labor gemessene Werte. Die Differenzen der Wärmeleistungen liegen zwischen ca. 2 % und 5 % und die Differenzen der Strahlungswärmeleistungen zwischen ca. 2 % und 7 %. Die Strahlungsanteile zeigen trotzdem eine gute Übereinstimmung mit den Werten aus den Messungen.

Bauliche Maßnahmen zeigen deutlich ihren Einfluss auf die Strahlungsanteile der Deckenstrahlplatten, siehe Tab. 4-4. Gegenüber der Deckenstrahlplatten ohne Schürzen erhöht die Deckenstrahlplatte mit Schürzen den Strahlungsanteil um ca. 2 %. Im Vergleich mit den Deckenstrahlplatten ohne Schürzen geht der Strahlungsanteil der Deckenstrahlplatte vom Typ ZIP-Form sogar um ca. 10% zurück, weil die projizierten Flächen der ZIP-Form kleiner sind als die ursprünglich horizontal angeordneten Deckenstrahlplatten.

*Tab. 4-4: Zusammenfassung der Ergebnisse der numerisch untersuchten DSP*

| | gesamte Wärmeleistung [W] | Strahlungswärme -leistung [W] | Strahlungsanteil |
|---|---|---|---|
| **Deckenstrahlplatten ohne Schürzen** | 1636 | 1181 | **72,2%** |
| **Deckenstrahlplatten mit Schürzen** | 1542 | 1183 | **76,7%** |
| **Deckenstrahlplatten mit ZIP-Form** | 1175 | 760 | **64,7 %** |

Die Visualisierungen der Temperaturverteilung an den Oberflächen der Deckenstrahlplatten lassen die Strahlung der betrieben Deckenstrahlplatten erkennen, was einer der Vorteile der CFD-Methode hinsichtlich Optimierung bzw. Verbesserungen von Deckenstrahlplatten bietet.

Die numerischen Ermittlungen zeigen hier eine gute Abbildungsqualität der Modelle zur Ermittlung des Strahlungsanteils der Deckenstrahlplatten. Bei den festgestellten Abweichungen spielen sowohl die Modellunsicherheit einerseits als andererseits auch die Messunsicherheit im Labor eine Rolle.

# 5 Einfluss der Schürzenhöhe auf den Strahlungsanteil der Deckenstrahlplatten des Typen 1200/16

In den vorherigen Kapiteln geht es um den Vergleich zwischen experimentellen und numerischen Untersuchungen verschiedener Typen von Deckenstrahlplatten. Die Vergleichsergebnisse zeigen, dass die numerische Methode für weitere Untersuchungen von Deckenstrahlplatten gut geeignet ist und Labormessungen ersetzen kann im Hinblick auf die Beurteilung von weiteren Maßnahmen, die den Strahlungsanteil erhöhen sollen. Die Deckenstrahlplatten vom Typ 1200/16 mit verschiedenen Schürzenhöhen werden ausschließlich mittels numerischer Berechnung für weitere Untersuchungen ausgewählt, weil die Plausibilität des Einflusses verschiedener Schürzenhöhen auf den Strahlungsanteil leicht beurteilt werden kann. Zwei Varianten – Schürzenhöhen von 25 mm und 100 mm – werden untersucht. Dabei dient die in Abschnitt 3.1.2 untersuchte Deckenstrahlplatte mit einer Schürzenhöhe von 53 mm als Referenz für die Beurteilung der Ergebnisse.

## *5.1 Numerische Modellierung der Deckenstrahlplatten*

Bild 5-1 bzw. Bild 5 2 zeigen den Aufbau der DSP mit der Schürzenhöhe von 25 mm und 100 mm. Abgesehen von der Schürzenhöhe sind beide Varianten völlig identisch mit der Referenz-Deckenstrahlplatte, siehe Bild 3-5 und Bild 3-7. Die Anordnung ist gleich wie bei der Referenz, siehe Bild 3-8.

Die Randbedingungen zur Ermittlung der Wärmeleistungen der verschiedenen Schürzenhöhen sind gleich wie im Referenzfall. Sie haben die gleiche Vorlauftemperatur, den gleichen Emissionsgrad der Flächen und das gleiche Kühlsystem des Prüfraums, die detaillierte Beschreibung ist in Tab. 3-1 zu finden.

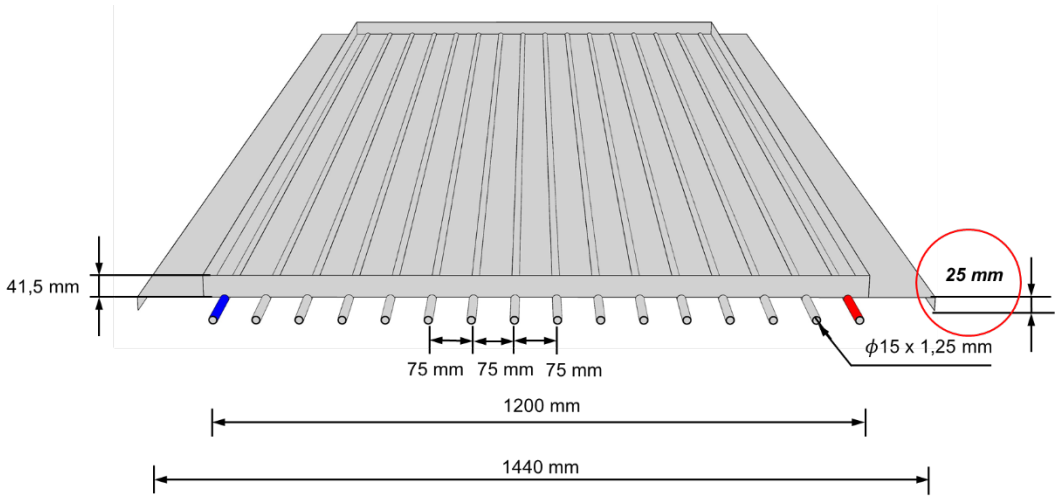



*Bild 5-1: Abmessungen der numerisch untersuchten DSP (Typ 1200 / 16) mit Schürzenhöhe von 25 mm*

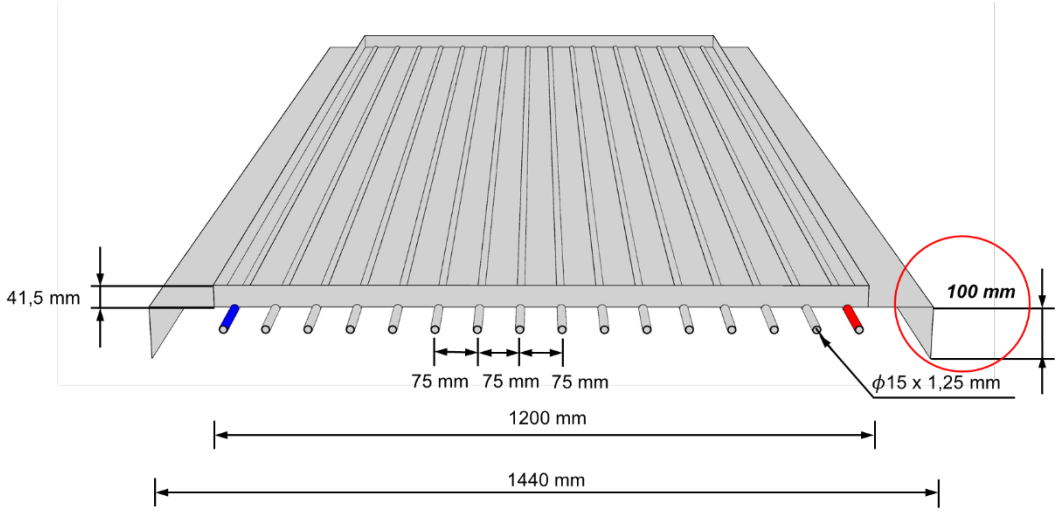



*Bild 5-2: Abmessungen der numerisch untersuchten DSP (Typ 1200 / 16) mit Schürzenhöhe von 100 mm*

## 5.2 Vergleich der Ergebnisse der Deckenstrahlplatten mit verschiedenen Schürzenhöhen

Die relevanten Ergebnisse sind in Tab. 5-1 zusammengefasst. Diese drei Deckenstrahlplatten mit den verschiedenen Schürzenhöhen geben unterschiedliche Gesamt-Wärmeleistungen ab. Je höher die Schürzen sind, desto niedriger sind die Wärmeleistungen. Die Deckenstrahlplatten haben nur minimal unterschiedliche Strahlungswärmeleistung, weil diese von den Schürzen praktisch nicht beeinflusst wird. Die Schürzen „behindern“ dagegen die konvektive Wärmeabgabe. Dabei erhöht sich der prozentuale Strahlungsanteil der Deckenstrahlplatten abhängig von den Schürzenhöhen. Die Steigerung beträgt gut 1 % bei Verdoppelung der Schürzenhöhe, bei Halbierung der Schürzenhöhe ergibt sich eine Verminderung um knapp 1 %.

*Tab. 5-1: Ergebnisse er Deckenstrahlplatten mit verschiedenen Schürzenhöhen*

| | Referenz (Schürzenhöhe = 53 mm) | Variante 1 (Schürzenhöhe = 25 mm) | Variante 2 (Schürzenhöhe = 100 mm) |
|---|---|---|---|
| **Wärmeleistung auf der Wasserseite** | | | |
| Wärmeleistung [W] | 1542 | 1555 | 1519 |
| **Strahlungswärmeleistung und prozentualer Strahlungsanteil** | | | |
| mittlere Oberflächentemperatur der Deckenstrahlplatten [°C] | 59,19 | 59,12 | 59,21 |
| mittlere Wandtemperatur des Prüfraums [°C] | 16,16 | 16,16 | 16,16 |
| Emissionsgrad | 0,93 | 0,93 | 0,93 |
| Strahlungswärmeleistung (DIN EN 14037-3) [W] | 1183 | 1181 | 1184 |
| prozentualer Strahlungsanteil (DIN EN 14037-3) | ***76,7%*** | ***75,9%*** | ***78%*** |

Bild 5-3 und Bild 5-4 stellen die Temperaturverteilungen an den Oberflächen der Deckenstrahlplatte mit der Schürzenhöhe 25 mm dar. Die Skala der Temperatur reicht von 16°C und 80°C. Die Temperaturänderungen entlang der Rohre und der Bleche der Deckenstrahlplatte sind hier sehr gut zu erkennen.

Eine weitere Darstellung der Temperaturen an der DSP-Oberfläche ist in Bild 8-16 im Abschnitt 8.3.1 des Anhangs wiedergegeben. Die Temperaturverteilungen und die Verteilungen der Vektor-Geschwindigkeit der mittleren Ebene des Prüfraums werden ebenfalls in diesem Abschnitt gezeigt, Bild 8-17 bis Bild 8-20.

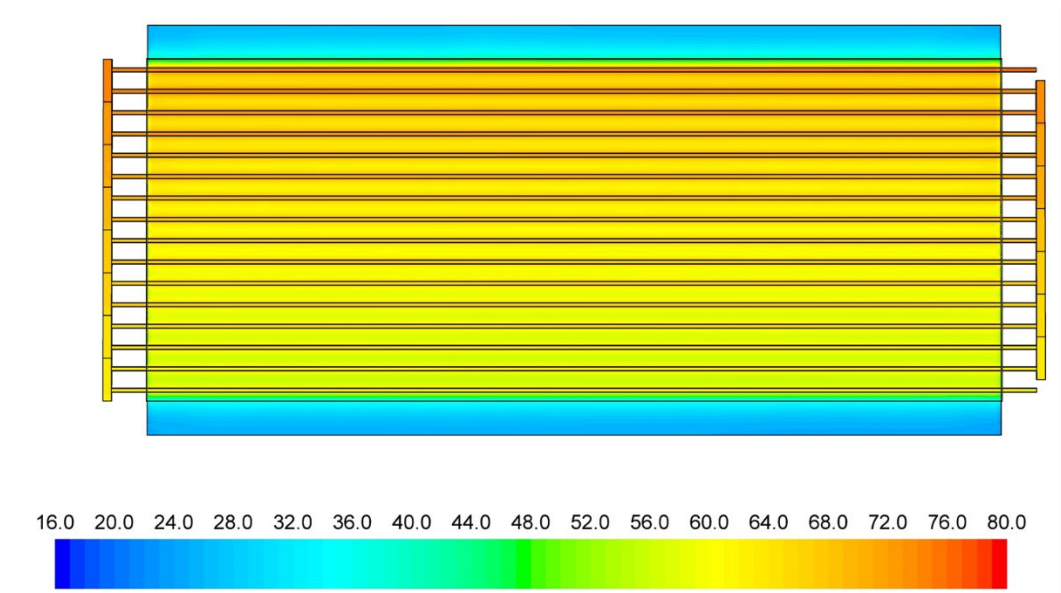



*Bild 5-3: Temperaturverteilungen an den Oberflächen der untersuchten DSP (Typ 1200 / 16) mit Schürzenhöhe 25 mm in der Draufsicht*

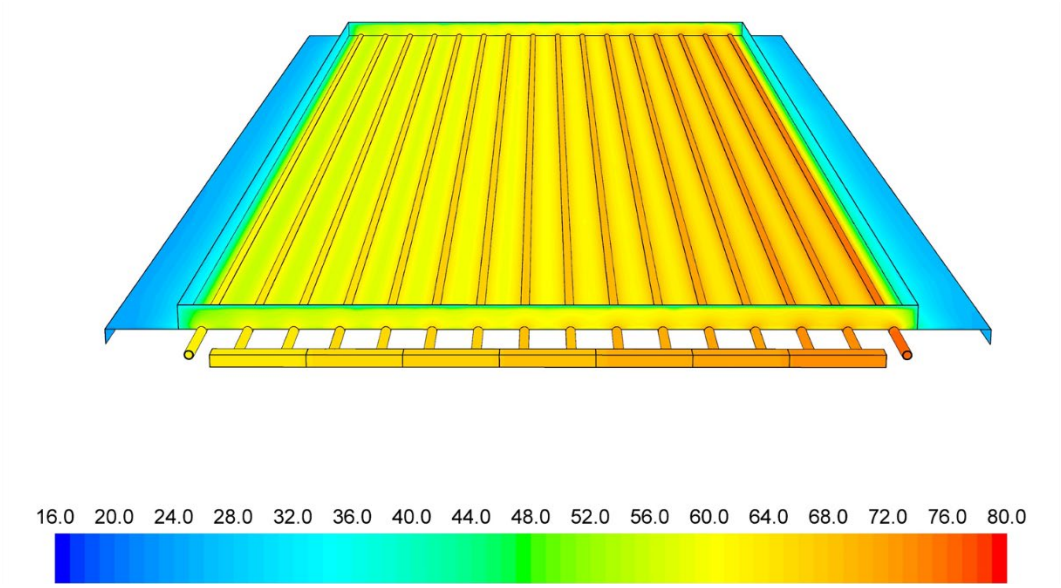



*Bild 5-4: Temperaturverteilungen an den Oberflächen der untersuchten DSP (Typ 1200 / 16) mit Schürzenhöhe 25 mm in einer Perspektiv-Ansicht auf die Anschlussseite*

Des Weiteren werden die Temperaturverteilungen an den Oberflächen der DSP mit der Schürzenhöhe 100 mm in Bild 5-5 und Bild 5-6 gezeigt. Die Skala der Temperatur reicht wiederum von 16°C und 80°C. Die Temperaturänderungen entlang der Rohre und der Bleche der Deckenstrahlplatte sind hier ebenfalls sehr gut zu erkennen. Die Temperaturverteilungen sind in beiden Untersuchungen mit verschiedenen Schürzenhöhen sehr ähnlich; der Unterschied ist nicht mit bloßen Augen zu erken-

nen, weil die Gesamt-Wärmeleistungen von beiden nur minimal unterschiedlich sind, ca. 36 W.

Eine weitere Darstellung der Temperatur an der DSP-Oberfläche ist in Bild 8-21 im Abschnitt 8.3.2 des Anhangs wiedergegeben. Die Temperaturverteilungen und die Verteilungen der Vektor-Geschwindigkeit der mittleren Ebene des Prüfraums werden ebenfalls in diesem Abschnitt gezeigt, Bild 8-22 bis Bild 8-25.

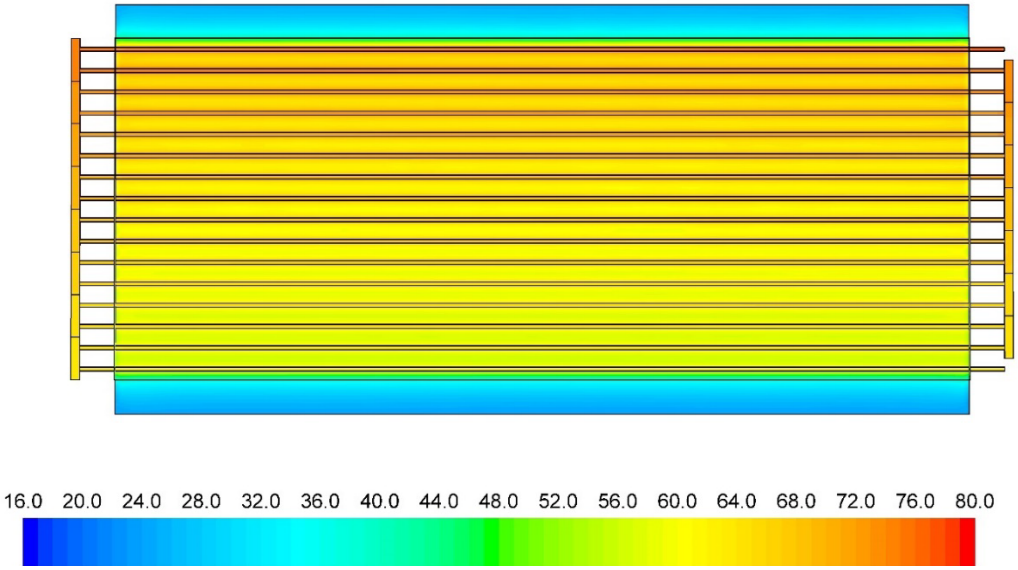



*Bild 5-5: Temperaturverteilungen an den Oberflächen der untersuchten DSP (Typ 1200 / 16) mit Schürzenhöhe 100 mm in der Draufsicht*

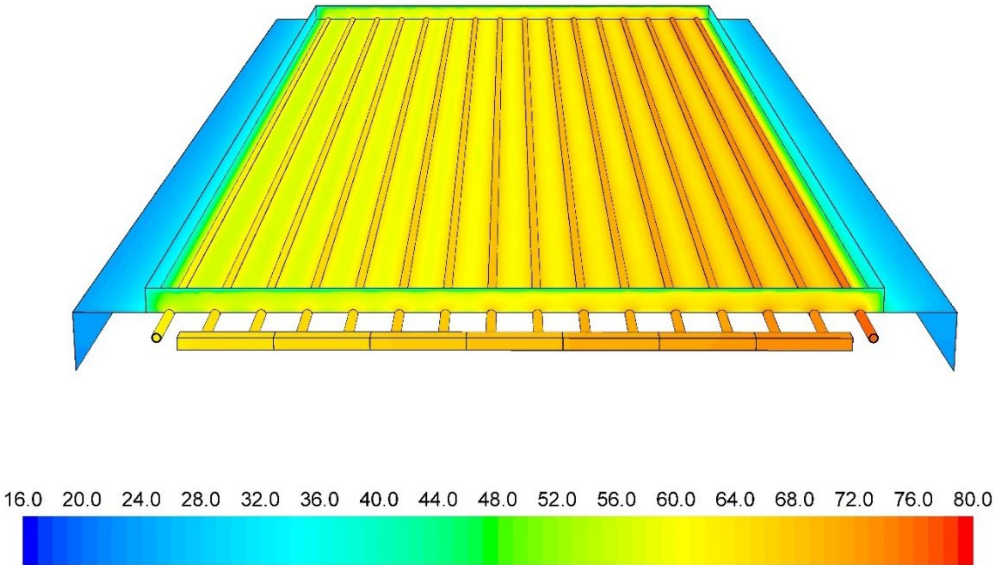



*Bild 5-6: Temperaturverteilungen an den Oberflächen der untersuchten DSP (Typ 1200 / 16) mit Schürzenhöhe 100 mm in einer Perspektiv-Ansicht auf die Anschlussseite*

## 5.3 Fazit

Im Vergleich zum Referenzfall (Schürzenhöhe 53 mm) sind die Ergebnisse der Deckenstrahlplatten mit verschiedenen Schürzenhöhen plausibel. Die absoluten Strahlungswärmeleistungen sind praktisch unabhängig von der Schürzenhöhe, siehe Tab. 5-1. Mit der Schürzenhöhe steigen die Strahlungsanteile der Deckenstrahlplatten, wobei diese durch eine Verdopplung der Referenzhöhe lediglich um gut 1 % erhöht werden können. Die Schürzen beeinflussen praktisch nur die konvektive Wärmeabgabe, wodurch die Gesamt-Wärmeleistung der Deckenstrahlplatt reduziert werden. Das vorgenannte gilt sinngemäß umgekehrt bei Halbierung der Schürzenhöhe.

Die hier ausschließlich numerisch durchgeführten Untersuchungen zeigen die Möglichkeiten der Optimierungen im Sinne der Erhöhung des Strahlungsanteils durch Reduzierung der Konvektion und damit auch der Gesamt-Wärmeleistung.

# 6 Zusammenfassung

In der vorgelegten Studie werden Modelle für Deckenstrahlplatten mit verschiedenen baulichen Maßnahmen mittels numerischen Methoden (Computational Fluid Dynamics) untersucht. Dabei wird die Abbildungsqualität der erstellten Modelle durch Vergleiche mit Ergebnissen aus Labormessungen überprüft. Insgesamt drei Bauarten von Deckenstrahlplatten werden in der Studie betrachtet, nämlich horizontal angeordnete Deckenstrahlplatten (Typ 1200/16) ohne und mit Schürzen sowie eine aus drei Einzelmodulen in abgewinkelter Anordnung (Winkel: 45°) bestehende Deckenstrahlplatte (Typ ZIP 840-12).

Die numerischen Untersuchungen zeigen einerseits den quantitativen Unterschied zu Labormessungen auf, aber andererseits die qualitative Ähnlichkeit zwischen beiden. Die numerisch ermittelten Gesamt- und Strahlungswärmleistungen der drei Deckenstrahlplatten sind jeweils etwas niedriger als die der Labormessungen. Aber der aus der Gesamtwärmeleistung und der Strahlungsleistung gebildete Strahlungsanteil zeigt eine bessere Übereinstimmung zwischen Labormessung und Simulation.

Im Vergleich mit Deckenstrahlplatten ohne Schürzen bei vollständig horizontaler Anordnung erhöht sich der Strahlungsanteil der Deckenstrahlplatten allein durch den Einsatz der Schürzen um 5 %, wobei die Deckenstrahlplatten praktisch gleiche Strahlungswärmeleistungen haben. Durch die Schürzen wird dagegen die konvektive Wärmeabgabe der Deckenstrahlplatten reduziert.

Der Strahlungsanteil ist bei der abgewinkelten Anordnung der Deckenstrahlplatten sogar um 8 % niedriger als der bei der horizontalen Anordnung, weil die effektive Baubreite der Deckenstrahlplatten reduziert wird. Dies deutet indirekt eine erhöhte Konvektion der Deckenstrahlplatten an.

Des Weiteren werden im Hinblick auf die Variation der Schürzenhöhe (25 mm und 100 mm) die Deckenstrahlplatten von Typ 1200/16 ausschließlich numerisch untersucht. Die Ergebnisse werden mit der vorher untersuchten baugleichen Deckenstrahlplatte (Schürzenhöhe 53 mm) verglichen und bewertet. Je höher die Schürzen sind, desto niedriger sind die Gesamtwärmeleistungen, aber desto höher ist der Strahlungsanteil der Deckenstrahlplatten. Die Steigerung beträgt ca. 1 % bei Ver-

doppelung der Schürzenhöhe. Im Gegenzug wird damit die Konvektionswärmeabgabe “behindert“. Das vorgenannte gilt sinngemäß umgekehrt bei Halbierung der Schürzenhöhe.

Die vorgelegte Studie zeigt die Möglichkeit des Einsatzes numerischer Methoden zur Verbesserung bzw. Optimierung von Deckenstrahlplatten. Unter Sicherstellungen der Abbildungsqualität der Modelle hat die numerische Methode besondere Vorteile gegenüber der Labormessungen in ökonomischer und ökologischer Hinsicht (wie z. B. Zeit, Kosten etc.) und liefert belastbare Ergebnisse.

Es wäre ebenfalls interessant, die Dicke der Dämmung auf den Deckenstrahlplatten mittels numerische Näherungsverfahren zu untersuchen. Materialien der Heizrohre oder der Dämmung sowie des Blechs könnten ebenfalls bei weiteren numerischen Untersuchungen von Deckenstrahlplatten betrachtet werden.

# 7 Literaturverzeichnis

*[ 1 ] DIN EN 14037-2. An der Decke frei abgehängte Heiz- und Kühlflächen für Wasser mit einer Temperatur unter 120 °C – Teil2: Vorgefertigte Deckenstrahlplatten zur Raumheizung – Prüfverfahren für die Wärmeleistung. DEUTSCHE NORM. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Dezember 2016.*

*[ 2 ] DIN EN 14037-3. An der Decke frei abgehängte Heiz- und Kühlflächen für Wasser mit einer Temperatur unter 120 °C – Teil2: Vorgefertigte Deckenstrahlplatten zur Raumheizung – Wärmetechnische Umrechnungen, Bewertungsmethoden und Festlegung der Strahlungs-Wärmeleistung. DEUTSCHE NORM. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Dezember 2016.*

*[ 3 ] Tu, J.Y., Yeoh, G.H. und Liu, C.Q. COMPUTIONAL FLUID DYNAMICS – A Practical Approach. AMSTERDAM; BOSTON; HEIDELBER: ELSEVIER, 2008. ISBN: 978-0-7506-8563-4.*

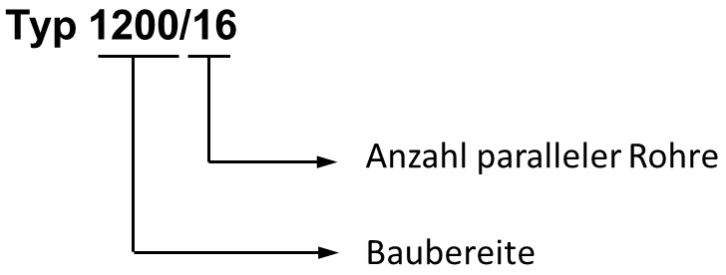
*[ 4 ] ANSYS DesignModeler User's Guide. Release 2019 R2, May 2019.*

*[ 5 ] ANSYS Fluent User's Guide. Release 2019 R2, May 2019.*

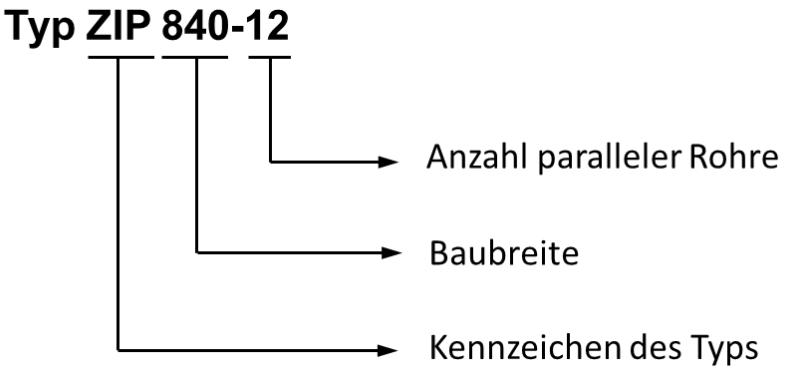
# 8 Anhang

## 8.1 Bezeichnung der Deckenstrahlplatten

Typ 1200 / 16: Baubreite: 1200 mm, Prüfling in horizontaler Anordnung




Typ ZIP 840-12: Baubreite: 840 mm, Prüfling bestehend aus 3 Einzelmodulen in abgewinkelter Anordnung, dadurch reduziert sich die effektive Baubreite.



## 8.2 Vergleich der Ergebnisse aus Messung und Simulation

### 8.2.1 Deckenstrahlplatte vom Typ 1200 / 16 ohne Schürzen

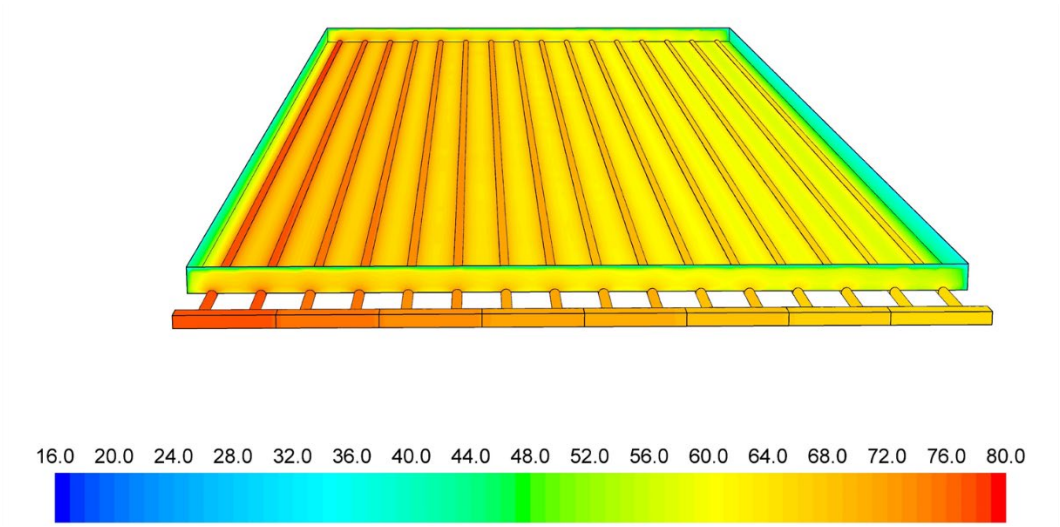



*Bild 8-1: Temperaturverteilungen an den Oberflächen der untersuchten DSP (Typ 1200 / 16) ohne Schürzen in einer Perspektiv-Ansicht auf der Umlenkseite*

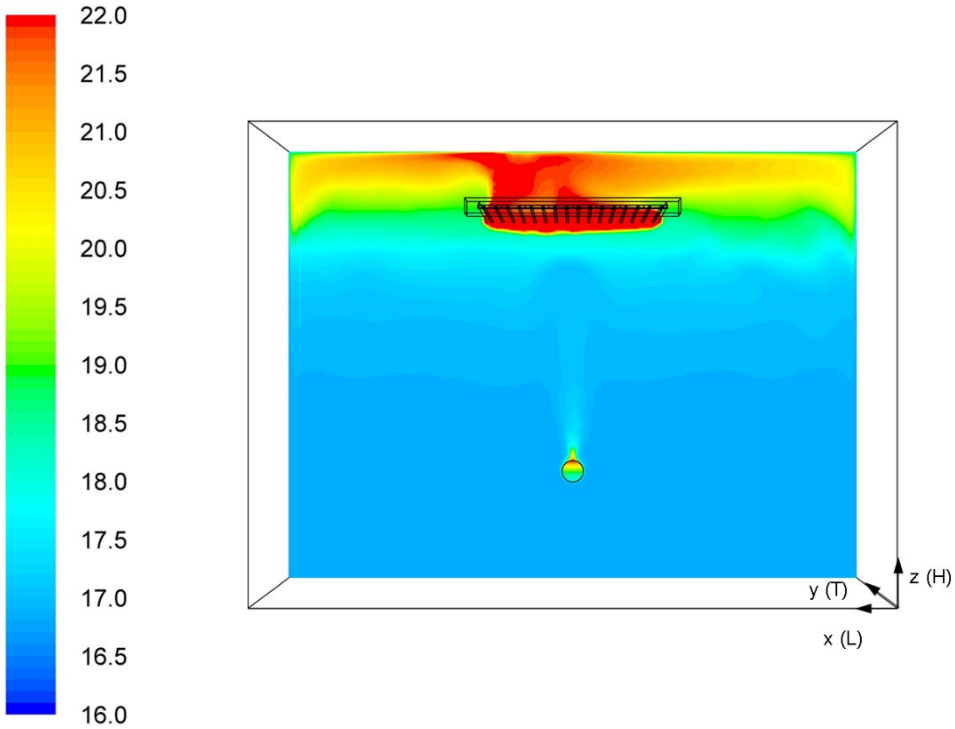



*Bild 8-2: Temperaturverteilung in der Ebene x = 2 m bei der Untersuchung von DSP (Typ 1200/16) ohne Schürzen*

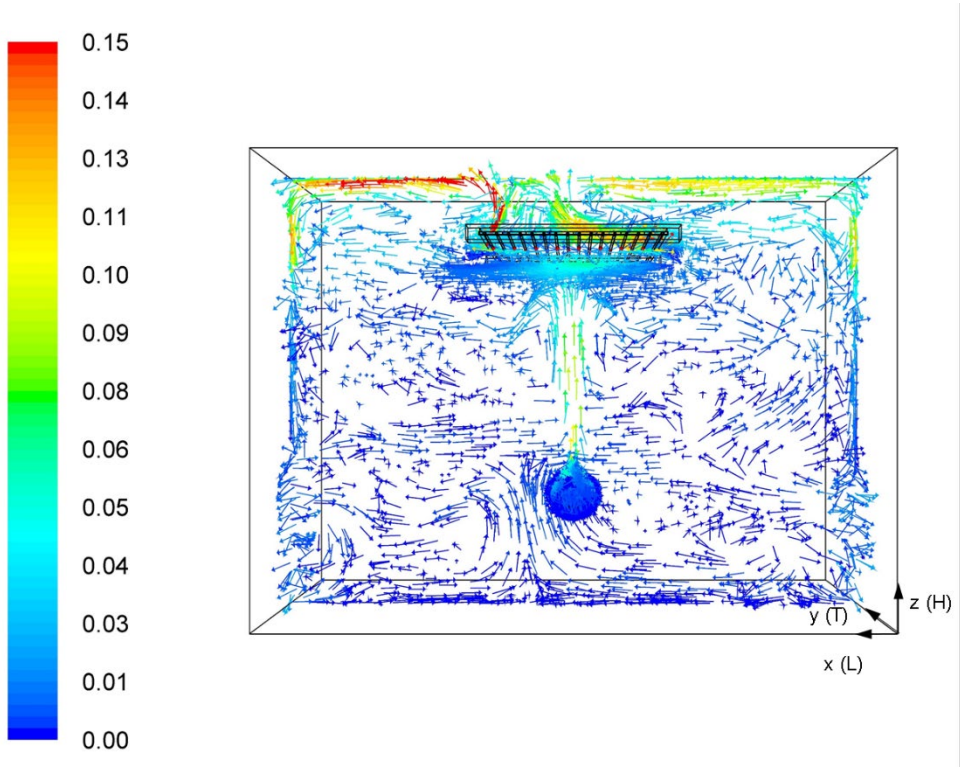



*Bild 8-3: Geschwindigkeitsverteilung in Vektordarstellung in der Ebene x = 2 m bei der Untersuchung von DSP (Typ 1200/16) ohne Schürzen*

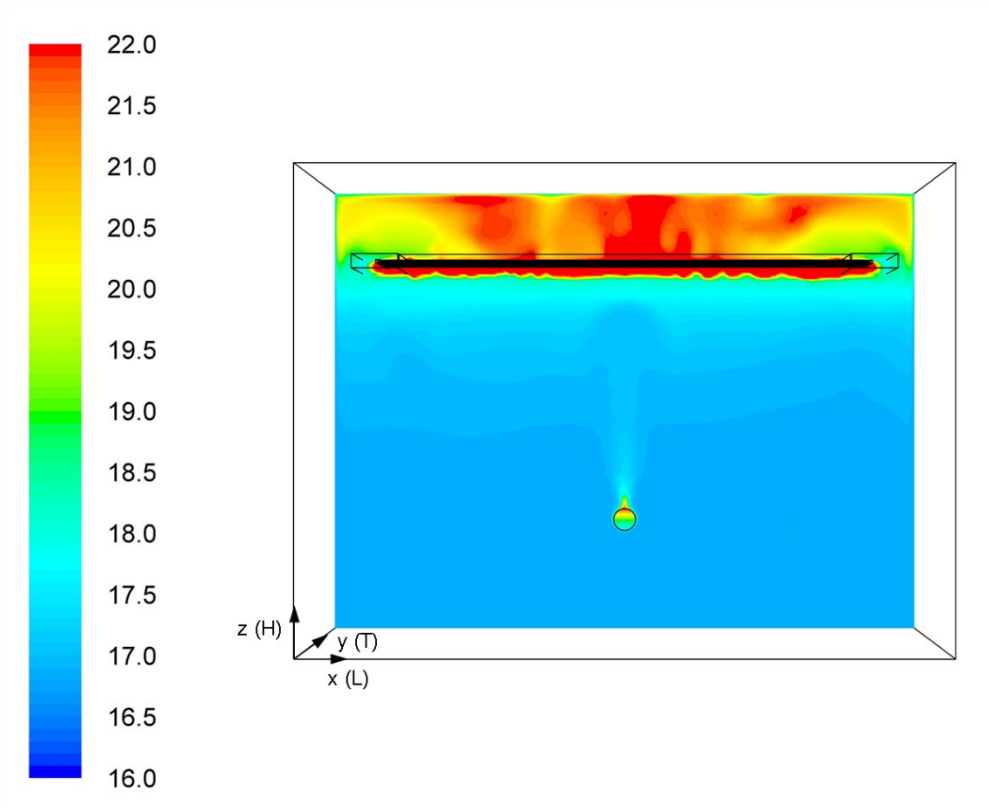



*Bild 8-4: Temperaturverteilung in der Ebene y = 2 m bei der Untersuchung von DSP (Typ 1200/16) ohne Schürzen*

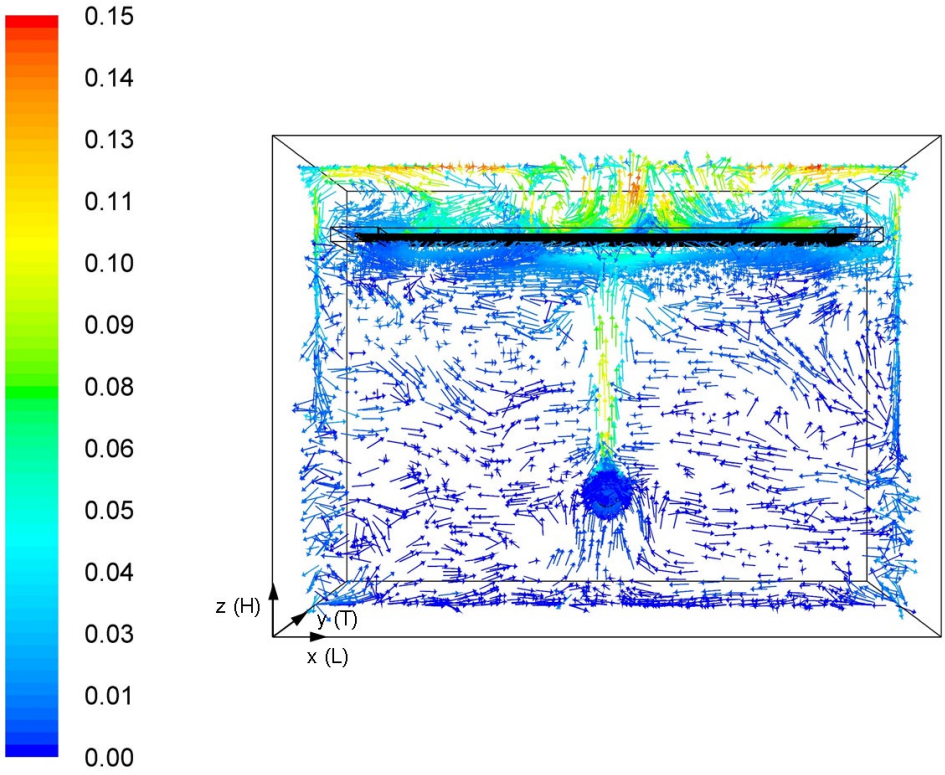



*Bild 8-5: Geschwindigkeitsverteilung in Vektordarstellung in der Ebene y = 2 m bei der Untersuchung von DSP (Typ 1200/16) ohne Schürzen*

### 8.2.2 Deckenstrahlplatte vom Typ 1200 / 16 mit Schürzenhöhe 53 mm

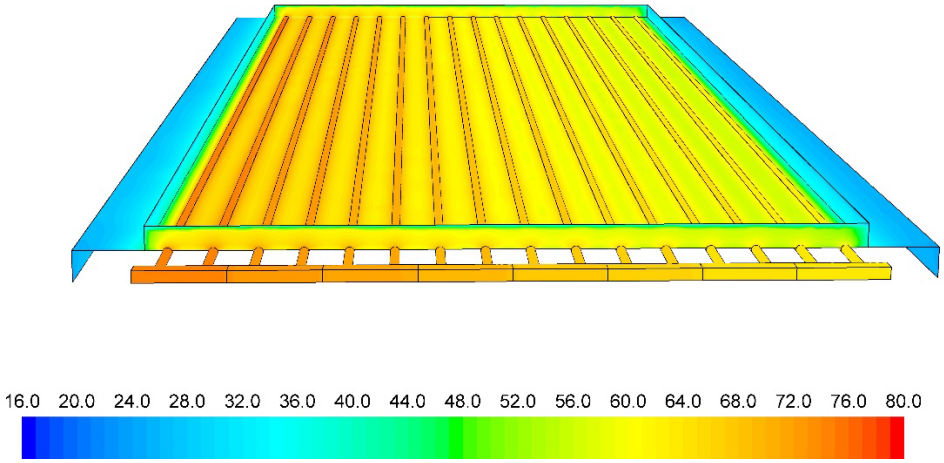



*Bild 8-6: Temperaturverteilung an den Oberflächen der untersuchten DSP (Typ 1200 / 16) mit Schürzen in einer Perspektiv-Ansicht auf der Umlenkseite*

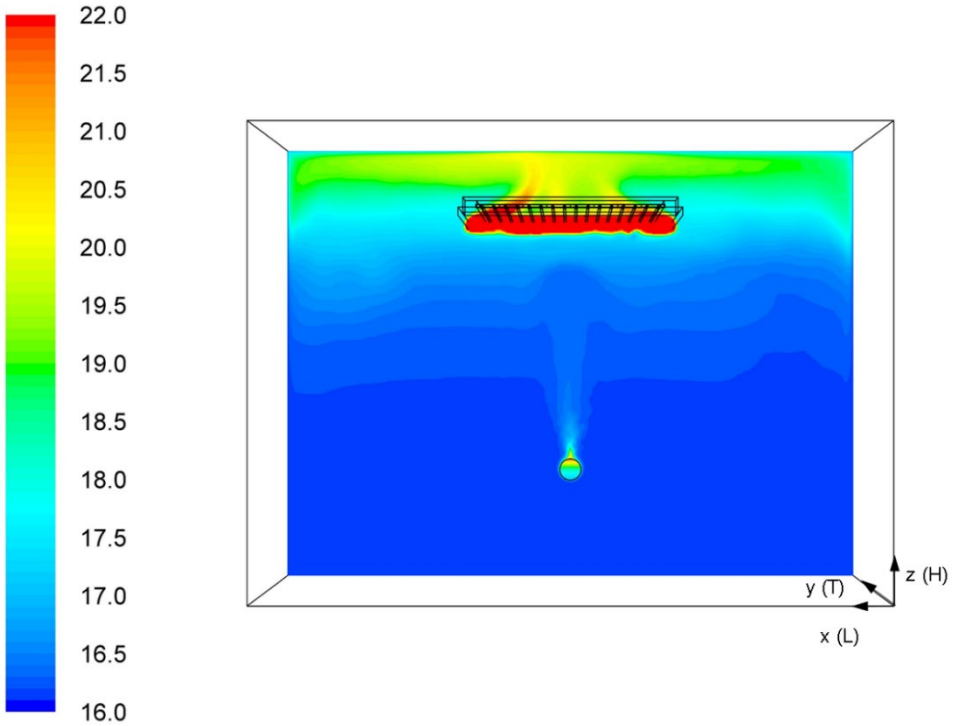



*Bild 8-7: Temperaturverteilung in der Ebene x = 2 m bei der Untersuchung von DSP (Typ 1200/16) mit Schürzen*

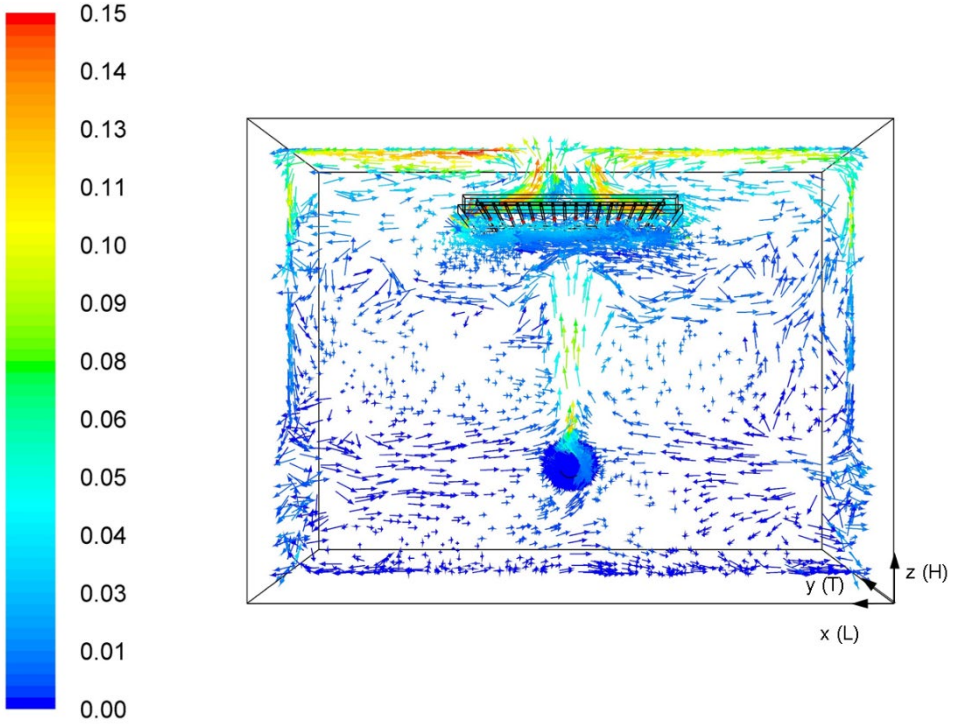



*Bild 8-8: Geschwindigkeitsverteilung in Vektordarstellung in der Ebene x = 2 m bei der Untersuchung von DSP (Typ 1200/16) mit Schürzen*

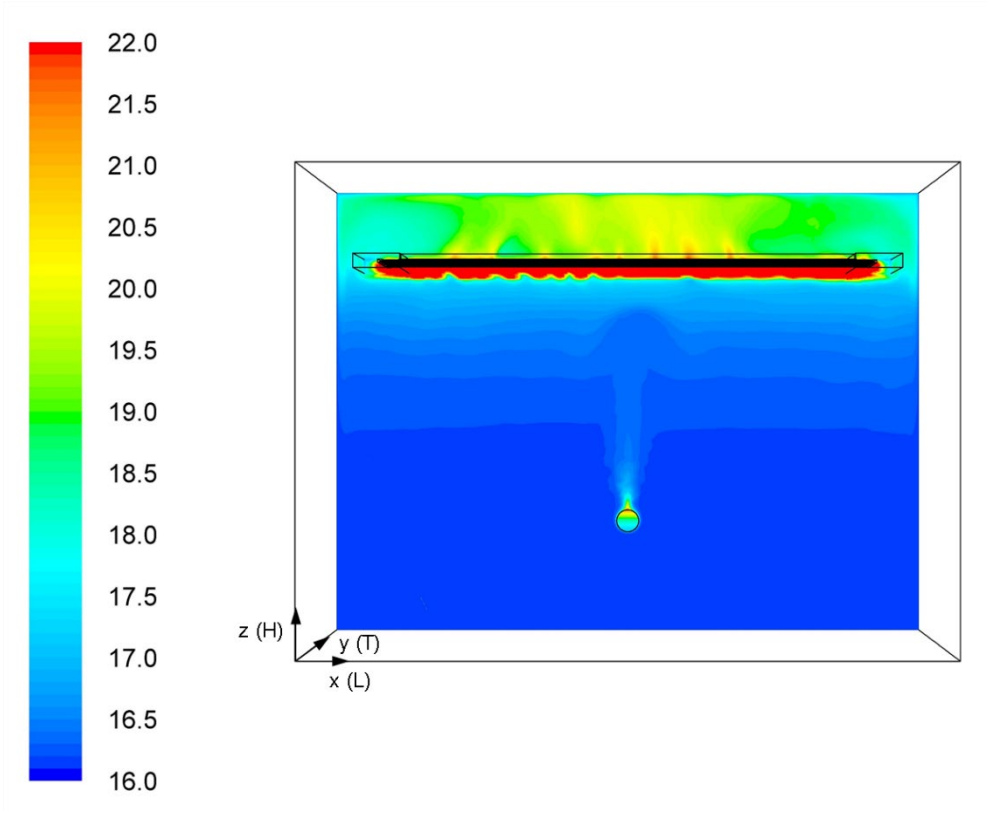



*Bild 8-9: Temperaturverteilung in der Ebene y = 2 m bei der Untersuchung von DSP (Typ 1200/16) mit Schürzen*

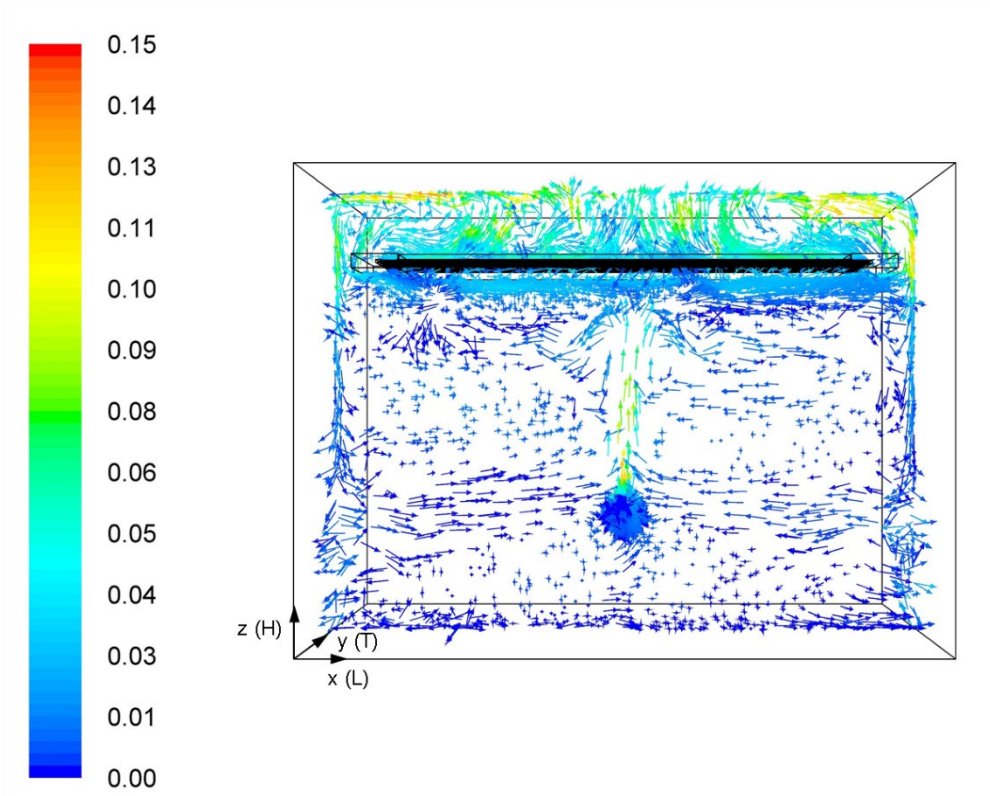



*Bild 8-10: Geschwindigkeitsverteilung in Vektordarstellung in der Ebene y = 2 m bei der Untersuchung von DSP (Typ 1200/16) mit Schürzen*

### 8.2.3 Deckenstrahlplatte vom Typ ZIP 840-12

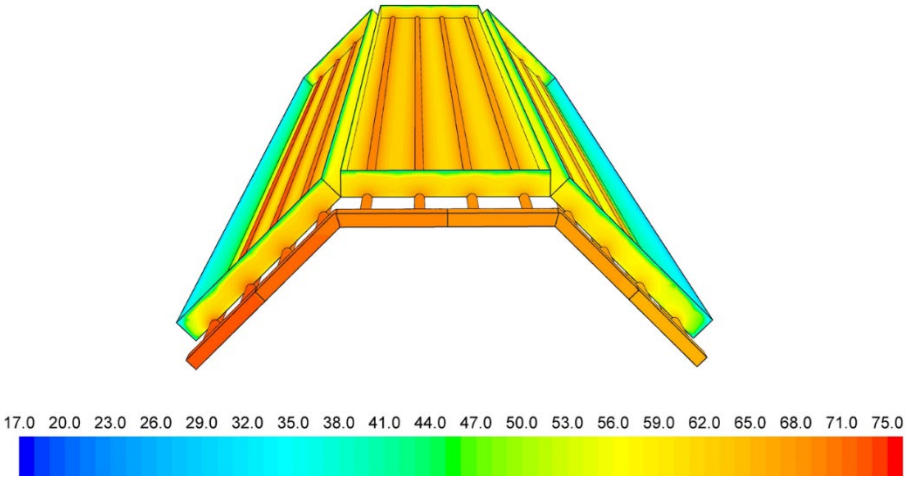



*Bild 8-11: Temperaturverteilung an Oberflächen der untersuchten DSP (ZIP 840-12) in einer Perspektiv-Ansicht auf der Umlenkseite*

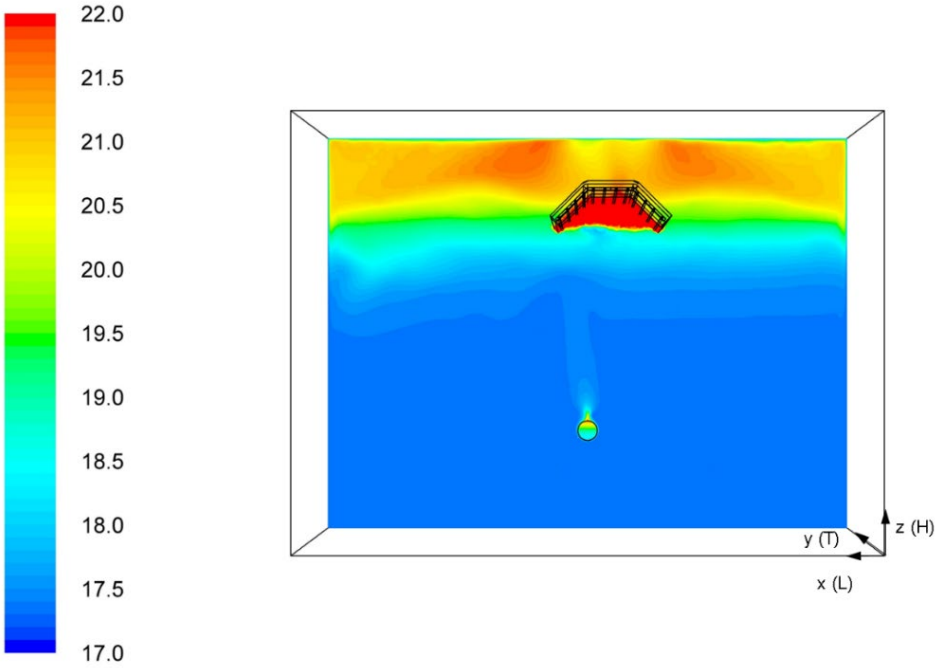



*Bild 8-12: Temperaturverteilung in der Ebene x = 2 m bei der Untersuchung von DSP (ZIP 840-12)*

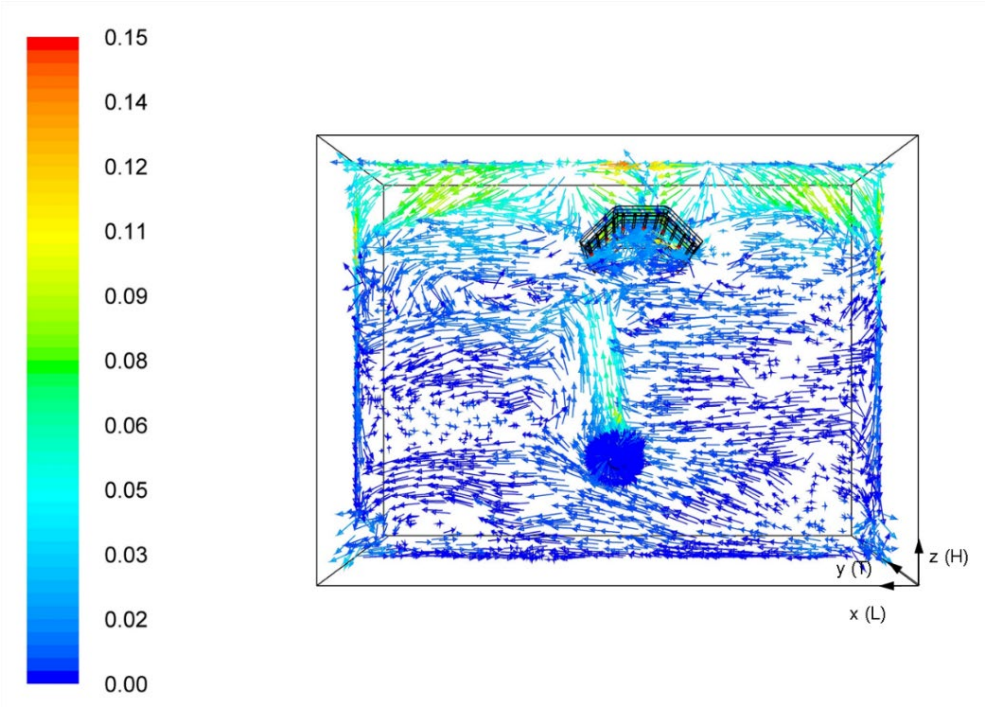



*Bild 8-13: Geschwindigkeitsverteilung in Vektordarstellung in der Ebene x = 2 m bei der Untersuchung von DSP (ZIP 840-12)*

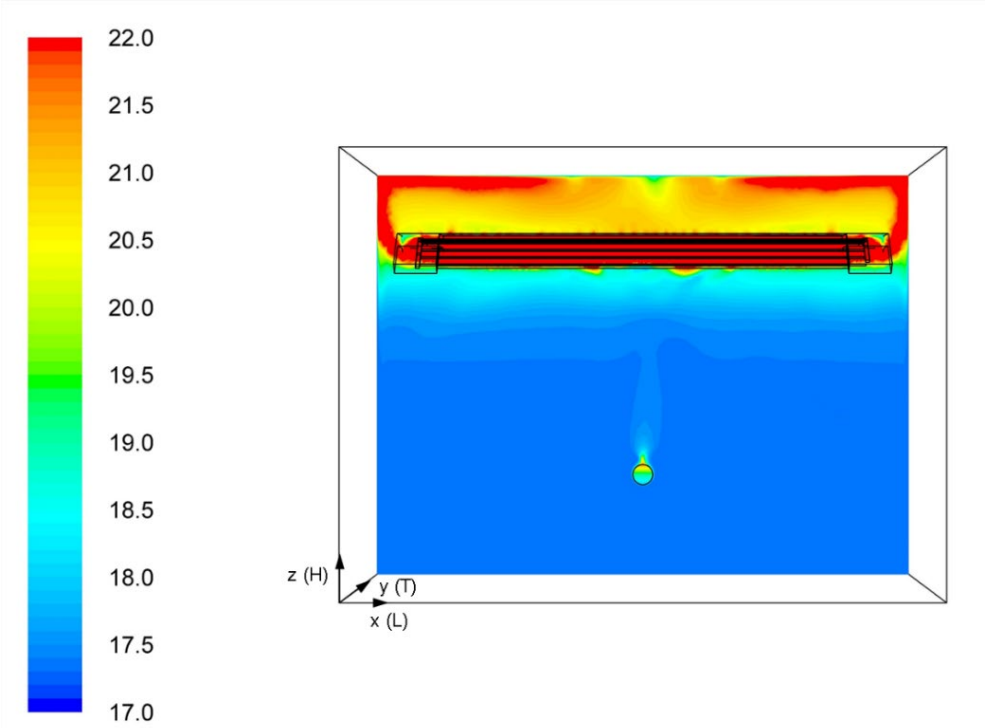



*Bild 8-14: Temperaturverteilung in der Ebene y = 2 m bei der Untersuchung von DSP (ZIP 840-12)*

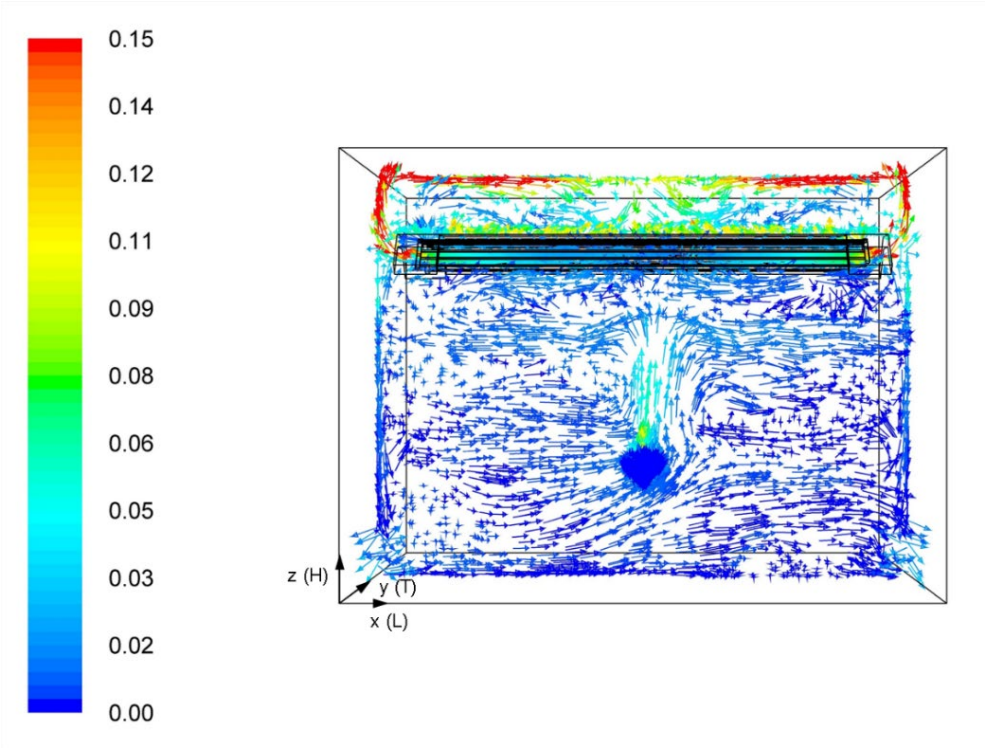



*Bild 8-15: Geschwindigkeitsverteilung in Vektordarstellung in der Ebene y = 2 m bei der Untersuchung von DSP (ZIP 840-12)*

## 8.3 Vergleich der Ergebnisse bei verschiedenen Schürzenhöhen

### 8.3.1 Deckenstrahlplatten vom Typ 1200 / 16 mit der Schürzenhöhe 25 mm

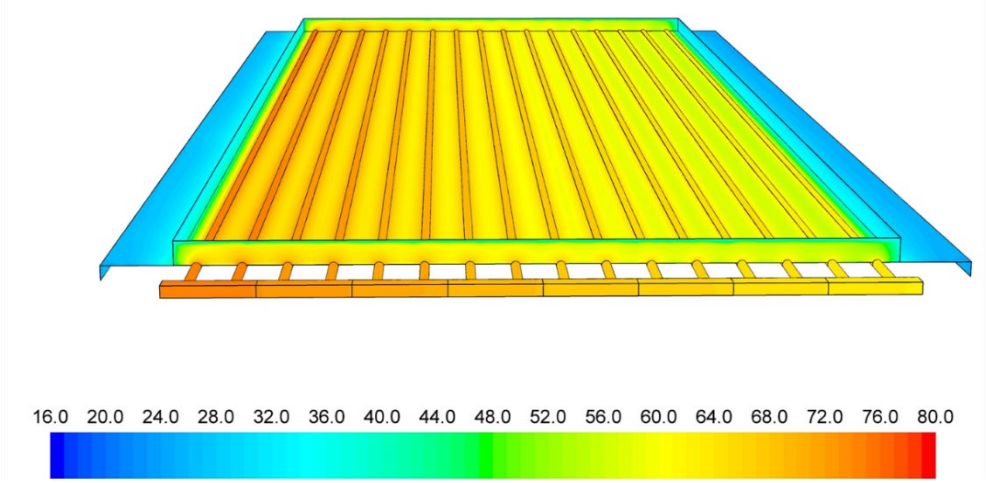



*Bild 8-16: Temperaturverteilung an den Oberflächen der untersuchten DSP (Typ 1200 / 16) mit Schürzen in einer Perspektiv-Ansicht auf der Umlenkseite*

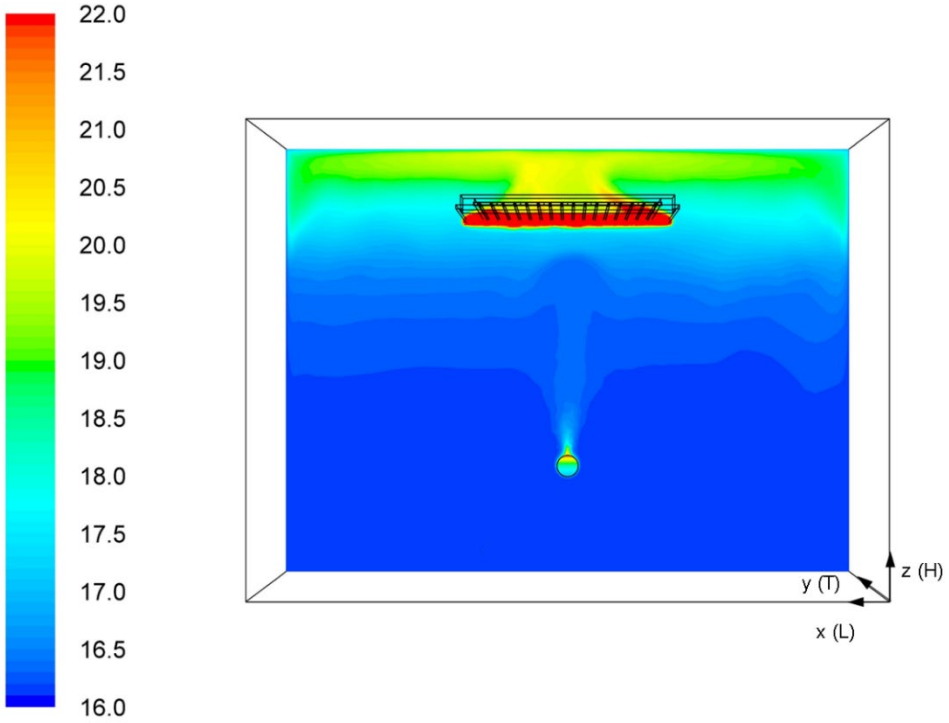



*Bild 8-17: Temperaturverteilung in der Ebene x = 2 m bei der Untersuchung von DSP (Typ 1200/16) mit Schürzen*

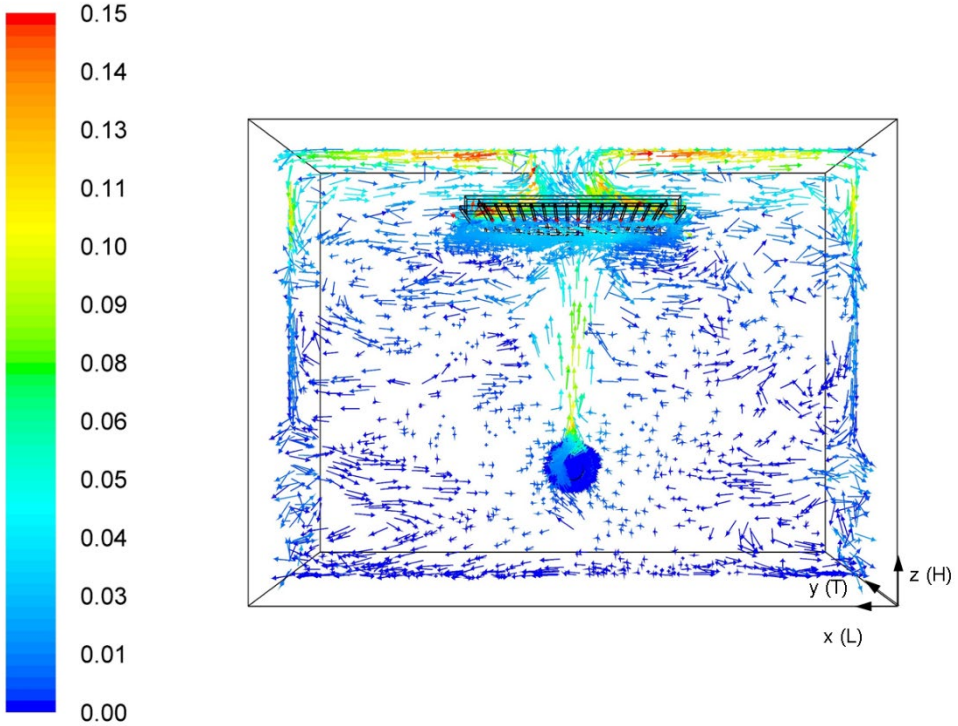



*Bild 8-18: Geschwindigkeitsverteilung in Vektordarstellung in der Ebene x = 2 m bei der Untersuchung von DSP (Typ 1200/16) mit Schürzen*

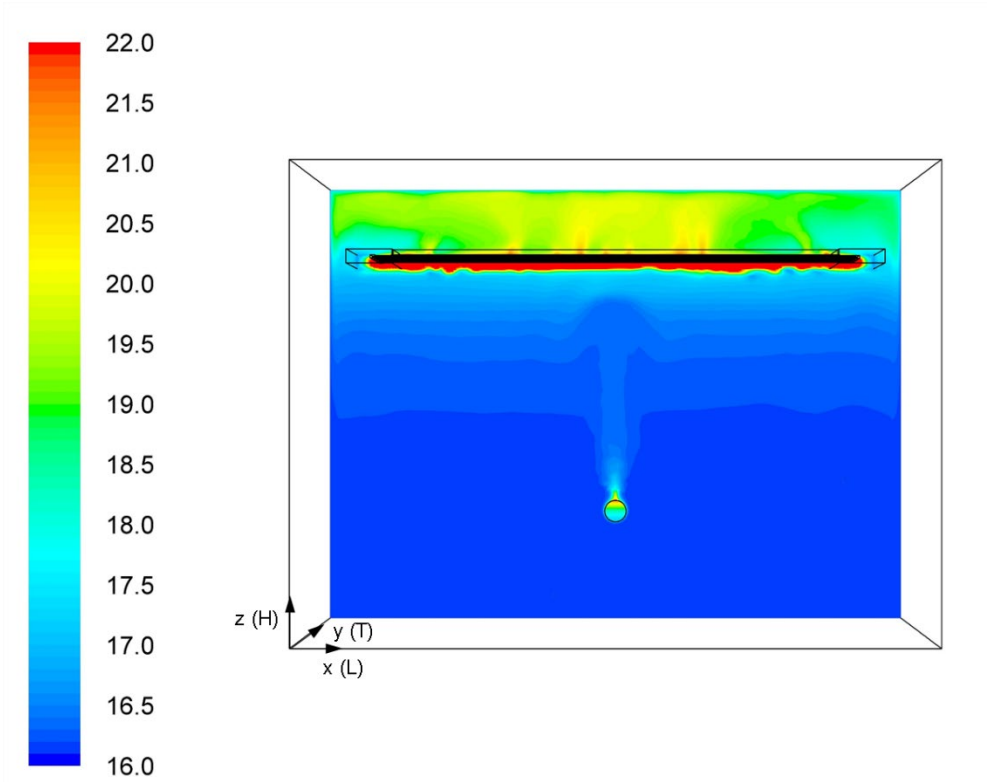



*Bild 8-19: Temperaturverteilung in der Ebene y = 2 m bei der Untersuchung von DSP (Typ 1200/16) mit Schürzen*

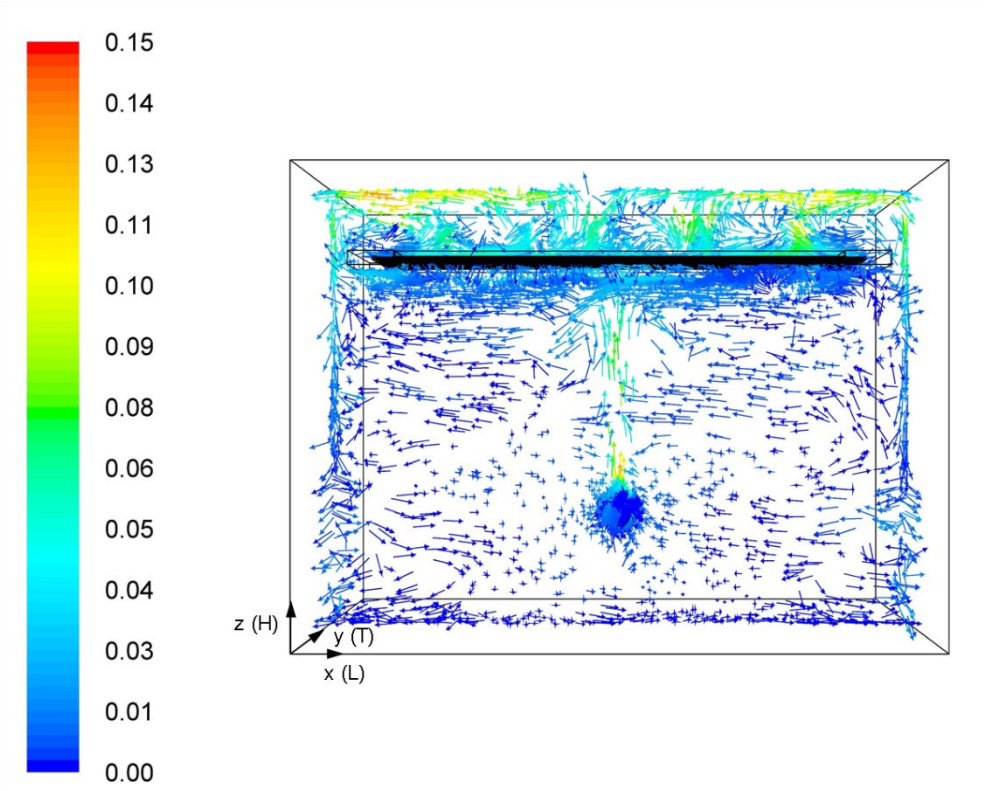



*Bild 8-20: Geschwindigkeitsverteilung in Vektordarstellung in der Ebene y = 2 m bei der Untersuchung von DSP (Typ 1200/16) mit Schürzen*

### 8.3.2 Deckenstrahlplatten vom Typ 1200 / 16 mit der Schürzenhöhe 100 mm

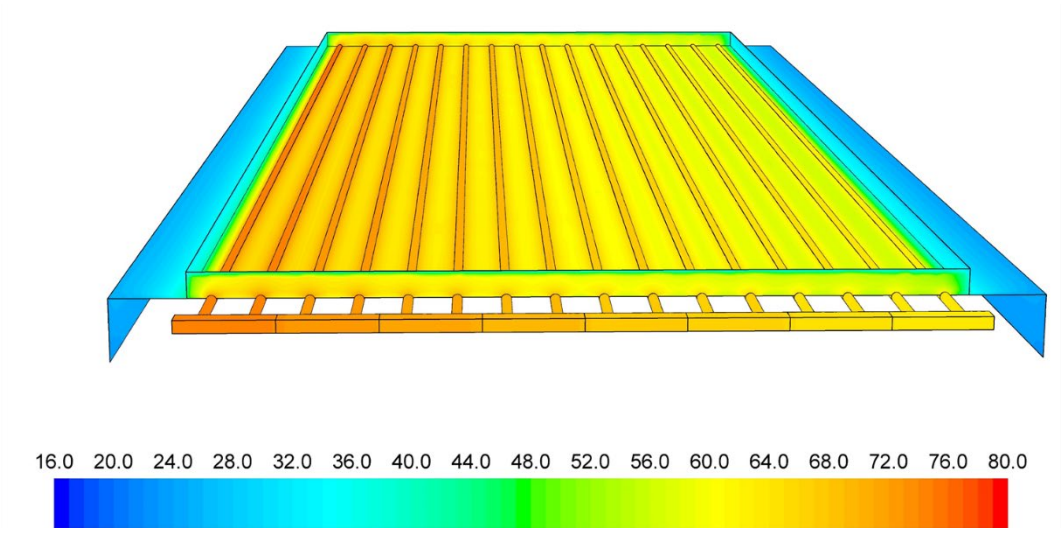



*Bild 8-21: Temperaturverteilung an den Oberflächen der untersuchten DSP (Typ 1200 / 16) mit Schürzen in einer Perspektiv-Ansicht auf der Umlenkseite*

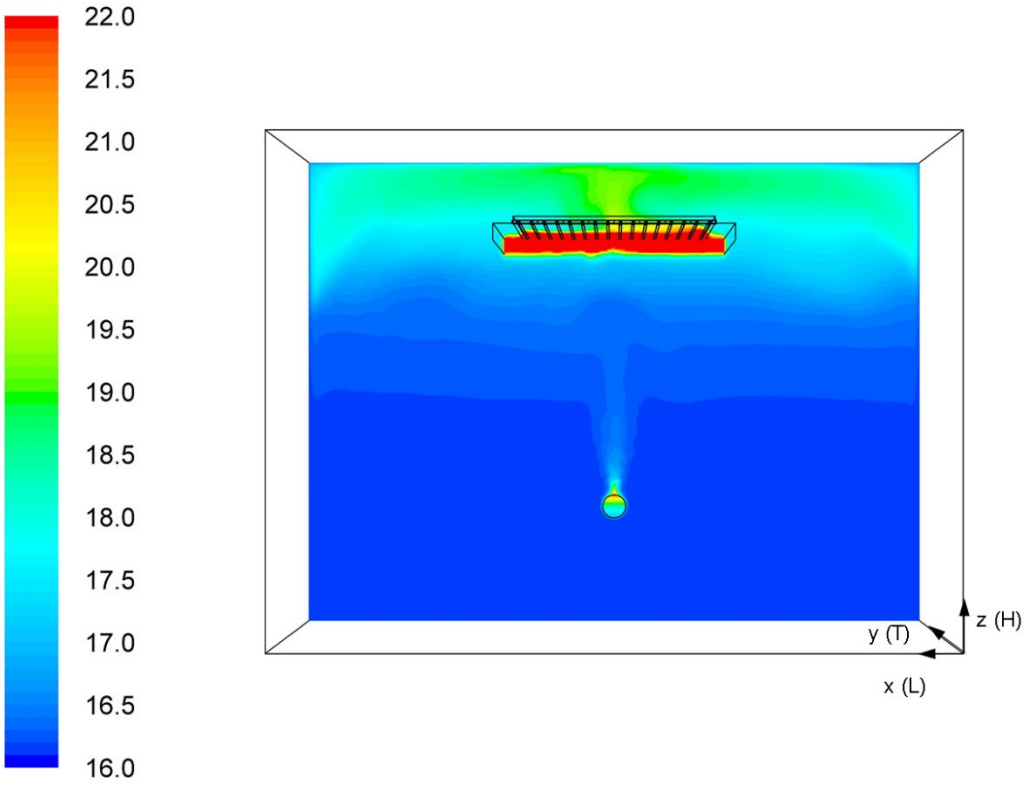



*Bild 8-22: Temperaturverteilung in der Ebene x = 2 m bei der Untersuchung von DSP (Typ 1200/16) mit Schürzen*

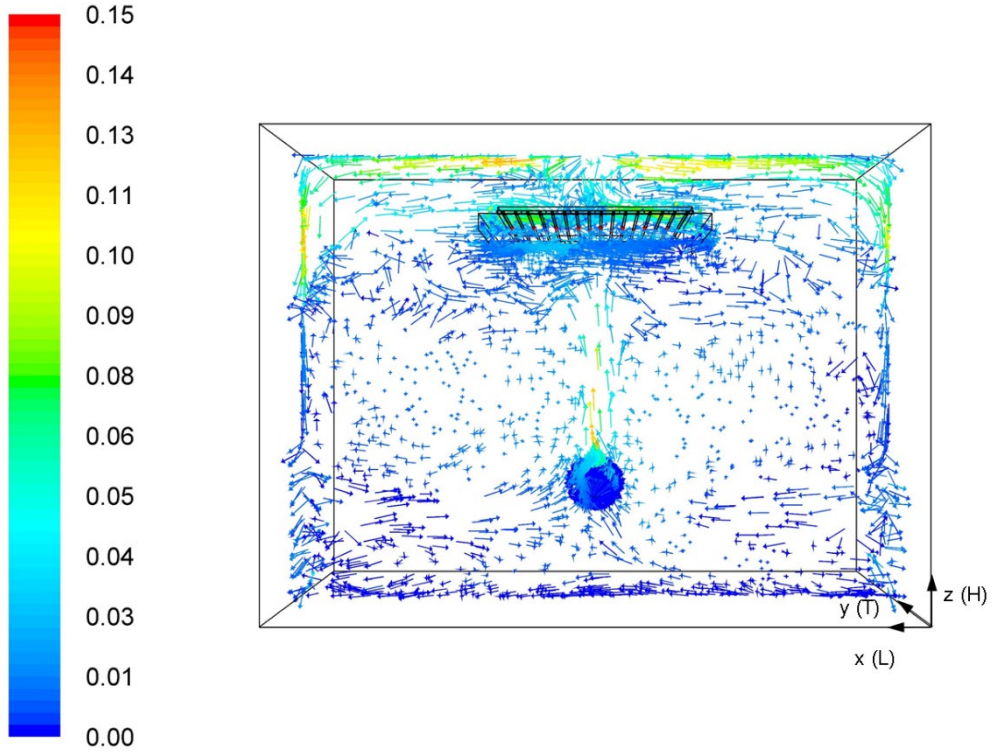



*Bild 8-23: Geschwindigkeitsverteilung in Vektordarstellung in der Ebene x = 2 m bei der Untersuchung von DSP (Typ 1200/16) mit Schürzen*

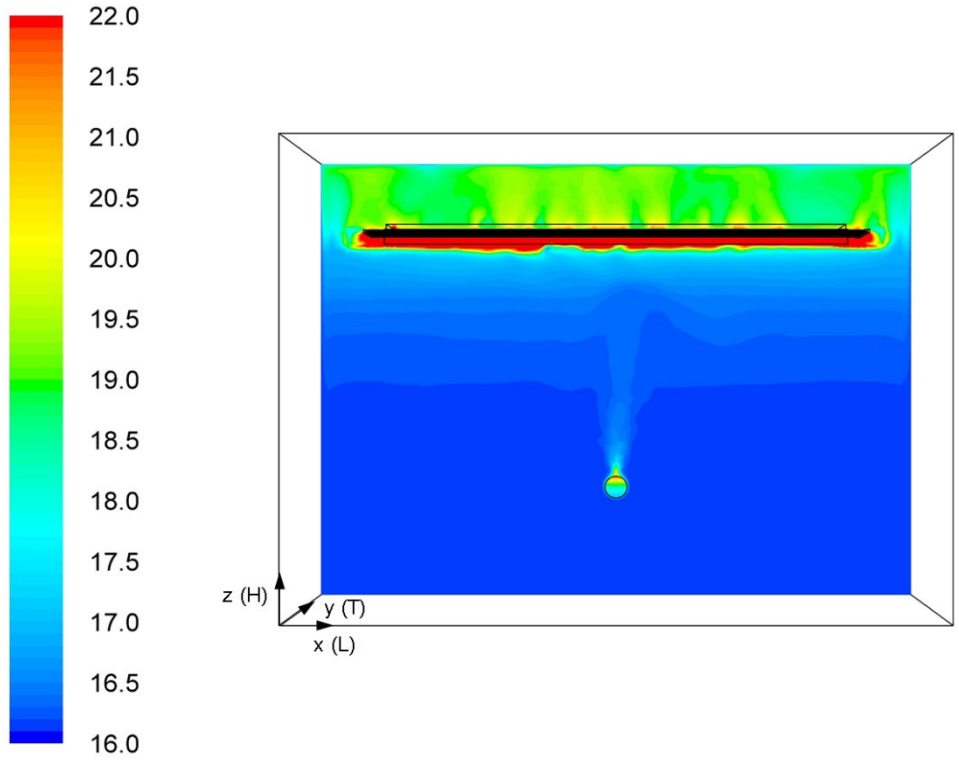



*Bild 8-24: Temperaturverteilung in der Ebene y = 2 m bei der Untersuchung von DSP (Typ 1200/16) mit Schürzen*

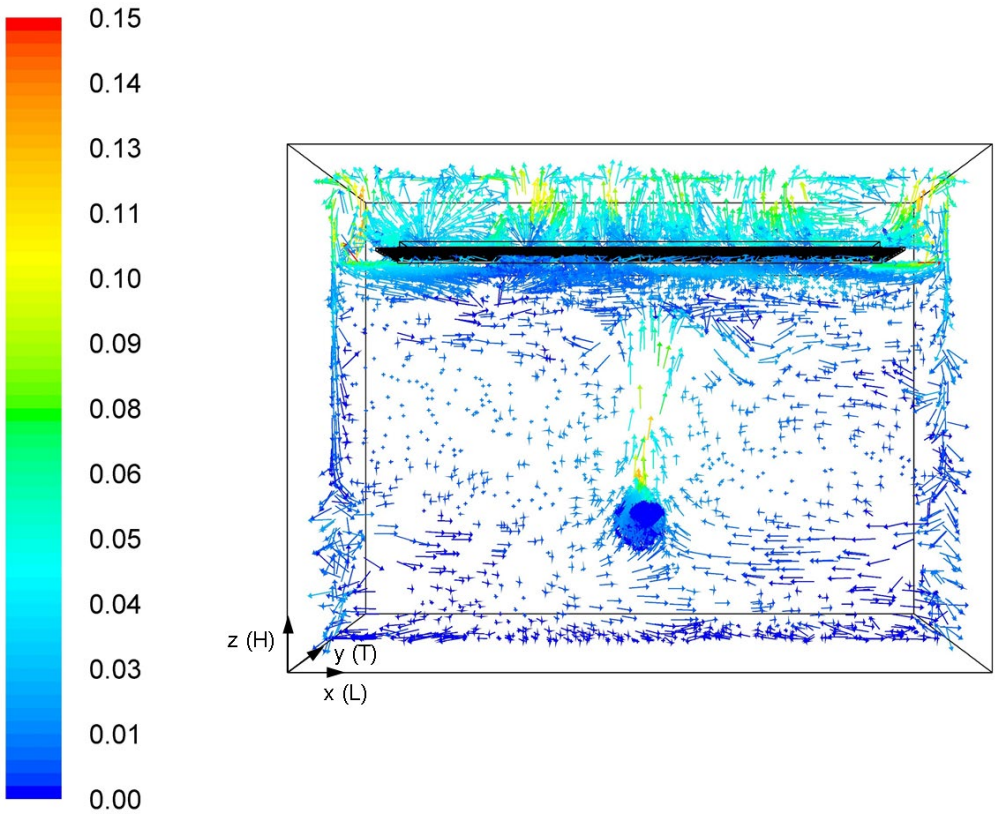



*Bild 8-25: Geschwindigkeitsverteilung in Vektordarstellung in der Ebene y = 2 m bei der Untersuchung von DSP (Typ 1200/16) mit Schürzen*