

# **Diffuse Deckenlüftung – Design-Guide für zementgebundene Holzwoleleichtbauplatten**

**Chen Zhang  
Tao Yu  
Per K. Heiselberg  
Michal Z. Pomianowski  
Peter V. Nielsen**

ISSN 1901-726X

Technischer Bericht des Fachbereichs Bauingenieurwesen  
Nr. 229



**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
AALBORG UNIVERSITY



Universität Aalborg  
Fachbereich Bauingenieurwesen  
Forschungsgruppe Raum- und Umweltplanung

**Technischer Bericht des Fachbereichs Bauingenieurwesen Nr. 229**

**Diffuse Deckenlüftung  
– Design-Guide für zementgebundene  
Holzwolleleichtbauplatten**

von

Chen Zhang  
Tao Yu  
Per K. Heiselberg  
Michal Z. Pomianowski  
Peter V. Nielsen

Februar 2017

© Universität Aalborg

## **Wissenschaftliche Publikationen im Fachbereich Bauingenieurwesen**

**Technische Berichte** werden für die zeitnahe Verbreitung von Forschungsergebnissen und wissenschaftlichen Arbeiten veröffentlicht, die im Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Aalborg erzielt bzw. erstellt wurden. Dieses Medium ermöglicht das Veröffentlichen von Erklärungen und Ergebnissen, die typischerweise detaillierter sind als diejenigen, die in Fachzeitschriften zulässig sind.

**Technische Denkschriften** werden erstellt, um die vorläufige Veröffentlichung von wissenschaftlichen Arbeiten durch das Personal des Fachbereichs Bauingenieurwesen zu ermöglichen, sofern diese als angemessen erachtet wird. Dokumente dieser Art können unvollständig sein oder es kann sich um vorübergehende Versionen oder Teile laufender Arbeiten handeln. Dies sollte berücksichtigt werden, wenn auf Publikationen dieser Art verwiesen wird.

**Vertragsberichte** werden erstellt, um über wissenschaftliche Arbeiten zu informieren, die im Rahmen eines Vertrags durchgeführt werden. Publikationen dieser Art enthalten vertrauliche Informationen und sind den Geldgebern sowie dem Fachbereich Bauingenieurwesen vorbehalten. Aus diesem Grund sind Vertragsberichte in der Regel nicht für den öffentlichen Umlauf verfügbar.

**Skripte** enthalten Materialien, die von Dozenten des Fachbereichs Bauingenieurwesen zu Bildungszwecken erstellt wurden. Dabei kann es sich um wissenschaftliche Aufzeichnungen, Vorlesungsbücher, Beispielaufgaben, Anleitungen für die Laborarbeit oder im Fachbereich Bauingenieurwesen entwickelte Computerprogramme handeln.

**Dissertationen** sind Monografien oder Sammlungen von Fachartikeln. Sie werden veröffentlicht, um über wissenschaftliche Arbeiten zu informieren, die im Rahmen einer Doktorarbeit (PhD oder Doctor of Technology) im Fachbereich Bauingenieurwesen erstellt wurden. Dissertationen sind nach der Verteidigung öffentlich zugänglich.

**Aktuelle Meldungen** werden veröffentlicht, um eine schnelle Übermittlung von Informationen über wissenschaftliche Arbeiten im Fachbereich Bauingenieurwesen zu ermöglichen. Dazu gehören der Stand von Forschungsprojekten, Entwicklungen in den Labors, Informationen über gemeinsame Arbeiten und aktuelle Forschungsergebnisse.

Veröffentlicht 2017 von  
Universität Aalborg  
Fachbereich Bauingenieurwesen  
Thomas Manns Vej 23  
DK-9220 Aalborg, Dänemark

Gedruckt in Aalborg an der Universität Aalborg

ISSN 1901-726X  
Technischer Bericht des Fachbereichs Bauingenieurwesen Nr. 229

## DANKSAGUNGEN

Diese Forschungsarbeit wurde im Rahmen des Projekts „Natural cooling and ventilation through diffuse ceiling supply and thermally activated building constructions“ erstellt, das von PSO (Projekt 345-061), WindowMaster A/S, Spaencom A/S, Trolldtekt A/S und der Universität Aalborg mitfinanziert wurde.

Besonderer Dank gebührt den folgenden an diesem Projekt beteiligten Personen:

- Kent Vium Pedersen, Trolldtekt
- Niels Kappel, Trolldtekt
- Jannick Roth, WindowMaster A/S
- Gitte Thorup Tranholm, WindowMaster A/S
- Tomas Plauska, Consolis
- Per Bachmann, Spaencom
- Kim Norrevang, Spaencom
- Per K. Heiselberg, Universität Aalborg
- Michal Z. Pomianowski, Universität Aalborg
- Peter V. Nielsen, Universität Aalborg
- Tao Yu, Universität Aalborg (Universität Jiaotong)

Chen Zhang  
Universität Aalborg

Februar 2017



# INHALT

1	Zweck dieses Design-Guides .....	1
2	Anlagenbeschreibung .....	1
2.1	Prinzipien.....	1
2.2	Einlass für die diffuse Deckenlüftung .....	3
2.3	Vorteile und Grenzen.....	4
3	Eigenschaften der diffusen Deckenlüftung.....	7
3.1	Luftströmungsprofil im Raum .....	7
3.2	Lüftungsanlagenlösungen und -eigenschaften.....	7
4	Wärmecomfort und Raumluftqualität .....	9
4.1	Zugluftrate .....	9
4.2	Temperaturgradient .....	10
4.3	Raumluftqualität .....	10
5	Energieverbrauch.....	10
5.1	Energie der Luftverteilung.....	10
5.2	Längerer Zeitraum der freien Kühlung.....	12
5.3	Nachtkühlstrategie.....	12
6	Auslegungsparameter .....	13
6.1	Öffnungsbereich der diffusen Deckenlüftung .....	13
6.2	Gestaltung des Hohlraums.....	14
6.2.1	Hohlraumeinlass .....	15
6.2.2	Hohlraumgeometrie.....	16
6.3	Wärmequellen.....	17
6.4	Raumhöhe.....	18
7	Anlagenleistung und Vergleich mit anderen Luftversorgungsanlagen.....	19
8	Integration in eine Heiz-/Kühlanlage .....	20
8.1	VAV-Anlagen.....	20
8.2	Gebläsekonvektor .....	21
9	Regelstrategien .....	22
9.1	Zulufitemperatur.....	22
9.2	Luftwechselrate .....	23
9.3	Druck .....	23
9.4	Feuchtigkeitsregelung.....	23
10	Fallstudie: Klassenraum mit diffuser Deckenlüftung.....	24





# 1 ZWECK DIESES DESIGN-GUIDES

Die diffuse Deckenlüftung ist ein neues Luftverteilungskonzept, bei dem der Bereich über einer abgehängten Decke als Hohlraum genutzt wird und Frischluft durch Perforierungen in den Deckenplatten in den Raum geleitet wird. Aufgrund des großen Versorgungsbereichs wird die Luft mit einer sehr geringen Geschwindigkeit und ohne feste Richtung in den Raum geleitet (daher auch der Namensteil „diffus“). Diese Lüftungsanlage kann eine hohe Kühlleistung erzielen, indem die Außenluft in vollem Umfang genutzt wird. Damit birgt sie großes Potenzial für kältere Klimazonen. Darüber hinaus nutzt diese Lüftungsanlage einen Deckenhohlraum, um Luft zu liefern. Dadurch ist im Vergleich zu kanalgebundenen Anlagen ein weitaus geringerer Druckabfall ausreichend. Seit Kurzem rückt die diffuse Deckenlüftung zunehmend in den Fokus für Anwendungen in Büros und Klassenräumen, in denen hohe Wärmelasten und ein großer Belüftungsbedarf gegeben sind.

Der Zweck dieses Design-Guides ist es, technische Unterstützung und Hilfe bei der Konstruktion einer Anlage für die diffuse Deckenlüftung zu bieten. Dies gilt insbesondere für Anlagen, in denen zementgebundene Holzwolleleichtbauplatten als Lufteinlass zum Einsatz kommen. Darüber hinaus werden die Prinzipien der Luftverteilung sowie die Vorteile und Grenzen der Anlage vorgestellt. Zudem werden wichtige Auslegungsparameter erläutert und ihre Auswirkungen auf die Anlagenleistung erörtert. Neben einer eigenständigen Lüftungsanlage wird auch die Integration einer Anlage für die diffuse Deckenlüftung in Heiz-/Kühlanlagen thematisiert. Zum Schluss veranschaulicht eine Fallstudie die Anwendung und das Konstruktionsverfahren der Lüftungsanlage.

Dieser Design-Guide wurde für Konstrukteure, Architekten und Hersteller von Anlagen für die diffuse Deckenlüftung erstellt.

## 2 ANLAGENBESCHREIBUNG

### 2.1 Prinzipien

Der Hauptzweck von Lüftungsanlagen in Gebäuden ist das Liefern von Frischluft für die anwesenden Personen und das Entfernen von Wärme, Gasen und Partikeln aus dem Gebäude. Neben diesen Grundanforderungen wird zunehmend auch auf die Konstruktion von Lüftungsanlagen geachtet, damit sie energieeffizienter arbeiten und in Bezug auf die Beheizung ein hohes Maß an Komfort bieten. Bei den am häufigsten in Gewerbegebäuden eingesetzten Lüftungskonzepten handelt es sich um die Misch- sowie um die Verdrängungslüftung (siehe Abbildung 1 (a) und (b)).

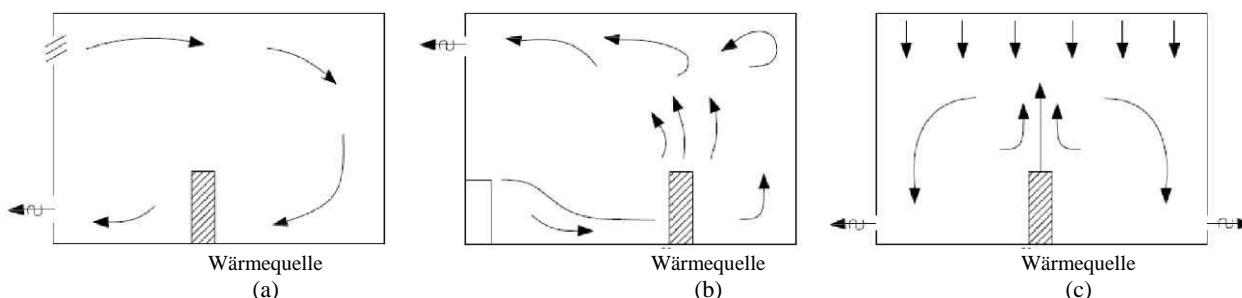


Abbildung 1: Drei verschiedene Luftverteilungsanlagen. (a) Mischlüftung, (b) Verdrängungslüftung, (c) diffuse Deckenlüftung [1]

Bei der Mischlüftung wird die Luft mit hoher Anfangsgeschwindigkeit in den Raum geleitet und es wird eine starke Verwirbelung erzeugt. Dies begünstigt in Räumen eine gute Vermischung der Luft sowie eine gleichmäßige Temperatur- und Schadstoffverteilung. Im Gegensatz dazu steht die Verdrängungslüftung, bei der die Luft ausgetauscht wird und sich Raum- und Frischluft nicht vermischen. Die kalte Frischluft wird dabei nah am Boden in den Raum geleitet. Diese Anlage nutzt Auftriebskräfte im Raum, die durch Wärmequellen erzeugt werden, um Schadstoffe und Wärme aus dem Raum zu entfernen.



Auf diese Weise ist die erreichte Luftqualität im Raum in der Regel höher als beim Einsatz einer Mischlüftung. Die höchste Geschwindigkeit und die niedrigste Temperatur treten jedoch in Bodennähe auf und es existieren im Raum vertikale Temperaturgradienten. Bei einem hohen Lüftungs- und Kaltluftbedarf würde beim Einsatz dieser beiden Lüftungsanlagen wahrscheinlich durch die hochkonzentrierte Zuluft ein Luftzug entstehen.



Abbildung 2: Anlage für die diffuse Deckenlüftung

Bei der diffusen Deckenlüftung wird ein Freiraum zwischen Deckenplatten und abgehängter Decke als Hohlraum verwendet, um klimatisierte Luft zu liefern (siehe Abbildung 2). Die Luft dringt durch die abgehängte Decke in den Raum. Die treibende Kraft hinter diesem Vorgang ist die Druckdifferenz zwischen Hohlraum und klimatisiertem Bereich. Dieses Konzept zeichnet sich durch die große abgehängte Decke aus, die als Luftverteiler verwendet wird. Die Luft gelangt mit sehr geringer Geschwindigkeit und keiner festen Richtung in den Raum. Daher entsteht durch diese Lüftungsanlage kein erheblicher Luftzug. Dies ist auch dann nicht der Fall, wenn Außenluft mit sehr geringer Temperatur direkt in den Raum geleitet wird. Die durch die Wärmequellen erzeugte Auftriebskraft stellt in Räumen mit diesem Anlagentyp die Kraft dar, die hauptsächlich für die Luftverteilung verantwortlich ist. Die nach oben gerichtete Auftriebsströmung interagiert mit dem nach unten gerichteten Zuluftstrom durch die Decke und erzeugt eine Luftrezirkulation im Raum. Die Auftriebsströmung bestimmt die Mischwirkung im Raum. Ein weiteres Merkmal der diffusen Deckenlüftung ist, dass anstatt eines Kanalsystems der Hohlraum zum Verteilen der Luft eingesetzt wird. Dadurch fallen die Druckverluste bei der Luftverteilung weitaus geringer aus als bei kanalgebundenen Anlagen. Darüber hinaus erfordern als Luftverteiler verwendete, abgehängte Decken durch den großen Öffnungsbereich einen deutlich geringeren Druckabfall als herkömmliche Luftverteiler. Der geringe Druckabfall der Anlage reduziert den Energieverbrauch des Lüfters und ermöglicht den Einsatz einer natürlichen Belüftung.

## 2.2 Einlass für die diffuse Deckenlüftung

Die Konstruktion des Einlasses für die diffuse Deckenlüftung, wie zum Beispiel Form und Werkstoff der Deckenplatten, Perforationsgrad, Deckenaufhängungen usw., hat erhebliche Auswirkungen auf die Leistung einer Lüftungsanlage. Abbildung 3 zeigt ein Beispiel, bei dem die abgehängte Decke aus passiven und aktiven zementgebundenen Holzwolleleichtbauplatten besteht. Die technischen Daten sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die aktiven Platten sind luftdurchlässig und machen in der Regel 10 bis 20 % der gesamten Decke aus. Die passiven Platten weisen eine Schicht aus undurchdringlicher Mineralwolle auf, die auf die Rückseite geklebt ist. Die Kombination aus aktiven und passiven Platten verbessert die akustischen Eigenschaften und ermöglicht es, die Verteilung der Zuluft im Raum zu steuern. Die Ergebnisse einer weiteren Untersuchung in Bezug auf die Auswirkungen des aktiven Bereichs auf die Anlagenleistung werden in Abschnitt 6.1 erläutert.

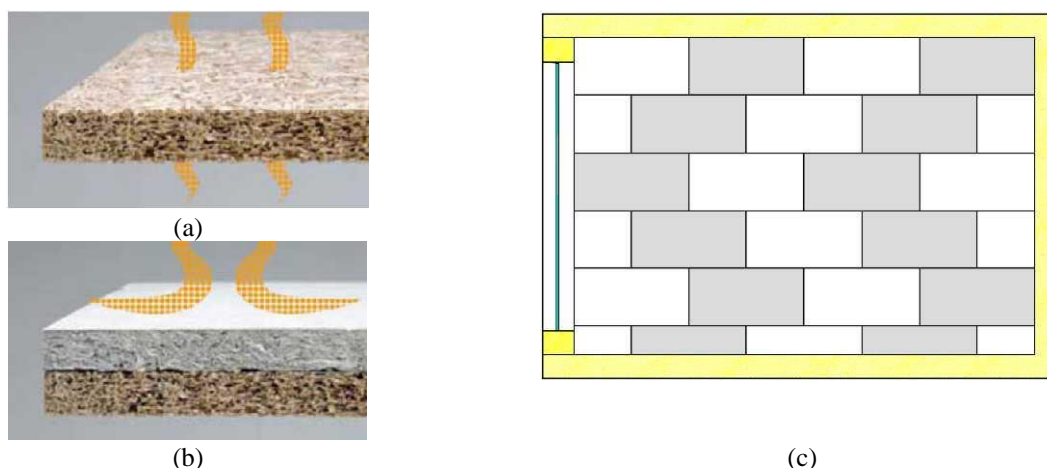


Abbildung 3: Eine Kombination aus passiven und aktiven Deckenplatten. (a) Aktive zementgebundene Holzwolleleichtbauplatte, (b) passive zementgebundene Holzwolleleichtbauplatte mit undurchdringlicher Schicht aus Mineralwolle, (c) Anordnung der Platten für die diffuse Deckenlüftung (grau = aktive Platten, weiß = passive Platten) [2]

Tabelle 1: Eigenschaften der aktiven und passiven Platten

Eigenschaften	Aktive Platte	Passive Platte
Stärke [mm]	25–35	50–60
Breite [mm]	600	600
Länge [mm]	600–1200	600–1200
Gewicht [kg/m <sup>2</sup> ]	9,7–12,0	11,7–14,0

## 2.3 Vorteile und Grenzen

### Vorteile

- Hoher Wärmekomfort

Wenn die Platten für die diffuse Deckenlüftung als Luftauslässe eingesetzt werden, können diese Anlagen für eine zugluftfreie Umgebung sorgen – selbst im Winter bei direkter Verwendung der Außenluft. Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass kein erheblicher Luftzug spürbar ist, auch dann nicht, wenn die Zulufttemperatur bis zu  $-6\text{ °C}$  beträgt [3][4]. Darüber hinaus sorgt die diffuse Deckenlüftung für eine gleichmäßige Temperaturverteilung in den Räumen. Bei der Kühlung ließ sich ein kleiner vertikaler Temperaturgradient von 0,2 bis 1 K/m erfassen, während bei der Beheizung ein Wert von bis zu 2,5 K/m auftrat [5][6][7]. Weitere Informationen zum Wärmekomfort sind in Abschnitt 4 enthalten.

- Energieeinsparung

Die diffuse Deckenlüftung bietet zahlreiche Möglichkeiten für Energieeinsparungen. So ermöglicht der geringe Druckabfall, der in Verbindung mit Deckenauslässen und der Luftverteilung über einen Hohlraum auftritt, eine Reduktion der Lüfterleistung und sogar eine natürliche Belüftung des Raums. Des Weiteren ist in Kombination mit der diffusen Deckenlüftung eine Nachtkühlung leicht realisierbar. Da die Deckenplatten in der Regel den Zuluftpfeifen in der Anlage ausgesetzt sind, erhöht sich die Effizienz der Wärmespeicherung und der Vorkühleffekt wird verbessert. Zudem kann der Energieverbrauch der Wärmerückgewinnungs- und der Vorwärmeinheit auf Null gesenkt werden, da die Anlage für eine zugluftfreie Umgebung sorgen kann, selbst wenn die kalte Außenluft direkt verwendet wird. Eine ausführliche Beschreibung zum Energieverbrauch ist in Abschnitt 5 enthalten.

- Hohe Kühlleistung

Anders als bei herkömmlichen Lüftungsanlagen stellen die Komfortanforderungen bei diffusen Deckenlüftungen keine starken Einschränkungen in Bezug auf die Zulufttemperatur und Luftwechselrate dar. Dadurch kann die Anlage eine hohe Wärmelast handhaben. Durch einen Vergleich verschiedener Lüftungsanlagen, die im gleichen Büroraum aufgestellt waren [8], wurde gezeigt, dass mit der diffusen Deckenlüftung die höchste Kühlleistung von  $72 \text{ W/m}^2$  erzielt werden konnte, während die Kühlleistung der Misch- und der Verdrängungslüftung 53 bzw.  $40 \text{ W/m}^2$  betrug. Die Anlagenleistung wird jedoch von mehreren Parametern beeinflusst. Neben dem Hohlraum und der Konfiguration der diffusen Deckenlüftung hat auch die Wärmequelle (Zustand) und der Raum (Geometrie) Einfluss. Wichtige Auslegungsparameter und ihre Auswirkungen sind in Abschnitt 6 angegeben.

- Niedrige Investitionskosten

Im Vergleich zu einer herkömmlichen Misch- oder Verdrängungslüftung sind die Investitionskosten für die diffuse Deckenlüftung niedrig. Dafür gibt es folgende Gründe. Die Platten der abgehängten Decke werden als Luftverteiler eingesetzt, obwohl sie ursprünglich für die Akustik vorgesehen waren. Daher fallen bei dieser Lüftungsanlage keine zusätzlichen Kosten für Luftverteiler an. Darüber hinaus sind für herkömmliche Lüftungsanlagen in der Regel zahlreiche Luftkanäle erforderlich. Die diffuse Deckenlüftung nutzt jedoch einen Hohlraum, um die Luft zu verteilen, wodurch die Kosten für ein Kanalsystem teilweise reduziert werden oder vollständig entfallen. Zudem kann die Höhe des Hohlraums reduziert werden, da keine Luftkanäle notwendig sind. Folglich lässt sich auch die Gesamthöhe des Gebäudes verringern, weshalb weitere Einsparungen möglich sind. Dank des niedrigen Luftzugrisikos ermöglicht es die diffuse Deckenlüftung auch, dass kalte Außenluft direkt in den Raum geleitet werden kann, ohne dass eine Vorwärmung erforderlich ist. Somit lassen sich erhebliche Kosteneinsparungen in Bezug auf die Vormwärm- oder Wärmerückgewinnungseinheit erzielen. Es wird geschätzt, dass mit einer Anlage für die diffuse Deckenlüftung im Vergleich zu einer herkömmlichen Lüftungsanlage und einer herkömmlichen Akustikdecke Kosteneinsparungen von 5 bis 10 % möglich sind.

- Niedriger Geräuschpegel

In Dänemark gelten für den Geräuschpegel rechtliche Anforderungen. Zum Beispiel ist bei Großraumbüros vorgeschrieben, dass 80 % der Decke von Akustik-Deckenplatten bedeckt sein muss. Für Klassenräume ist es jedoch oftmals erforderlich, dass die Decke vollständig mit Akustik-Deckenplatten bedeckt ist, um die Nachhallzeit zu begrenzen. Bei Anlagen für die diffuse Deckenlüftung macht die abgehängte Decke, die sowohl die Akustik als auch die Luftverteilung reguliert, einen Großteil der Decke oder sogar den ganzen Deckenbereich aus. Im Vergleich zu einer herkömmlichen Anlage mit Kanalsystem erzeugt die diffuse Deckenlüftung durch die minimale Verwendung von Luftkanälen weitaus weniger Geräusche. Durch diese Reduktion der HLK-Hintergrundgeräusche kann ein besseres Arbeits- oder Lernumfeld geschaffen werden.

- Einfache Montage

Der Montageaufwand für das Kanalsystem und die Luftverteiler wird durch den Einsatz einer diffusen Deckenlüftung erheblich reduziert. Darüber hinaus gestaltet sich die Montage deutlich einfacher und schneller, da keine oder nur sehr wenige Luftkanäle und andere Vorrichtungen im Hohlraum vorhanden sind.

## Grenzen

- Risiko der Kondenswasserbildung

Laut früheren Studien weisen die Platten für die diffuse Deckenlüftung eine niedrigere Oberflächentemperatur als die restlichen Raumboflächen auf, wenn sie aus einem Werkstoff mit hoher

Wärmeleitfähigkeit (z. B. Aluminium) gefertigt sind. Daher birgt diese Technologie das Risiko, dass sich Kondenswasser bildet. Die Kondensation von Feuchtigkeit beeinträchtigt die visuelle Wahrnehmung und Funktion. Des Weiteren sammeln sich auf der Deckenoberfläche nasser Schmutz und Mikroorganismen an, sodass sich Krankheitserreger vermehren und Wasser von den Decken tropft (Büroregen). Das Risiko der Kondenswasserbildung kann sich bei einer Rückströmung noch weiter erhöhen, bei der der Luftstrom mit hoher Feuchtigkeit und Temperatur aus dem Raum zurückgedrängt wird, sodass er auf der Rückseite der Platten der abgehängten Decke kondensiert. Die Kondensation kann zu einem frühzeitigen Versagen der Deckenplatten führen.

Das Risiko lässt sich minimieren, indem für die diffuse Deckenlüftung geeignete Platten und ein geeignetes Aufhängeprofil ausgewählt werden. Zum Beispiel kann das Risiko der Kondenswasserbildung beim Verwenden einer Anlage mit zementgebundenen Holzwolleleichtbauplatten und einem Gittersystem mit T- oder C-Profilen gesenkt werden, da die Platten als Wärmedämmung zwischen Hohlraum und klimatisiertem Bereich fungieren. Darüber hinaus sind die Platten aus einem Werkstoff mit hohem Absorptionsvermögen gefertigt. Sie können als Feuchtigkeitsspeicher fungieren und die relative Feuchtigkeit in Räumen stabilisieren, in denen das Feuchtigkeitsniveau bis zu  $3 \text{ kg/m}^2$  beträgt.

- Raumgeometrie

Die Leistung von Anlagen für die diffuse Deckenlüftung hängt von der Raumgeometrie ab. Es wird empfohlen, dass dieses Lüftungskonzept in einem Raum mit einer typischen Höhe (weniger als 3 m) verwendet wird, um das Risiko eines Luftzugs zu vermeiden. Für weitere Informationen siehe Abschnitt 6.4.

Die Fläche des Raums ist ein weiterer wichtiger Parameter. Bei einer größeren Raumfläche kann verstärkt eine ungleichmäßige Luftverteilung durch die Deckenplatten auftreten, was wiederum zu Problemen bei Wärmekomfort und Luftqualität führt. Beträgt die Raumfläche mehr als 150 bis 200  $\text{m}^2$ , wird empfohlen, die Luftverteilung gleichmäßig zu gestalten. Dafür können Deckenplatten mit einer höheren Druckbeständigkeit verwendet und/oder die Konfiguration des Hohlraumeinlasses optimiert werden (z. B. mehrere Hohlraumeinlässe oder ein perforierter Luftkanal zum Verteilen der Luft im Hohlraum).

Zudem sollte in der Konstruktionsphase eine Mindesthöhe für den Hohlraum festgelegt werden, bei der eine akzeptable Luftverteilung durch den Hohlraum erreicht wird. Bei einer natürlichen Belüftung oder wenn nur ein Hohlraumeinlass in einer Raumecke vorhanden ist, ist ein Hohlraum von mindestens 20 cm Höhe erforderlich. Eine ausführliche Beschreibung der Hohlraumkonfiguration ist in Abschnitt 6.2 enthalten.

### 3 EIGENSCHAFTEN DER DIFFUSEN DECKENLÜFTUNG

#### 3.1 Luftströmungsprofil im Raum

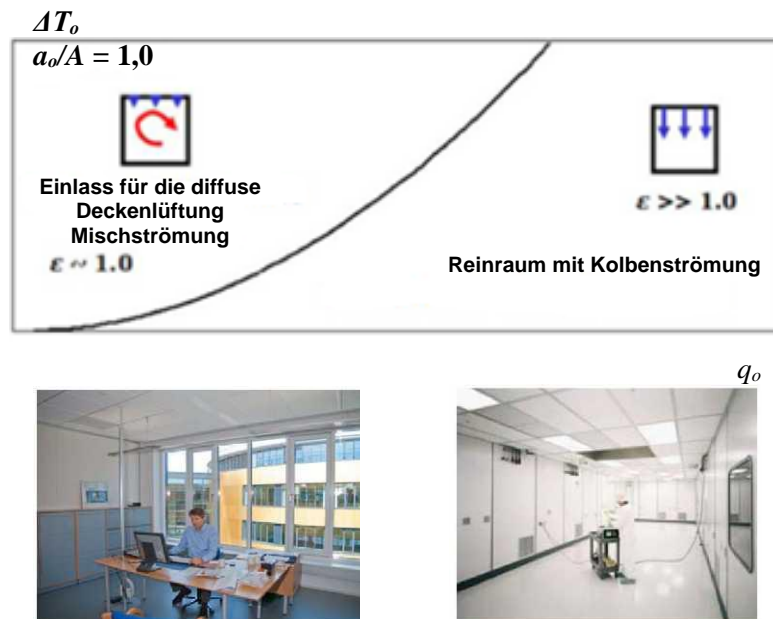


Abbildung 4:  $q$ - $\Delta T$ -Diagramm der diffusen Deckenlüftung, zwei Anwendungsbeispiele: Büro und Reinraum [9]

Die diffuse Deckenlüftung wird auch als Belüftung mit nach unten gerichtetem Luftstrom bezeichnet. Die Luftströmungsprofile in Räumen mit diffuser Deckenlüftung können je nach Luftwechselrate entweder über die Auftriebsströmung von Wärmequellen oder über die Eigendynamik der Luftzufuhr geregelt werden (siehe Abbildung 4).

Wird das Luftströmungsprofil durch die Luftstromdynamik geregelt, ist eine hohe Luftwechselrate (50 bis  $100 \text{ h}^{-1}$ ) erforderlich, wenn eine Kolbenströmung vorliegt. Dieses Luftverteilungskonzept wird vor allem in Reinräumen eingesetzt, in denen eine hohe Lüftungseffektivität erwartet wird. In diesem Fall sind niedrig angeordnete Rückströmungsöffnungen notwendig.

Wenn die Luftwechselrate 1 bis  $5 \text{ h}^{-1}$  beträgt, wird das Luftströmungsprofil im Raum über eine Auftriebsströmung geregelt. Die Lüftungseffektivität beträgt dann nahezu 1, was einer Mischströmung entspricht. Dieses Luftverteilungskonzept eignet sich für Gebäude mit hohem Kühl- und Wärmekomfortbedarf, wie Bürogebäude oder Schulen. Für die Rückströmungsöffnung wird dabei keine bestimmte Stelle vorgeschrieben. In diesem Design-Guide steht besonders das Luftströmungsprofil im Fokus, das durch Auftriebskräfte bestimmt wird, da es ein großes Anwendungspotenzial bietet.

#### 3.2 Lüftungsanlagenlösungen und -eigenschaften

Eine Lüftungsanlagenlösung ist oftmals das Ergebnis eines umfassenden Entscheidungsprozesses, bei dem das Außen- und das Raumklima, der Energieverbrauch, die Gesamtkosten, die Gebäudegestaltung, die Gebäudefunktion und die Benutzeranforderungen berücksichtigt wurden. In diesem Abschnitt werden verschiedene Anlagenlösungen mit einem Einlass für die diffuse Lüftung beschrieben sowie ihre Eigenschaften ausgewertet.

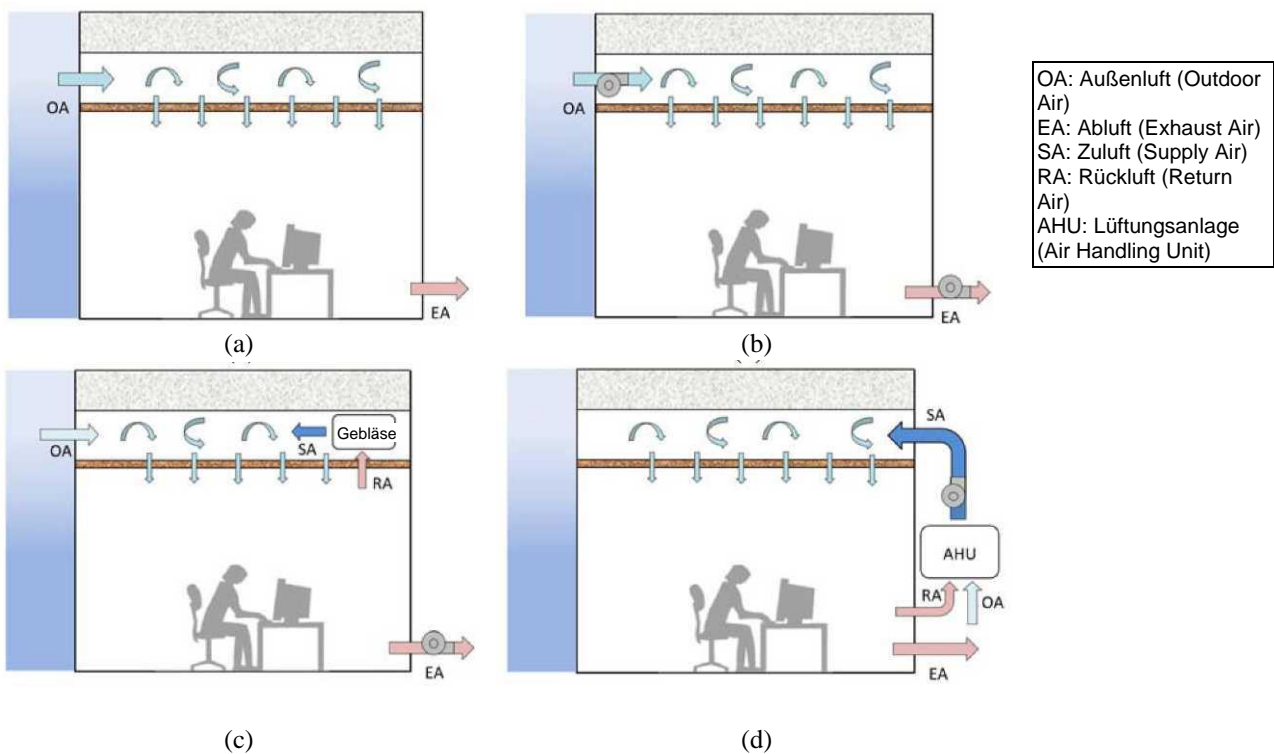


Abbildung 5: Schematische Darstellung verschiedener Lüftungsstrategien. (a) Natürliche Belüftung, (b) mechanische Lüftung, (c) hybride Lüftung mit Gebläsekonvektor, (d) Voll-kli-ma-ti-sie-rung

- Natürliche Belüftung:** Die natürliche Belüftung kann Frischluft liefern, um Luftqualitätsanforderungen zu erfüllen und bei Bedarf den Raum zu kühlen. Die Einsatzmöglichkeiten der natürlichen Belüftung sind jedoch im Winter und zum Teil in den Übergangphasen davor und danach begrenzt, da der Wärmekomfort dann eine wichtige Rolle spielt. Dieses Problem kann mit einer Anlage für die diffuse Deckenlüftung gelöst werden, da diese Anlage für eine zugluftfreie Umgebung sorgen kann, selbst wenn kühle Außenluft direkt in den Raum geleitet wird. Ein weiterer Vorteil der diffusen Deckenlüftung besteht darin, dass ein geringer Druckabfall auftritt, der eine natürliche Verteilung der Luft ermöglicht. Die wichtigsten Aspekte bei der natürlichen Belüftung sind das Optimieren des Einsatzes der Antriebskräfte und das Minimieren des Druckverlustes der Anlage: z. B. maximale Ausnutzung der Windverhältnisse am Gebäudestandort, optimale Konstruktion des Einlasses (Größe und Stelle), sorgfältige Beurteilung der Raumgeometrie (beengte Platzverhältnisse vermeiden). In der Regel sollte der Druckverlust einer Anlage für die natürliche Belüftung weniger als 10 Pa betragen. Die Wärmezunahme ist ein weiterer wichtiger Faktor für den Erfolg der Lüftungsstrategie. Wenn die Wärmezunahme über 30 bis 40 W/m<sup>2</sup> beträgt, sollte eine sorgfältige Beurteilung vorgenommen werden, bevor eine natürliche Belüftung eingesetzt wird (z. B. Solarsteuerung, abgegebene Wärme, Lüftung über Nachtkühlung). Ggf. kann sich eine hybride Lüftung (Mischmodus) anbieten.
- Mechanische Lüftung:** Die mechanische Lüftung löst Probleme, die im Zusammenhang mit der natürlichen Belüftung stehen. Für sie sind kleinere Einlassöffnungen möglich und es gelten keine bestimmten Raumanforderungen. Darüber hinaus ist es einfacher, die Schallabsorption und Luftfiltration zu integrieren und zu regeln. Soll die mechanische Lüftung zu Kühlzwecken eingesetzt werden, muss jedoch sorgfältig abgewägt werden, ob der durch den Lufttransport erzeugte Energieverbrauch mitunter größer ist als die gelieferte Kühlenergie. Noch schlechter wäre es, wenn die Arbeitsenergie die Temperatur der Außenluft erhöht, wodurch sich das Gebäude aufwärmt [10]. Aus diesem Grund sollte in der Konstruktionsphase auf das Verhältnis zwischen Außenlufttemperatur und COP (Coefficient of Performance) des Lüfters geachtet werden.
- Hybride Lüftung (Lüftung mit Mischmodus):** Anlagen der hybriden Lüftung nutzen sowohl natürliche Antriebskräfte als auch mechanische Systeme, um ein behagliches Raumklima zu schaffen. Bei der



hybriden Lüftung werden mechanische und natürliche Kräfte in einem Zwei-Modus-System kombiniert, bei dem die Betriebsart je nach Jahreszeit und Wochentag variiert. Somit hängt der aktive Modus von der Außenumgebung ab und die Umgebungsbedingungen werden zu jeder Zeit bestmöglich ausgenutzt. Der Hauptunterschied zwischen einer herkömmlichen Lüftungsanlage und einer Hybridanlage liegt darin, dass die Hybridanlage ein intelligentes Regelungssystem erfordert, das automatisch zwischen der natürlichen Belüftung und der mechanische Lüftung umschaltet, um den Energieverbrauch zu reduzieren.

Die mechanische Kühlung wird nur eingesetzt, wenn die natürlichen Antriebskräfte unzureichend sind. Die Kühlanlage kann je nach Wärmeaustauschmechanismus in zwei Kategorien eingeteilt werden: luftgestützte und Strahlungsanlage. Ein Gebläsekonvektor ist ein typisches Beispiel für eine luftgestützte Anlage (Abbildung 5 (c)).

- **Voll-klimatisierung:** Eine Vollklimaanlage nutzt eine zentrale Lüftungseinheit, um die Luft auf eine gewünschte Temperatur mit einem gewünschten Feuchtigkeitsgehalt zu bringen. Dann transportiert sie die klimatisierte Luft mithilfe eines Lüfters in jeden Raum. Die Raumtemperatur kann durch das Verändern der Zulufttemperatur mit einem konstanten Luftstrom (CAV) oder durch Verändern des Luftstroms mit einer konstanten Zulufttemperatur (VAV) geregelt werden. Durch die Integration einer Vollklimaanlage in eine Konstruktion können oftmals zusätzliche Kosten in Höhe von 50 % der Betriebskosten des Gebäudes [11] entstehen. Zugleich erhöhen sich auch die Umweltemissionen und die Wartungskosten erheblich. Daher sollte dies nach Möglichkeit vermieden werden.

Es ist zu beachten, dass nicht in allen Teilen eines Gebäudes genau die gleichen Anforderungen gelten. So können in verschiedenen Gebäudeteilen oder zu unterschiedlichen Zeiten verschiedene Lüftungslösungen eingesetzt werden.

## 4 WÄRMEKOMFORT UND RAUMLUFTQUALITÄT

### 4.1 Zugluft

Ein Luftzug führt durch Luftbewegung zu einer unerwünschten Kühlung des Körpers. Er stellt bei belüfteten oder klimatisierten Gebäude die häufigste Beschwerdeursache dar. Wenn die Decke für die diffuse Lüftung als Luftauslass eingesetzt wird, können diese Anlagen für eine zugluftfreie Umgebung sorgen, auch wenn eine niedrige Zulufttemperatur auftritt [6][8][12].

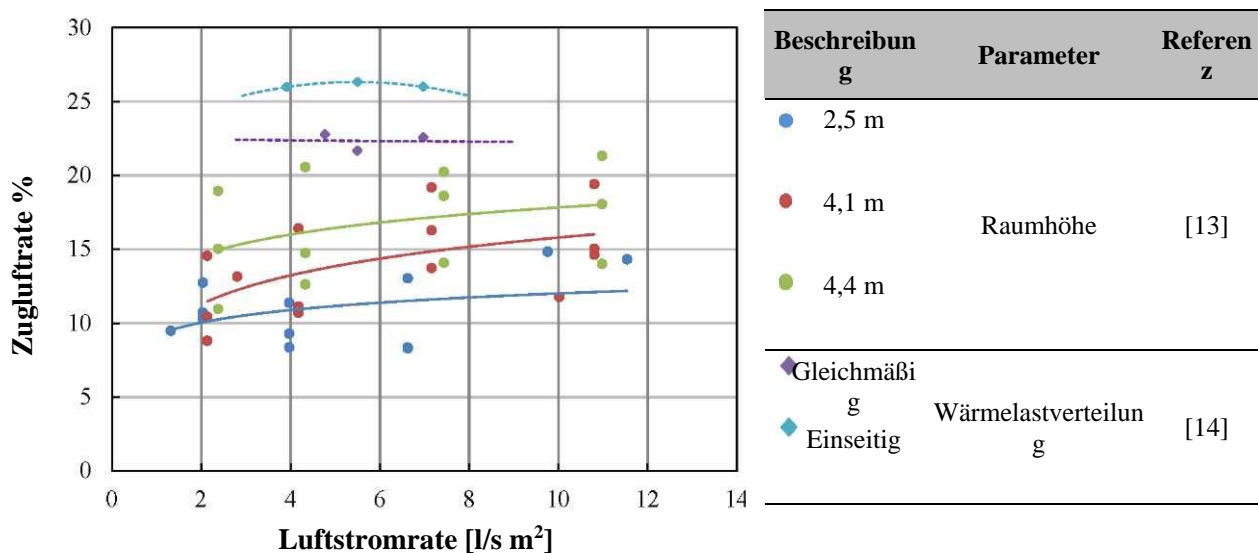


Abbildung 6: Zugluft im Verhältnis zur Luftstromrate bei verschiedenen Auslegungsparametern

Obwohl bei einer Anlage für die diffuse Deckenlüftung im Vergleich zu einer herkömmlichen Lüftungsanlage ein geringeres Zugluftrisiko auftritt, sollten einige wichtige Parameter in der Konstruktionsphase sorgfältig analysiert werden, um dieses Risiko zu vermeiden. Abbildung 6 zeigt das Verhältnis zwischen Zugluftrate und zwei Auslegungsparametern: Raumhöhe und Wärmelastverteilung. Wenn man die Zugluftrate in den drei Räumen mit unterschiedlichen Höhen (2,5 m, 4,1 m und 4,4 m) vergleicht, lässt sich schlussfolgern, dass eine höhere Raumhöhe zu einer höheren Zugluftrate führt. Gleichzeitig führen die Wärmelasten, die nur auf einer Seite eines Raums auftreten, zu einer höheren Zugluftrate als gleichmäßig verteilte Wärmelasten. Es muss beachtet werden, dass die in Referenz [14] dargestellten Zugluftraten höher sind als diejenigen in Praxisfällen. Dies liegt an der sehr hohen Wärmelast von  $72 \text{ W/m}^2$ . Die Zugluftrate hängt auch von der Konfiguration der diffusen Deckenlüftung, des Hohlraums usw. ab. Eine detaillierte Erörterung der Auswirkungen von verschiedenen Auslegungsparametern ist in Abschnitt 6 enthalten.

## 4.2 Temperaturgradient

Eine Temperaturschichtung führt dazu, dass die Lufttemperatur auf Kopfhöhe höher ist als auf Fußhöhe. Dieser Temperaturunterschied kann als unangenehm empfunden werden. Um ein Unbehagen zu vermeiden, muss der Temperaturunterschied zwischen Kopf- und Fußhöhe (0,1 bis 1,1 m oberhalb des Bodens) für Kategorie B weniger als  $3 \text{ °C}$  betragen [15].

Die diffuse Deckenlüftung kann ein gutes Mischverhältnis von Zu- und Raumluft erzielen und erzeugt bei der Kühlung einen niedrigen vertikalen Temperaturgradienten ( $< 1 \text{ °C/m}$ ). Bei der Beheizung kann dagegen eine Temperaturschichtung auftreten, bei der der Temperaturgradient über  $2 \text{ °C/m}$  betragen kann. Eine Beheizung ist jedoch in der Regel erforderlich, wenn Personen außer Haus sind oder es ist eine Vorwärmung nötig, die eine bis zwei Stunden vor dem Eintreffen der Personen einsetzt. Aus diesem Grund wird ein durch einen Temperaturgradienten verursachtes Unbehagen in diesem Szenario nicht das größte Problem darstellen.

## 4.3 Raumluftqualität

Zu den Parametern für die Beurteilung der Raumluftqualität gehören die Lüftungs- und die Luftwechseleffektivität. Wenn Luft und Schadstoffe komplett vermischt werden, beträgt die Lüftungseffektivität = 1. Die Lüftungseffektivität der diffusen Deckenlüftung kann mithilfe von Spurengasmessungen [6] analysiert werden. Es wurde festgestellt, dass die Lüftungseffektivität der diffusen Deckenlüftung im Atmungsbereich 0,9 bis 1 beträgt. Das bedeutet, dass die Decke für die diffuse Lüftung als Luftauslass dienen und für eine gute Vermischung der Luft im Raum sorgen kann.

Ein weiterer Parameter der Raumluftqualität ist die Luftwechseleffektivität, die beschreibt, wie schnell die Luft in einem belüfteten Raum ausgetauscht wird. Sie hängt von der Luftverteilungsanlage im Raum, von der Geometrie des Raums und dem Standort der Wärmequelle ab, jedoch nicht vom Standort der Schadstoffquellen. Eine Untersuchung der Luftwechseleffektivität unterstützt die Annahme, dass eine diffuse Deckenlüftung zu einer guten Vermischung der Raumluft führt [12]. Es gibt außerdem keine Anhaltspunkte dafür, dass im Raum ein Bereich mit Luftstillstand oder eine Kurzschlusslüftung auftritt.

# 5 ENERGIEVERBRAUCH

Einer der Vorteile einer Anlage für die diffuse Deckenlüftung ist das große Energiesparpotenzial. In diesem Abschnitt werden die Faktoren erklärt, die den Energieverbrauch in der Anlage beeinflussen.

## 5.1 Energie der Luftverteilung

Die Energie der Luftverteilung wird durch den Druckabfall der Anlage bestimmt. In der Regel ist es sinnvoll, den Druckabfall zu reduzieren, wodurch mögliche Geräuschprobleme verhindert und gleichzeitig der Stromverbrauch des Lüfters reduziert werden kann. Ein niedriger Druckabfall ist ein Vorteil, wenn eine Decke für die diffuse Lüftung als Luftauslass eingesetzt wird.

Der niedrige Druckabfall der Anlage für die diffuse Deckenlüftung kann auf zwei Aspekte zurückgeführt werden. Erstens ist der Hohlraum eine primäre Luftverteilungsrouten. Durch den Hohlraum sind weniger oder sogar gar keine Luftkanäle erforderlich. Zudem begrenzt die große Größe des Hohlraums den Luftstrom zu einem gewissen Maß. Folglich ist im Vergleich zu herkömmlichen Lüftungsanlagen ein weitaus geringer Druck erforderlich, um die Luft in den Raum zu leiten. Zweitens werden die Platten der abgehängten Decke in dieser Anlage als Lufteinlässe verwendet. Im Vergleich zu herkömmlichen Lufteinlässen erfordern die Platten für die diffuse Deckenlüftung aufgrund des großen Einlassbereichs einen geringeren Druckabfall.

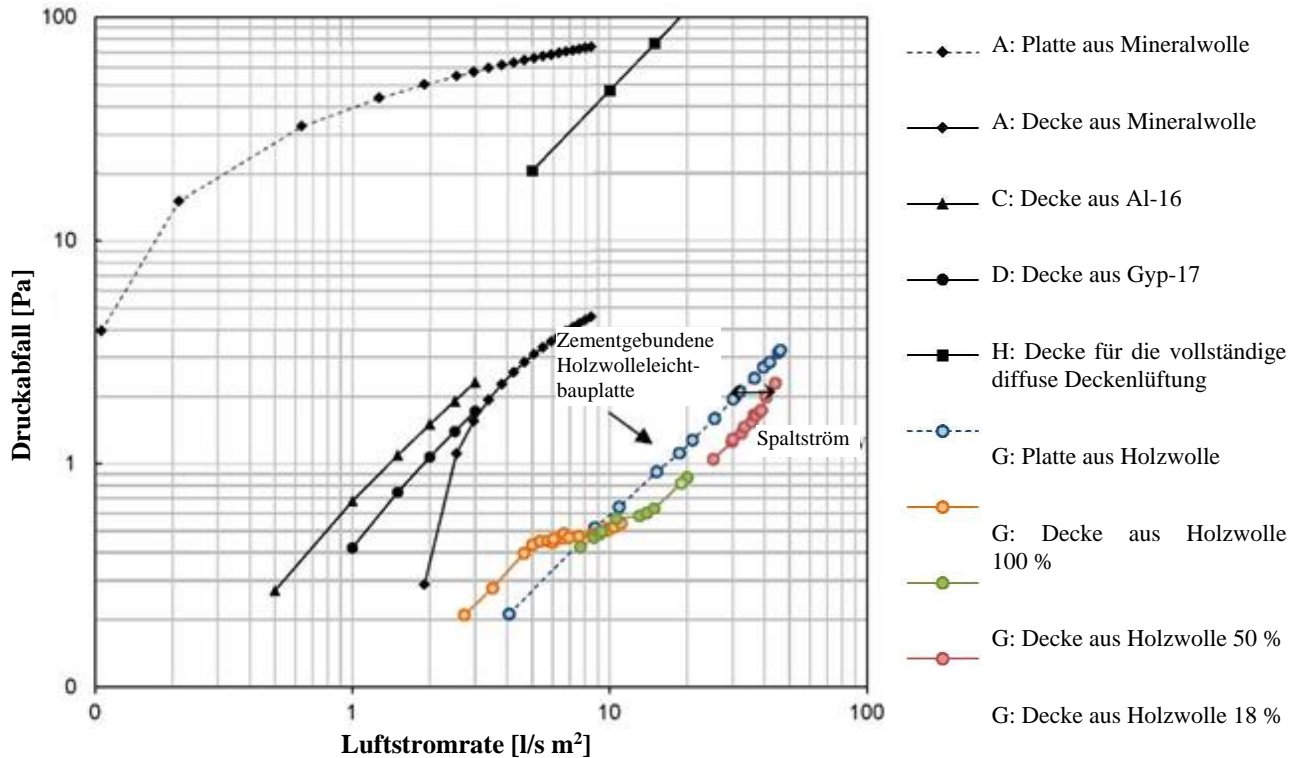


Abbildung 7: Verhältnis zwischen Druckabfall und Luftstromrate für verschiedene Einlässe der diffusen Lüftung und Vergleich mit einzelnen Platten

Abbildung 7 zeigt den Druckabfall bei verschiedenen Decken für die diffuse Deckenlüftung als eine Funktion des Luftdurchsatzes. Im Vergleich zu anderen Decken für die diffuse Deckenlüftung erzielt eine Decke aus zementgebundenen Holzwolleleichtbauplatten den niedrigsten Druckabfall ( $< 4 \text{ Pa}$  für einen Luftdurchsatz von 1 bis  $40 \text{ l/s m}^2$ ).

Für die Decke aus Holzwolle und Zement beträgt die Plattenströmung bei einem Druckabfall von  $2 \text{ Pa}$   $75 \%$  und die Spaltströmung lediglich  $25 \%$ . Die Spaltströmung kann den Druckabfall der Anlage reduzieren, jedoch auch durch Mikroluftströme die Luftverteilung beeinflussen. Diese Ergebnisse zeigen auch, dass der Druckabfall von der Art der Platte für die diffuse Deckenlüftung und dem Anschlussprofil abhängt.

Daneben hängt der Druckabfall auch stark vom Öffnungsbereich der Decke für die diffuse Deckenlüftung ab. Die Messungen des Druckabfalls wurden bei drei verschiedenen Deckenöffnungsverhältnissen durchgeführt:  $100 \%$ ,  $50 \%$  und  $18 \%$ . Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Luft bei einem Deckenöffnungsverhältnis von  $100 \%$  hauptsächlich durch die perforierten Platten geleitet wird. Die Spaltströmung nimmt umso mehr zu, je geringer der Öffnungsbereich der Decke ist. Daher lässt sich schlussfolgern, dass folgende Einflussfaktoren für den Druckabfall wichtig sind: Typ des Einlasses für die diffuse Deckenlüftung, Öffnungsbereich, Dichtheit der Luftanschlüsse und Aufhängungssystem.

Der Druckverlust in der Luftverteilungsanlage ist ein entscheidender Parameter in Bezug auf den Energieverbrauch des Lüfters. P. Jacobs et al. [16] haben zwei Feldstudien in Klassenräumen (Grundschule Sliedrecht sowie Tilburg) mit diffuser Deckenlüftung beschrieben. Durch den Vergleich zwischen herkömmlichen und modernen Lüftungsanlagen für Schulen in den Niederlanden [16] fanden sie heraus, dass die spezifische Lüfterleistung (SFP, Specific Fan Power) und die Energiekosten von Anlagen für die diffuse Deckenlüftung erheblich geringer waren als bei anderen Lüftungsanlagen (wie in Tabelle 2 gezeigt). Der Stromverbrauch für einen Klassenraum in den Niederlanden beträgt durchschnittlich 18 kWh/m<sup>2</sup>. Das sind Kosten von ungefähr 200 € pro Jahr und Klassenraum. Durch den Einsatz der diffusen Deckenlüftung konnten die Stromkosten um 2 bis 20 € pro Jahr verringert werden, da auf die Vorwärmeinheit verzichtet werden konnte und der Energieverbrauch des Lüfters gesenkt wurde.

Tabelle 2: Vergleich der spezifische Lüfterleistung (SFP) und des Stromverbrauchs von verschiedenen Lüftungsanlagen. Auslastung: 1040 h/Jahr, Luftstromrate: 200 dm<sup>3</sup>/s, Stromkosten: 0,2 €/kWh [16]

Anlagen	SFP [kW/m <sup>3</sup> ]	Stromkosten [€/Jahr]
Herkömmliche Anlagen	5–10	290
Moderne Anlagen	2–2,5	90
Grundschule Sliedrecht	0,04	2
Grundschule Tilburg	0,5	20

## 5.2 Längerer Zeitraum der freien Kühlung

Die natürliche Belüftung ist eine der effektivsten Technologien für die passive Kühlung. Im Winter oder in der Zeit kurz davor oder danach kann sie jedoch im Raum zu einem Luftzug führen, wenn die Außenluft direkt für die Kühlung verwendet wird. Ein gängiger Ansatz ist es, die Außenluft vor dem Zuführen in den Raum vorzuwärmen. Dadurch werden jedoch die Kühlleistung der Lüftung erheblich verringert und die Investitionskosten erhöht.

Wie in Abschnitt 4.1 erwähnt ist eine niedrige Zugluft rate ein wesentliches Merkmal der diffusen Deckenlüftung. Der große Einlassbereich ermöglicht es, dass die Luft mit einer sehr geringen Geschwindigkeit in den Raum geleitet wird. Darüber hinaus wird durch die Vorwärmwirkung des Hohlraums eine mittlere Lufttemperatur sichergestellt. Laut der experimentelle Studie [3] bemerken anwesende Personen den Luftzug im Raum bei der diffusen Deckenlüftung selbst bei einer sehr niedrigen Zulufttemperatur von bis zu -7 °C nicht. Somit ist es selbst im Winter möglich, die Außenluft direkt für die Kühlung einzusetzen. Dadurch sind keine Vorwärmeinheiten erforderlich und der Zeitraum der freien Kühlung wird durch die Lüftung verlängert.

## 5.3 Nachtkühlstrategie

Aufgrund einer allgemeinen Entwicklung in den letzten Jahrzehnten in Richtung eines geringeren Wärme- und eines höheren Kühlbedarfs in Gebäuden in vielen europäischen Ländern, wird die passive Kühlung durch eine Nachtlüftung als vielversprechende Technologie angesehen, vor allem für Gewerbegebäude in mittleren oder kalten Klimazonen. Das Grundkonzept besteht darin, dass das Gebäude über Nacht gekühlt wird. Wenn das Gebäude dann tagsüber von Personen genutzt wird, fungiert es selbst als Kühlkörper. Eine solche Strategie kann am Tag den Wärmekomfort der Personen im Gebäude sicherstellen, ohne dass eine mechanische Kühlung erforderlich ist, oder zumindest dafür sorgen, dass der Kühlenergiebedarf tagsüber geringer ist. Auf Grundlage der Analyse der Klimadaten [17] wurde herausgefunden, dass es in ganz Nordeuropa ein hohes Potenzial für die Kühlung mithilfe der Nachtlüftung gibt und dass das Potenzial in Mittel- sowie Osteuropa und selbst in einigen Regionen Südeuropas immer noch beachtlich ist.

Die diffuse Deckenlüftung birgt ein großes Potenzial für eine Kombination mit einer Nachtkühlstrategie, da die Deckenplatten in dieser Anlage in der Regel Zuluftpfaden ausgesetzt sind, was die Effizienz der

Wärmespeicherung erhöht und den Vorkühleffekt verbessert. Die diffuse Deckenlüftung kann die kühle Luft überall im Gebäude zirkulieren lassen, wodurch gespeicherte Wärme effektiv aus dem Gebäude entfernt und das Gebäude für den nächsten Tag abgekühlt werden kann.

Obwohl dieses Belüftungskonzept ein erhebliches Potenzial für Energieeinsparungen und geringere Kühlspitzenlasten bietet, erfordert es eine geeignete und umfassende Regelstrategie. Mitunter ist eine Schwäche einer solchen Anlage, dass am Morgen nach der Nachtkühlung eine Aufwärmzeit erforderlich ist. Dann würde die thermische Masse einen negativen Einfluss auf die Heizungsanlage haben und noch mehr Heizenergie erfordern.

## 6 AUSLEGUNGSPARAMETER

### 6.1 Öffnungsbereich der diffusen Deckenlüftung

Im Gegensatz zu über die Luftdynamik geregelten Anlagen ist der Einlassbereich bei einer diffusen Deckenlüftung weitaus flexibler. Der Einlass kann entweder die gesamte Decke oder ein Teil der Decke sein. Die Auswirkungen des Öffnungsbereichs für die diffuse Deckenlüftung auf den Wärmekomfort und die Anlagenleistung wurden in der experimentellen Studie [4] untersucht. Die Prüfungen wurden bei drei Öffnungsverhältnissen durchgeführt: 100 %, 50 % und 18 %, wie in Abbildung 8 gezeigt.

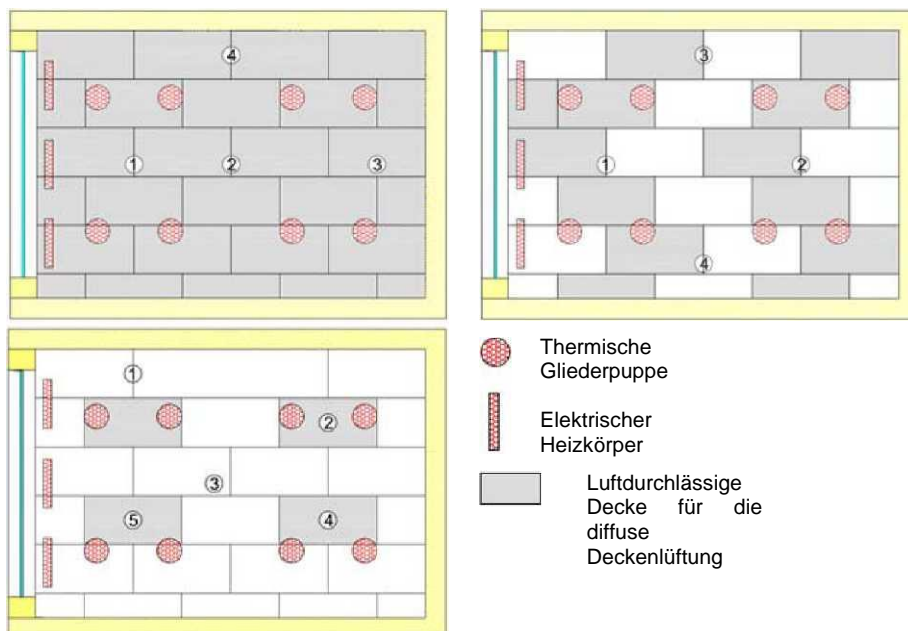


Abbildung 8: Anordnung der Deckenplatten mit verschiedenen Öffnungsbereichen [4]

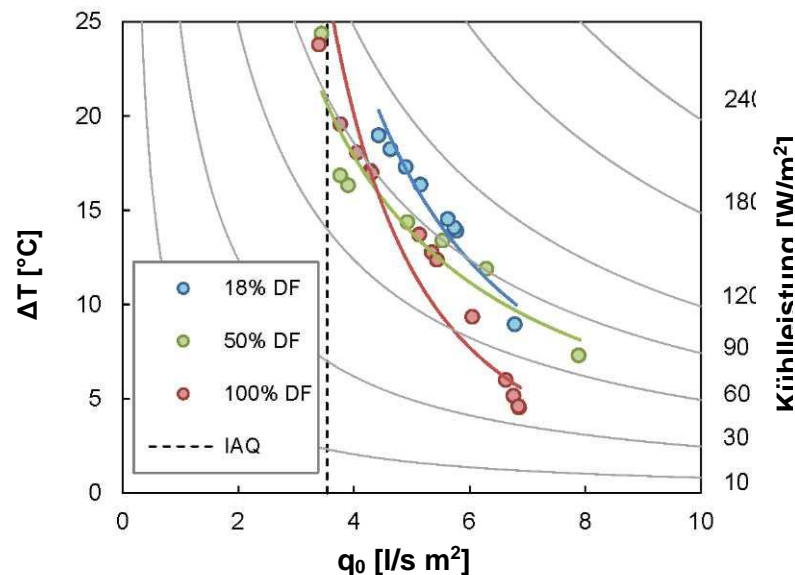


Abbildung 9: Auslegungsdiagramm für verschiedene Öffnungsbereiche der diffusen Deckenlüftung [4]

Es wurde ein Auslegungsdiagramm verwendet, um die Anlage mit verschiedenen Konfigurationen für die diffuse Deckenlüftung zu vergleichen. Der abgebildete Ausschnitt des Auslegungsdiagramms erfüllt sowohl die Anforderung in Bezug auf den Wärmekomfort als auch auf die Raumluftqualität. Abbildung 9 zeigt, dass die Kühlleistung der diffusen Deckenlüftung je nach Konfiguration zwischen 40 und 100 W/m<sup>2</sup> betrug. Die Anlage mit einem Öffnungsbereich von 18 % konnte die höchste Wärmelast handhaben, ohne dass ein Luftzug entstand. Dies lässt sich durch die Wärmequellen erklären, die beim Öffnungsbereich von 18 % unter den perforierten Platten für die diffuse Deckenlüftung angeordnet waren. Folglich kann die kalte Zuluft direkt die Plumes von den Wärmequellen angehen. Zudem kann der Öffnungsbereich von 18 % im Vergleich zu den anderen beiden Konfigurationen eine relativ hohe Luftstromdynamik erzeugen, was zum Teil das Strömungsprofil im Raum beeinflusst. Die Anlage mit einem Öffnungsbereich von 100 % wies dagegen die niedrigste Kühlleistung auf. Es ist jedoch noch zu früh, um daraus abzuleiten, dass die Kühlleistung umso höher ist, je kleiner der Öffnungsbereich ist. Die relative Position von Wärmequellen und der Öffnung für die diffuse Deckenlüftung spielt eine wichtige Rolle und muss weiter untersucht werden.

## 6.2 Gestaltung des Hohlräume



(a)



(b)

Abbildung 10: Deckenhohlraum und Konfiguration der diffusen Deckenlüftung [4]

Das Verwenden eines Hohlräume für die Luftverteilung ist eines der wichtigsten Merkmale, durch das sich eine diffuse Deckenlüftung von herkömmlichen kanalgelassenen Lüftungsanlagen unterscheidet. Der Hohlraum ist die Fläche zwischen der Rohdecke und den Platten der abgehängten Decke. Abbildung 10 zeigt ein Beispiel für einen Deckenhohlraum. Die Deckenplatten sind mit einem speziellen Aufhängesystem

0,35 m unterhalb der Betonplatten installiert. Die Einlassöffnungen zeigen in Richtung des Hohlraums und führen die Außenzuluft direkt dem Hohlraum zu.

Der thermische Prozess im Hohlraum unterscheidet sich von demjenigen in einer kanalgebundenen Anlage. Da sich die zugeführte Luft durch den Hohlraum bewegt, kommt sie direkt in Kontakt mit den thermischen Massen der Rohdecke und der Platten für die diffuse Deckenlüftung. Dadurch wird Wärme von dem thermoaktiven Bauteilsystem (TABS) und dem Raum auf die Luft übertragen. Dies führt zu einer thermischen Zersetzung der Zuluft. In Bezug auf die Gestaltung des Hohlraums besteht das Hauptziel darin, eine gleichmäßige Verteilung der Luft – sowohl hinsichtlich der Luftmenge als auch der Qualität – durch die Platten für die diffuse Deckenlüftung sicherzustellen. In der Praxis treten zahlreiche Auslegungsparameter wie Geometrie des Hohlraums, Konfiguration des Hohlraumeinlasses, Hindernisse im Hohlraum usw. auf. Diese Auslegungsparameter und ihre Auswirkungen auf die Energie- und Luftstromleistung werden in diesem Abschnitt erläutert.

### 6.2.1 Hohlraumeinlass

Die Stelle und die Konfiguration des Hohlraumeinlasses bestimmen das Luftströmungsprofil im Hohlraum und beeinflussen zusätzlich die Temperaturschwankungen darin. Abbildung 11 zeigt ein Beispiel für die Temperaturverteilung im Hohlraum mit einem einzigen Luftstromeinlass und mit Drallreglern [18]. Die Abmessungen des Hohlraums betragen  $14,6 \times 4,7 \times 0,254 \text{ m}^3$ . Es wurde festgestellt, dass die Drallregler im Hohlraum für eine gleichmäßigere Temperaturverteilung sorgen. Darüber hinaus haben die Ergebnisse gezeigt, dass der Bereich, der am nächsten am Hohlraumeinlass liegt, im Grunde nicht die niedrigsten Temperaturen aufweist. Dies hängt von der Richtung des Luftstroms ab.

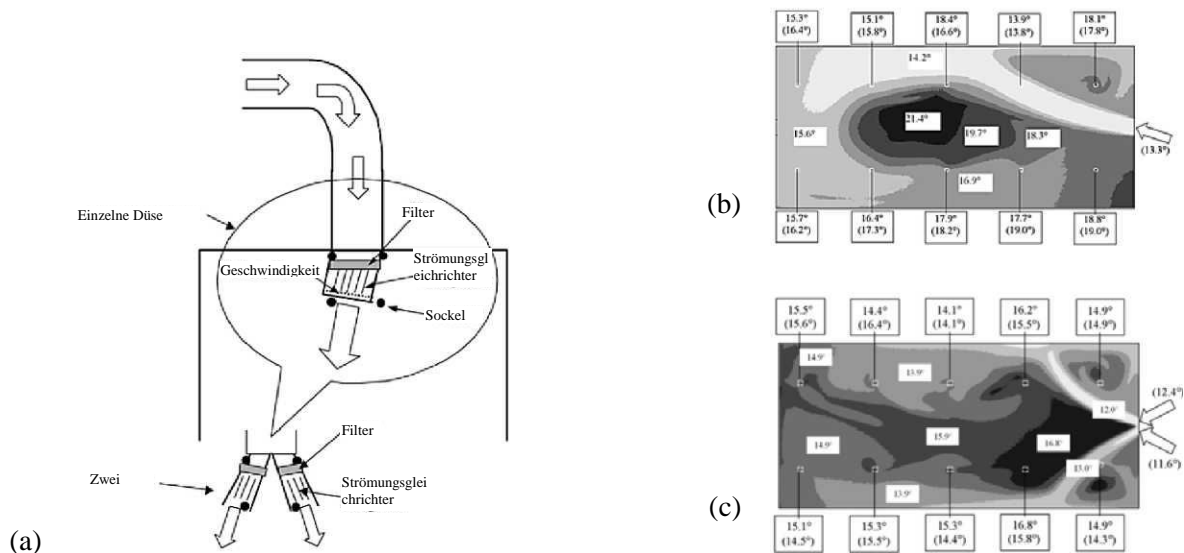


Abbildung 11: Vergleich der Lufttemperatur im Hohlraum für verschiedene Einlasskonfigurationen; vorhergesagte Temperatur (gemessene Temperatur) in °C. (a) Schematische Darstellung des Hohlraumeinlasses, (b) Einlass mit einzelner Düse, (c) Drallregler [18]

Ist der Hohlraum größer als 150 bis 200 m<sup>2</sup> oder beträgt seine Tiefe mehr als 10 m, kann ein an einer Ecke platzierter Einlass nicht sicherstellen, dass die Zuluft im gesamten Raum in der erforderlichen Menge und in der erforderlichen Qualität ankommt. Alternativ ist es möglich, zusätzliche Einlässe an verschiedenen Ecken des Hohlraums zu platzieren, um die Luftverteilung gleichmäßig zu gestalten. Eine weitere Lösung kann sein, Luftkanäle zu verwenden, um die Luft durch Teile im Hohlraum zu verteilen [19]. Die Einlässe können entlang des Luftkanals platziert werden und es sollten Ausgleichklappen erwägt werden, um Abweichungen bei der Luftverteilung im Hohlraum zu vermeiden. Es sind jedoch Lüftereinheiten erforderlich, um den Luftstrom durch den Kanal zu leiten, wodurch zusätzliche Investitions- und Betriebskosten erwartet werden.



### 6.2.2 Hohlraumgeometrie

Aus architektonischer Sicht ist es sinnvoll, die Höhe des Hohlraums zu reduzieren, um eine ausreichende Stehhöhe zu gewährleisten. Eine geringe Hohlraumhöhe kann jedoch auch zu einer ungleichmäßigen Luftverteilung führen. Es ist wichtig, die Mindesthöhe des Hohlraums zu ermitteln, bei der innerhalb des Hohlraums eine akzeptable Luftverteilung erreicht werden kann. Es wurden Studien in Bezug auf Hohlräume mit unterschiedlichen Höhen (5 bis 35 cm) bei Winterbedingungen (Zulufttemperatur von  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) durchgeführt. Dabei wurde ein thermoaktives Bauteilsystem (TABS) für die Beheizung aktiviert [20]. Abbildung 12 zeigt die Luftverteilung durch die Decke beim Einsatz einer diffusen Deckenlüftung (1 cm über der Deckenplatte). Es wird deutlich, dass sich die Abweichungen bei der Verteilung drastisch erhöhen, wenn der Hohlraum niedriger ist als 10 cm. Dies ist der Fall, da sich die Zuluft durch den niedrigen Hohlraum nicht gut mit der Luft im Hohlraum vermischen konnte. Aus diesem Grund wurde dem Raum in kurzer Entfernung zum Hohlraumeinlass kalte Luft zugeführt. Zudem kam an der am weitesten entfernten Stelle im Raum warme Luft an.

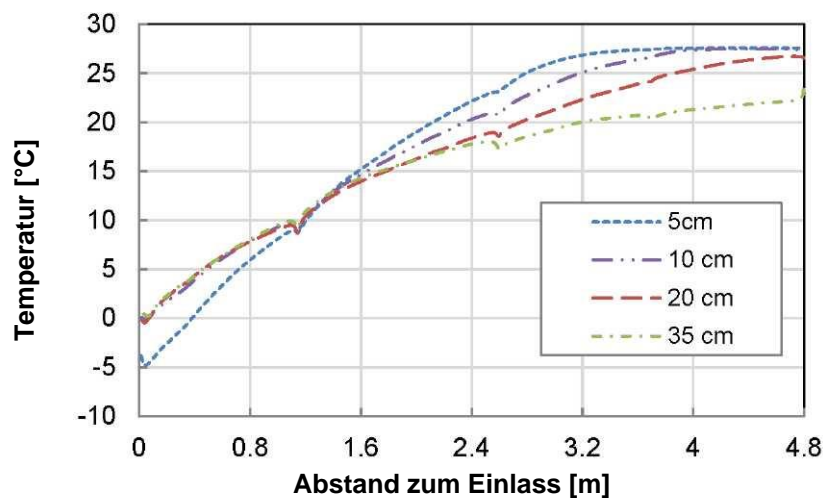
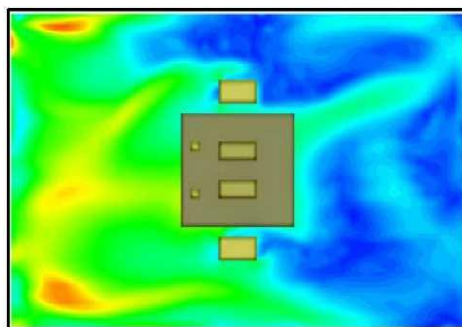
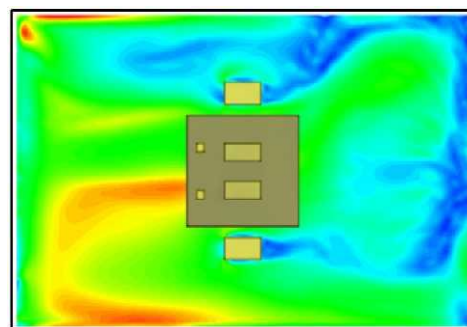


Abbildung 12: Temperaturverteilung durch die Decke für die diffuse Deckenlüftung [20]

Die Höhe des Hohlraums beeinflusst die Gleichmäßigkeit der Luftverteilung durch die Decke für die diffuse Deckenlüftung. Darüber hinaus hat sie Auswirkungen auf die Luftstromleistung im Raum. Die Geschwindigkeitsverteilung wurde in einer Höhe von 0,1 m gemessen und für verschiedene Hohlraumhöhen verglichen (siehe Abbildung 13). Mit abnehmender Hohlraumhöhe von 35 bis auf 5 cm gelangte die Rückströmung mit zunehmender Geschwindigkeit von der Vorderseite des Raums in den gesamten Raum. Die Zunahme der Luftgeschwindigkeit zwischen den Fällen mit 35 und 5 cm Deckenhöhe war signifikant. Die hohe Luftgeschwindigkeit auf Bodenhöhe führte folglich zu einem höheren Risiko eines Luftzugs im Raum, der insbesondere von Personen spürbar war, die in der Nähe des Hohlraumeinlasses saßen. Es wird eine Mindesthöhe des Hohlraums von 20 cm empfohlen, um eine gleichmäßige Luftverteilung mit einem niedrigen Luftzugrisiko im Raum sicherzustellen.



(a)



(b)



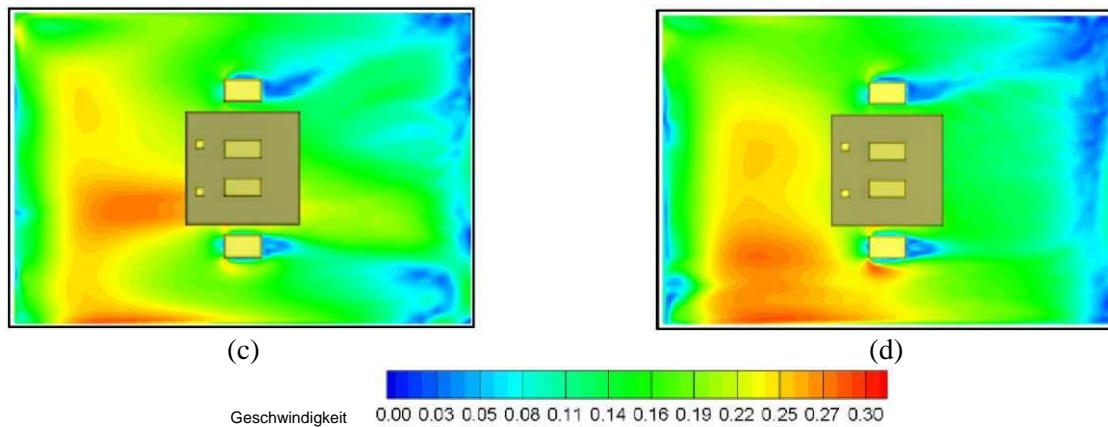


Abbildung 13: Geschwindigkeitsverteilung in einer Höhe von 0,1 m bei verschiedenen Hohlraumhöhen. (a) 35 cm, (b) 20 cm, (c) 10 cm, (d) 5 cm [20]

Die Tiefe des Hohlraums stellt einen weiteren wichtigen Parameter dar, der die Luftverteilung durch die Decke für die diffuse Deckenlüftung beeinflusst. Abbildung 14 zeigt die Geschwindigkeitsverteilung in einer Höhe von 0,1 m bei zwei verschiedenen Hohlraumtiefen (4,8 und 9,6 m). Die Luftgeschwindigkeit und der Bereich mit hoher Geschwindigkeit hat sich bei doppelter Tiefe drastisch erhöht bzw. vergrößert. Die erreichte maximale Geschwindigkeit betrug bis zu 0,32 m/s in einem 9,6 m tiefen Raum. Die Personen, die sich in der Nähe der Außenwand aufhalten, sind einem wesentlich höheren Luftzugrisiko ausgesetzt als diejenigen, die sich an der hinteren Wand befinden. Aus diesem Grund werden bei einer Raumtiefe über 10 m zusätzliche Einlässe im Hohlraum oder Luftkanäle im Hohlraum empfohlen, um die Luftverteilung gleichmäßiger zu gestalten.

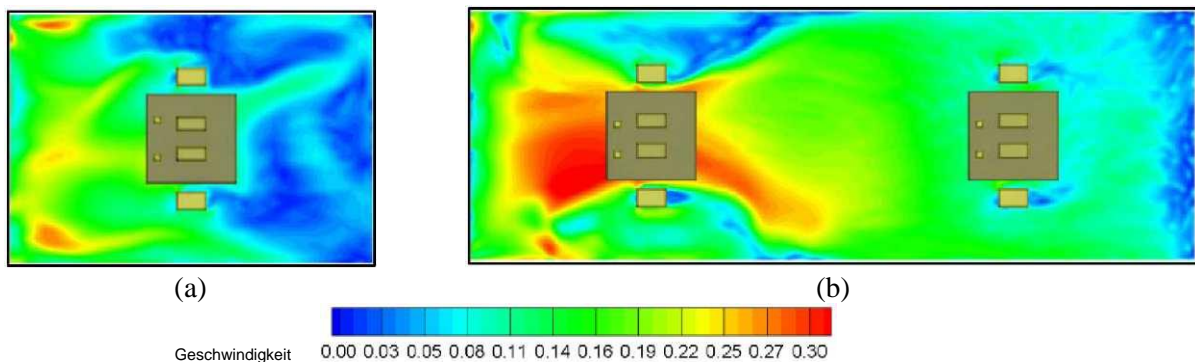


Abbildung 14: Geschwindigkeitsverteilung in einer Höhe von 0,1 m bei verschiedenen Hohlraumtiefen. (a) 4,8 m, (b) 9,6 m [20]

### 6.3 Wärmequellen

Wie in Abschnitt 3.1 erwähnt ist die von den Wärmequellen erzeugte Konvektionsströmung die dominante Strömung. Sie bestimmt das Luftströmungsprofil in Räumen mit einer diffusen Deckenlüftung. Daher hat die Wärmequelle (Standort und Typ) einen erheblichen Einfluss auf die Leistung der Lüftungsanlage.

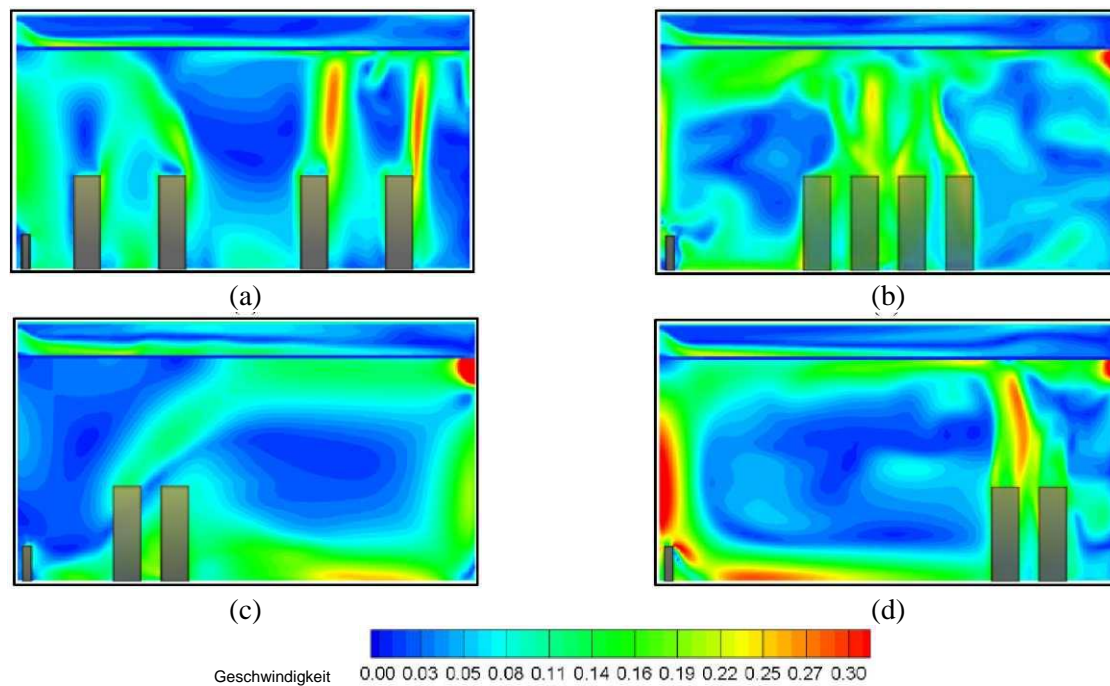


Abbildung 15: Geschwindigkeitsverteilung bei verschiedenartig auftretenden Wärmelasten. (a) Gleichmäßig verteilt, (b) mittig, (c) vordere Seite, (d) hintere Seite [4]

In der numerischen Studie [4] wurde die Verteilung der Wärmelast untersucht. Es war offensichtlich, dass verschiedenartig auftretende Wärmelasten zu sehr unterschiedlichen Luftströmungsprofilen führten und dass sie das Komfortniveau im Raum beeinflussten. Eine starke Luftrezirkulation trat auf, als sich die Wärmequellen auf einer Seite des Raums befanden und auf Bodenhöhe ein hohes Luftzugrisiko herrschte. Die Zugluft rate bei an der hinteren Seite platzierten Wärmequellen betrug bis zu 20 %. Bei gleichmäßig verteilten Wärmequellen trat dagegen keine deutliche Luftrezirkulation auf und das Risiko eines Luftzugs betrug lediglich 12 %. Es muss berücksichtigt werden, dass bei sehr ungleichmäßig verteilten Wärmequellen in einem Raum die Kühlleistung der Anlage reduziert wird.

## 6.4 Raumhöhe

Die Auswirkungen der Raumhöhe wurden für drei Szenarien untersucht: 2,335 m, 3,0 m und 4,0 m, wie in Abbildung 16 gezeigt [4]. Das Luftströmungsprofil war tendenziell ähnlich. Die Intensität der Rezirkulation nahm jedoch mit steigender Raumhöhe drastisch zu. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Konvektionsströmung der Antrieb der Rezirkulation ist und dass sich die von der Rezirkulation betroffene Luftmenge aufgrund der Mitführung der Umgebungsluft mit der Raumhöhe erhöht. Daher zeigte sich, dass die Zugluft rate im proportionalen Verhältnis zur Raumhöhe steht. Die diffuse Deckenlüftung sollte vorzugsweise in einem Raum eingesetzt werden, der niedriger ist als 3 m.

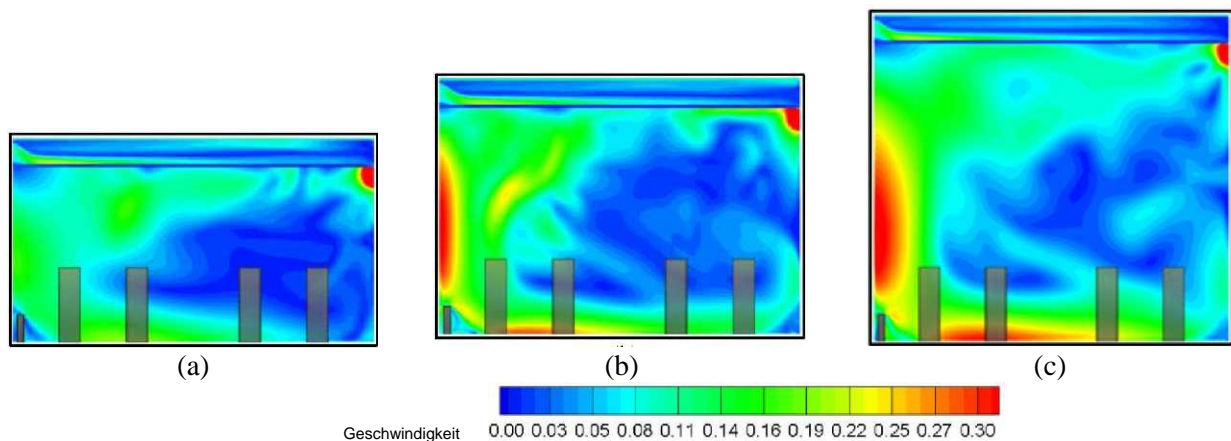


Abbildung 16: Geschwindigkeitsverteilung über die Mittelraumebene bei verschiedenen Raumhöhen. (a) 2,335 m, (b) 3,0 m, (c) 4,0 m [4]

## 7 ANLAGENLEISTUNG UND VERGLEICH MIT ANDEREN LUFTVERSORGUNGSANLAGEN

Wie in Abschnitt 4 erwähnt bietet die diffuse Deckenlüftung eine höhere Leistung in Bezug auf den Wärmekomfort im Raum. Die Komfortanforderungen wie Luftzug und vertikaler Temperaturgradient begrenzen die Luftwechselrate der Anlage und die Zulufttemperatur nicht erheblich. Dadurch kann die Anlage im Vergleich zu anderen Lüftungsanlagen eine höhere Leistung erzielen.

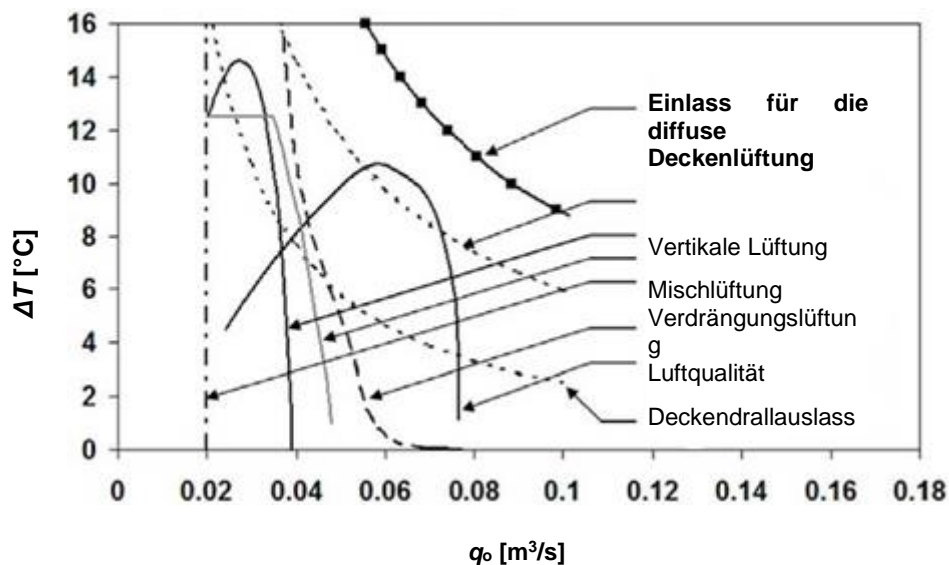


Abbildung 17: Auslegungsdiagramm für eine diffuse Deckenlüftung und für fünf andere Luftversorgungsanlagen [21]

Die Leistung der diffusen Deckenlüftung und fünf anderer Luftversorgungsanlagen wurde im selben Raum bei gleicher Wärmelast geprüft [21]. Bei den fünf anderen Versorgungsanlagen handelte es sich um: Mischlüftung über eine wandmontierte Anlage, Mischlüftung über einen deckenmontierten Luftverteiler, Mischlüftung über einen deckenmontierten Luftverteiler mit Wirbelströmung, Verdrängungslüftung über einen wandmontierten Luftverteiler mit geringer Geschwindigkeit sowie vertikale Lüftung über einen deckenmontierten Einlass aus Stoff. Für einen direkten Vergleich der Leistung der verschiedenen Lüftungsanlagen wurde ein Auslegungsdiagramm erstellt (siehe Abbildung 17). Bei allen Anlagen war für eine bestimmte Luftqualität (10 l/s pro Person für Kategorie A) eine Luftwechselrate von mindestens 0,02 m<sup>3</sup>/s erforderlich. Die

Ergebnisse zeigten, dass der Einlass für die diffuse Deckenlüftung die höchste Wärmelast von  $72 \text{ W/m}^2$  handhaben konnte. Die Kühlleistung der fünf anderen Lüftungsanlagen betrug dagegen zwischen  $36$  und  $53 \text{ W/m}^2$ . Die Abweichung bei der hohen Luftwechselrate tritt auf, da der große Einlassbereich in der Decke einen Zuluftstrom mit niedriger Geschwindigkeit und keiner festen Richtung erzeugt. Die Abweichung bei der hohen Lufttemperaturdifferenz entsteht dadurch, dass die kühle Zuluft mit der Raumluft vermischt wird, bevor sie in den Raum gelangt. Dadurch kann die diffuse Deckenlüftung im Vergleich zu den anderen Luftversorgungsanlagen die höchste Wärmelast handhaben.

Es muss betont werden, dass die Leistung der Anlage für die diffuse Deckenlüftung von vielen Parametern bestimmt wird, wie Deckentyp, Öffnungsbereich, Hohlraumkonfiguration, Raumgeometrie und Wärmelastbedingungen. Somit ist es erforderlich, die Kühlleistung der Anlagen auf Grundlage der gegebenen Bedingungen zu bewerten, um die optimale Lösung auszuwählen. Die Auswirkungen der verschiedenen Auslegungsparameter werden in Abschnitt 6 erörtert.

## **8 INTEGRATION IN EINE HEIZ-/KÜHLANLAGE**

Die Lüftung hängt als passive Kühlstrategie stark von den äußeren Klimabedingungen ab. Wenn eine natürliche Ressource nicht ausreicht, um ein akzeptables Raumklima aufrechtzuerhalten, ist eine zusätzliche Heiz- oder Kühlanlage erforderlich. In diesem Abschnitt wird die Integration der diffusen Deckenlüftung in verschiedene Heiz- und/oder Kühlanlagen erörtert.

### **8.1 VAV-Anlagen**

Anlagen mit variabler Luftvolumen (VAV, Variable Air Volume) zählen zu den am häufigsten verwendeten HLK-Anlagen für Nichtwohngebäude. Im Gegensatz zu Anlagen mit konstantem Luftvolumen (CAV, Constant Air Volume), die einen konstanten Luftstrom mit variabler Temperatur erzeugen, variiert bei VAV-Anlagen der Luftdurchsatz bei einer konstanten Temperatur. Im Kühlbetrieb liefern diese Anlagen eine Zuluft mit einer konstanten Temperatur von etwa  $13 \text{ }^\circ\text{C}$ . Da die Zulufttemperatur konstant ist, muss der Luftdurchsatz variieren, um den Bedarf zu erfüllen, der durch eine Veränderung der Wärmequelle im klimatisierten Bereich entsteht.

Die Grundkomponenten einer VAV-Klimaanlage sind: zentrale Lüftungseinheit (AHU) mit drehzahlgeregeltem Versorgungslüfter, Steuer-/Regelkomponenten, Filter, Mischkammer, Luftkanäle, an Thermostate und Luftverteiler angeschlossene VAV-Einheit sowie ggf. ein Entlüfter [22]. Abbildung 18 zeigt die schematische Darstellung einer VAV-Klimaanlage mit Luftverteiler für die diffuse Deckenlüftung. Anstatt dass die Außenluft direkt in den Hohlraum gelangt, wird sie von der Lüftungseinheit auf eine bestimmte Temperatur gebracht und über den Versorgungslüfter in jeden Raum geleitet. Die VAV-Einheit wird über die Thermostate geregelt, die in den Räumen montiert sind. Wenn eine höhere Kühlleistung erforderlich ist, öffnet sich die mechanische Klappe weiter, um den Luftdurchsatz zu erhöhen, bis die gewünschte Temperatur erreicht ist. Wenn es im Raum dagegen zu kalt ist und ein Temperaturanstieg notwendig ist, wird die Klappe schrittweise geschlossen, um die Menge der kalten Luft zu verringern. Für eine Senkung des Energieverbrauchs wird die Abluft in einigen VAV-Anlagen erneut dem Kreislauf zugeführt und mit frischer Außenluft gemischt, wenn die Außenlufttemperatur zu hoch ist.

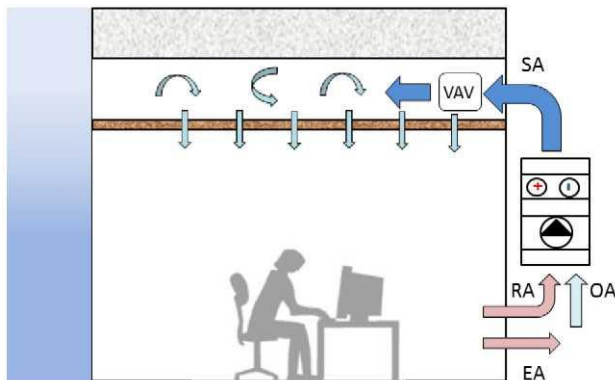


Abbildung 18: Schematische Darstellung einer VAV-Klimaanlage mit Luftverteiler für die diffuse Deckenlüftung

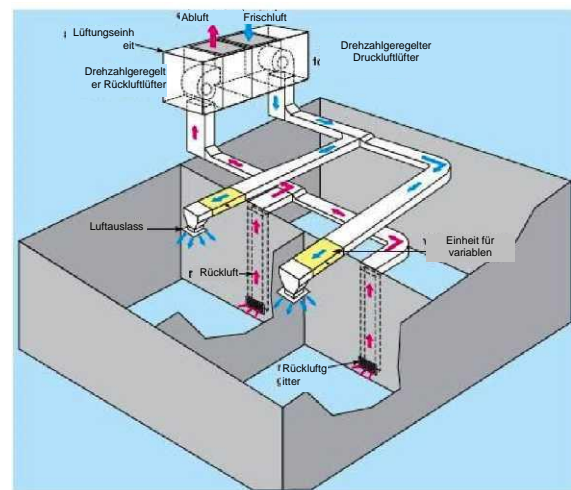


Abbildung 19: Schematische Darstellung einer VAV-Anlage mit mehreren Zonen [23]

Die VAV-Einheit ermöglicht die Zonenregelung der Strömung. Dadurch ist diese Anlage für eine Klimatisierung mit mehreren Zonen geeignet. Am Ende eines jeden Zuluftkanals sind VAV-Klappen montiert, die das Volumen der in die Zone gelieferten Luft regeln (siehe Abbildung 19). Die Regelung der Leistung des Anlagenlüfters ist in VAV-Anlagen entscheidend. Ohne eine ordnungsgemäße und schnelle Strömungsregelung können die Luftkanäle leicht durch einen Überdruck beschädigt werden. Am Auslass des Lüfters sollte ein konstanter Druck aufrechterhalten werden. Wenn sich die Klappen schließen, wird die Drehzahl des Lüfters verringert und die Menge der in den Zuluftkanal geleiteten Luft begrenzt. Wenn sich die Klappen öffnen, wird die Drehzahl des Lüfters erhöht und eine größere Luftmenge in den Luftkanal geleitet. So wird ein konstanter statischer Druck aufrechterhalten [24].

Diese Anlage bietet im Vergleich zu einer Strahlungsanlage eine größere Flexibilität in Bezug auf eine variierende Wärmelast sowie eine schnellere Ansprechzeit. Darüber hinaus sorgen VAV-Anlagen für eine passive Entfeuchtung, da die Außenluft zum Kühlregister geleitet wird und darauf kondensiert. Somit wird die Luft dem Raum mit niedriger Feuchtigkeit zugeführt. Diese Anlage nutzt jedoch nicht den Hohlraum als Verteiler von Niederdruckluft, wodurch die Luftkanäle und die VAV-Einheit den Druckverlust der Anlage erhöhen und folglich den Energieverbrauch des Lüfters steigern. Darüber hinaus begrenzen die montierten Vorrichtungen und Rohre den Hohlraum, wodurch die Luftverteilung beeinflusst wird.

## 8.2 Gebläsekonvektor

Ein Gebläsekonvektor ist eine typische luftbasierte Heiz-/Kühlanlage. Gebläsekonvektoren können eingesetzt werden, um die Außenluft in Räume zu leiten, die Luft in Räumen umzuwälzen und zu filtern sowie um Räume zu beheizen und/oder zu kühlen. Die Grundkomponenten eines Gebläsekonvektors sind: Heiz-/Kühlregister, Lüfterteil und ein Filter [25]. Einheiten können allein in einem Raum stehen oder über Kanäle verbunden werden, um mehrere Räume zu klimatisieren. Sie können mithilfe eines Handschalters, Thermostats oder Gebäudemanagementsystems geregelt werden. Im Vergleich zu einer VAV-Anlage oder einer zentralen Heizanlage mit Lüftungseinheiten zeichnet sich ein Gebläsekonvektor durch seine Einfachheit und Flexibilität aus. Er hat eine deutlich kleinere Lüftungseinheit und ein kleineres Luftkanalsystem als Nur-Luft-Anlagen. Gebläsekonvektoren werden in der Regel so ausgewählt und bemessen, dass sie einen kleinen Bereich mit speziellen Lastanforderungen beheizen und kühlen.

Gebläsekonvektoren lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Zweirohr- und Vierrohr-Gebläsekonvektoren. Eine Zweirohr-Anlage umfasst zwei Rohre – eins für den Vor- und eins für den Rücklauf. Die Versorgung wird je nach Jahreszeit von Kalt- auf Warmwasser und umgekehrt umgeschaltet. Obwohl bei Zweirohr-Anlagen die Kosten in Bezug auf Rohre und die Montage niedriger sind, bieten sie weniger Flexibilität beim Wärme- und Kühlbedarf, da es nicht möglich ist, mit einer Einheit für die Beheizung und mit einer anderen für die Kühlung zu sorgen. Dies kann mitunter problematisch sein, beispielsweise, wenn sich die jahreszeitenbedingte Last



oder die Auslastung verändern. Vierrohr-Anlagen bestehen aus zwei Vorlaufleitungen und zwei Rücklaufleitungen, die gleichzeitig Kalt- und Warmwasser bereitstellen können. Ein Drei-Wege-Ventil mit Kalt- oder Warmwasserversorgung kann über einen Raumthermostat oder einen Rückluftsensord und ein Signal so geregelt werden, dass es entweder die Kalt- oder die Warmwasserseite öffnet oder schließt. Im Gegensatz zu Zweirohr-Anlagen erfordern Vierrohr-Anlagen mehr Rohre und es treten oftmals höhere Montagekosten auf. Jedoch können sie zu jeder Jahreszeit ein hohes Komfortniveau aufrechterhalten.

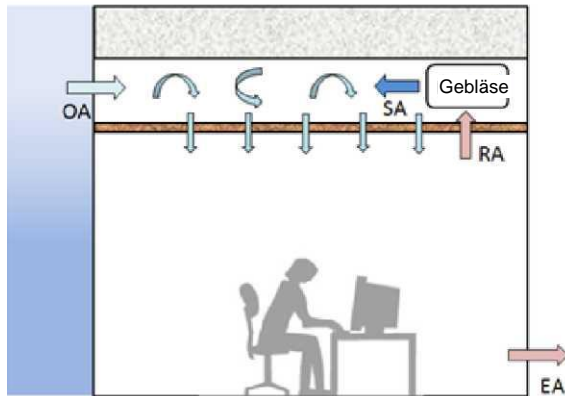


Abbildung 20: Schematische Darstellung eines Gebläsekonvektors mit Luftverteiler für die diffuse Deckenlüftung

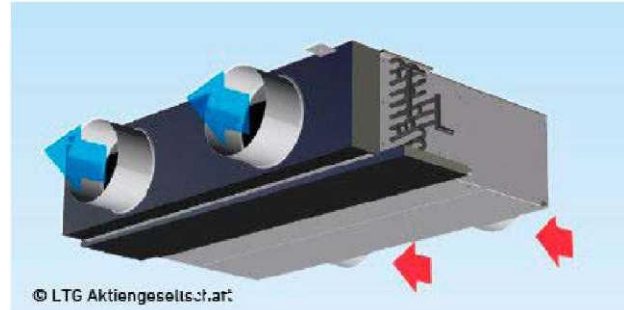


Abbildung 21: Deckenmontierter Gebläsekonvektor [26]

Der Gebläsekonvektor kann entweder im Hohlraum oder im Raum installiert werden. Jedoch ist das Risiko eines Luftzugs höher, wenn er im Raum installiert ist. Abbildung 20 zeigt eine schematische Darstellung des Gebläsekonvektors mit Luftverteiler für die diffuse Deckenlüftung, bei der der Gebläsekonvektor im Hohlraum montiert ist. Die Frischluft von draußen wird vom Gebläsekonvektor aufbereitet und in den Hohlraum geleitet. Ist die Außenlufttemperatur zu hoch oder eine Beheizung notwendig, kann die Abluft des Raums auch wieder dem Kreislauf zugeführt und für eine erneute Aufbereitung in die Einheit gesaugt werden. Daher kann der Luftstrom in die Einheit entweder vollständig aus Frischluft bestehen oder ein Gemisch aus Rück- und Frischluft sein.

Gebläsekonvektoren werden in der Regel mit Kaltwasser mit einer Rücklauftemperatur von 6 bis und 12 °C betrieben. Allerdings sind in der Praxis auch andere Temperaturen wie 7/13 °C oder 8/14 °C möglich [27]. Bei der Verwendung in Dänemark bildet sich bei den gängigen Temperaturen auf dem Kühlregister Kondenswasser. Dieses muss ordnungsgemäß gesammelt und entsorgt werden. Andernfalls können die Platten für die diffuse Deckenlüftung beschädigt werden und es kann Kondenswasser von der Decke tropfen (Büroregen). Üblicherweise kann ein Kondensatableitungssystem verwendet werden, bei dem entweder die Schwerkraft oder Pumpen genutzt werden. Bei Gebläsekonvektoren tritt mitunter ein hoher Geräuschpegel auf. Da der Lüfter im Hohlraum montiert und somit näher an den Personen gelegen ist als bei anderen Anlagen, muss der vom Lüfter erzeugte Geräuschpegel in der Konstruktionsphase berücksichtigt und auf einen zulässigen Wert begrenzt werden. Darüber hinaus schränken zahlreiche im Hohlraum montierte Vorrichtungen und Luftkanäle bei VAV- wie auch anderen Anlagen die Höhe des Hohlraums ein, wodurch die Luftverteilung im Hohlraum beeinflusst wird.

## 9 REGELSTRATEGIEN

### 9.1 Zulufttemperatur

Wenn die Lüftungsluft als Trägermedium für die Kühlung eingesetzt wird, stellt die Kühlleistung eine Funktion der Temperaturdifferenz zwischen Zu- und Raumluft (Abluft) dar. Aus diesem Grund gilt: Je geringer die Zulufttemperatur, desto höher die Kühlleistung. In der Regel ist die Bodeneinlasstemperatur bei der Verdrängungslüftung auf mindestens 19 °C begrenzt, während ein Luftverteiler im Fußboden für die Mischlüftung Luft mit einer Temperatur von 16 °C bereitstellen kann, ohne dass Luftzüge auftreten. Über die Mischlüftung mit einem wandmontierten Luftverteiler kann Luft mit einer Temperatur von bis zu 12 °C geliefert werden.

Die diffuse Deckenlüftung ermöglicht eine niedrige Temperatur der in den Hohlraum geleiteten Luft. Der Hohlraum hat eine Vorwärmfunktion inne, im Rahmen derer die Zuluft über die Wärmeübertragung von der thermischen Masse (Rohdecke und Platten für die diffuse Deckenlüftung) aufgewärmt wird, bevor sie in den Raum gelangt. Die Vorwärmung ist von der Hohlraumkonfiguration, der Art der Deckenplatten, dem Luftdurchsatz usw. abhängig. Zum Beispiel konnte bei einer teilweise luftdurchlässigen (50 %) Decke eine Vorwärmung der Luft im Hohlraum um 5 °C beobachtet werden, während sie bei einer vollständig luftdurchlässigen Decke (100 %) nur 2 °C betrug [28].

Die niedrige Luftdynamik bei der diffusen Deckenlüftung stellt selbst bei einer sehr niedrigen Zulufttemperatur ein geringes Luftzugrisiko im Raum sicher. In den experimentellen Studien [4] und [12] wurde mit einer Zulufttemperatur von -4 bis -6 °C geprüft. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass dennoch ein akzeptables Raumklima aufrechterhalten werden konnte, wenn der Luftdurchsatz ordnungsgemäß geregelt wurde. Noch geringere Zulufttemperaturen würden jedoch den möglichen Luftdurchsatz reduzieren und zu einer schlechten Raumluftqualität führen.

## 9.2 Luftwechselrate

Bei einer Lüftungsanlage sollte die Luft zwei Anforderungen erfüllen: sie sollte sauber sein und den Wärmekomfort sicherstellen.

Wenn anwesende Personen Schadstoffen in der Luft ausgesetzt sind, kann dies ein Gesundheitsrisiko darstellen. In einem Büro oder Klassenraum treten weniger Schadstoffe auf als in Industriegebäuden. Dennoch sind die Menschen darin zahlreichen Schadstoffen ausgesetzt, wie Baustoffen sowie Schadstoffen durch Möbel, Büromaterial, den menschlichen Stoffwechsel usw. Die für eine gute Luftqualität erforderliche Luftwechselrate beträgt 7 l/s pro Person und 0,7 l/s m<sup>2</sup> für Gebäude mit geringem Schadstoffgehalt (auf Grundlage der Kategorie B der EN 15251) [29].

In Bezug auf den Wärmekomfort sollte die Luftwechselrate begrenzt werden, um im Raum das Risiko eines Luftzugs zu vermeiden. Auf Grundlage der bisherigen Studien (Abbildung 6) konnte beobachtet werden, dass die Zugluftrate im Raum nicht in einem engen Verhältnis zur Luftwechselrate steht. Dies liegt daran, dass die Luftverteilung im Raum nicht hauptsächlich vom Versorgungsstrom bestimmt wird. Daher wird die Luftwechselrate nicht durch die Anforderung an den Wärmekomfort eingeschränkt. Wenn sich die Luftwechselrate jedoch auf einen bestimmten Wert erhöht (10 h<sup>-1</sup>), wechselt das Luftströmungsprofil im Raum von einer auftriebs- zu einer dynamikgeregelten Strömung, bei der ein Luftzug ein großes Problem darstellt.

## 9.3 Druck

Um eine unidirektionale Luftzufuhr durch die Platten für die diffuse Deckenlüftung sicherzustellen, sollte im Hohlraum im Vergleich zum klimatisierten Raum ein Überdruck aufrechterhalten werden. Die Druckdifferenz kann entweder mithilfe des Winds oder den Auftriebskräften der natürlichen Belüftung erzeugt oder von einem Lüfter aufrechterhalten werden. Beim typischen Klima in Dänemark beträgt die jährliche durchschnittliche Windgeschwindigkeit etwa 4,4 m/s. Sie führt zu einer Druckdifferenz von über 3,5 Pa in Gebäuden mit natürlicher Belüftung. Die natürliche Belüftung hängt allerdings stark von den Wetterbedingungen ab und variiert von Zeit zu Zeit. Es wird empfohlen, in der Anlage einen Versorgungslüfter oder Entlüfter einzusetzen, um im Hohlraum einen ausreichend hohen Druck aufrechtzuerhalten.

## 9.4 Feuchtigkeitsregelung

Wie in Abschnitt 2.2 erwähnt muss bei der Konstruktion einer Anlage für die diffuse Deckenlüftung das Kondensationsrisiko berücksichtigt werden. Die Einlasstemperatur und der Luftdurchsatz sollten sorgfältig geregelt werden, um die Oberflächentemperatur der abgehängten Decke über dem Taupunkt der Umgebungsluft zu halten. Des Weiteren sollte eine ordnungsgemäße Regelung des statischen Drucks im

Hohlraum eingesetzt werden. Mit einem Anschlussprofil mit hoher Luftdichtigkeit können ggf. eine Rückströmung von der Raumseite verhindert und entsprechende Kondensationsprobleme minimiert werden. Die feuchtigkeitsaufnehmenden zementgebundenen Holzwolleleichtbauplatten sollten als Feuchtigkeitsspeicher fungieren, damit eine stabile relative Raumluftfeuchtigkeit aufrechterhalten werden kann.

## 10. Fallstudie: Klassenraum mit diffuser Deckenlüftung

Dieser Abschnitt liefert eine Zusammenfassung der empfohlenen Konstruktionsverfahren für die diffuse Deckenlüftung. Es wird geplant, einen Klassenraum in einer Schule mechanisch über eine Anlage für die diffuse Deckenlüftung zu belüften. Eine zusätzliche Beheizung/Kühlung wird von einem Gebläsekonvektor übernommen.

### Beschreibung

- Funktion: Klassenraum
- Standort: Kopenhagen, Dänemark
- Abmessungen: 6 m x 10 m x 2,5 m, Fensterfläche: 35 % der Außenwand
- Personen: 27 Schüler und 1 Lehrkraft
- Wärmelast: Interne Wärmequellen (Personen, Beleuchtung, Geräte) 45 W/m<sup>2</sup>, Sonneneinstrahlung je nach Wetterlage (Tabelle 3)
- Im Gebäude halten sich an Wochentagen von 8:00 bis 16:00 Uhr Personen auf.
- Luftwechselrate: 0,1 h<sup>-1</sup>
- Eine Außenwand im Süden: U-Wert = 0,2 W/m<sup>2</sup> K, Fenster: U-Wert = 1,3 W/m<sup>2</sup> K, g-Wert = 0,65. Die Wärmeübertragung durch die Innenwand wird vernachlässigt.
- Der Klassenraum wird für gewöhnliche Arbeiten verwendet.
- Die Personen sitzen vor allem (1,2 MET) und die Innenraumbekleidung beträgt im Winter 1,0 und im Sommer 0,5 clo.
- Das Gebäude steht in einer Umgebung mit hervorragender Außenluftqualität und die Menge der Schadstoffe in der Außenluft stellt kein Gesundheitsrisiko dar.

### Konstruktionsbedingungen:

Tabelle 3: Monatliche Durchschnittswitterungsverhältnisse, auf Grundlage des Referenzjahrs

Klima	Außentemperatur (°C)	Südliche Sonneneinstrahlung (Wh/m <sup>2</sup> Tag)
Winter (Jan)	-1,0 ± 2,5	4142
Übergangszeit (Apr)	6 ± 4,5	5466
Sommer (Jul)	16 ± 6	4965

### Auslegungskriterien:



Tabelle 4: Kriterien für die thermische Auslegung (Kategorie B) [29][15]

	Sommer	Winter
Operative Temperatur	24,5 ± 1,5 °C	22 ± 2 °C
Mittlere Luftgeschwindigkeit	0,22 m/s	0,18 m/s
Vertikaler Temperaturgradient	< 3 °C	

Tabelle 5: Kriterien für die Raumlufthausqualität [30]

	Luftstrom pro Person $q_p$	Gebäudeemissionen $q_B$ (Gebäude mit sehr geringem Schadstoffgehalt)
Luftwechselrate	5 l/s/Person	0,35 l/s m <sup>2</sup>

### Konstruktionsverfahren:

- a) Es wird ein vereinfachtes Verfahren eingesetzt, um die Luftwechselrate und die Kälte-/Wärmelast des Gebläsekonvektors zu schätzen. Dieses Berechnungsverfahren basiert auf der Energiebilanz des Raums während eines Zeitraums von 24 Stunden. Auch die Wärmeentwicklung im Raum wird dabei berücksichtigt [31]. Dieses Verfahren wurde modifiziert, um die 24 Stunden in einen Zeitraum mit und ohne anwesende Personen zu unterteilen. Der Raum wird in jedem Zeitraum über einen konstanten Luftstrom belüftet (kann bei Zeiträumen mit und ohne anwesende Personen unterschiedlich sein). Die Raumtemperatur sollte nur während des Zeitraums mit anwesenden Personen die thermischen Auslegungskriterien erfüllen. Die Zulufttemperatur der Lüftungsanlage entspricht der Außenlufttemperatur.

Die Mindestluftwechselrate wird auf Grundlage der erforderlichen Luftqualität berechnet (wird durch die folgende Gleichung ausgedrückt):

$$q_{\text{tot}} = n \times q_p + A \times q_B = 28 \times 5 + 0,35 \times (6 \times 10) = 161 \text{ l/s} = 3,45 \text{ h}^{-1}$$

Die maximale Luftwechselrate beträgt 6 h<sup>-1</sup>, was für die Nachtkühlung die effizienteste Rate ist.

Tabelle 6: Erforderliche Luftwechselrate und Wärme-/Kältelast des Gebläsekonvektors

Fall	Klima	Luftwechselrate Zeitraum anwesende Personen [h <sup>-1</sup> ]	Luftwechselrate Zeitraum nicht anwesende Personen [h <sup>-1</sup> ]	Verschattungsfaktor	Wärme-/Kälteleistung des Gebläsekonvektors [kWh/Tag]	Berechnete T <sub>Raum</sub> Zeitraum anwesende Personen [°C]	Berechnete T <sub>Raum</sub> Zeitraum nicht anwesende Personen [°C]
1	Winter	3,45	0	1 (Keine Verschattung)	+2,4	22 ± 1,5	14 ± 0,2
2	Übergangszeit	4,8	2	1 (Keine Verschattung)	0	23 ± 1,6	10,2 ± 0,6
3	Sommer	6	6	1 (Keine Verschattung)	-17,5	24 ± 1,8	16,4 ± 1,2
4	Sommer	6	6	0,3 (Außenjalousie)	-5,8	24 ± 1,1	15,4 ± 1,2

Die Luftwechselrate und die Wärme-/Kältelast des Gebläsekonvektors sind in Tabelle 6 für jede Jahreszeit angegeben. Die Raumluftqualität während des Zeitraums mit anwesenden Personen liegt im komfortablen Bereich. Es ist zu beachten, dass die Verschattung im Sommer oder in der Übergangszeit einen wichtigen Parameter darstellt. Durch die Verwendung einer Sonnenschutzvorrichtung kann die Zunahme der Sonnenwärme erheblich verringert werden. Zudem lässt sich die Kältelast des Gebläsekonvektors um die Hälfte reduzieren.

#### Konstruktion der Anlage für die diffuse Deckenlüftung

- Auswahl der Deckenplatten:

Die Grundfläche des Klassenzimmers beträgt  $60 \text{ m}^2$  und die Tiefe 10 m. Um eine ungleichmäßige Luftverteilung durch die Deckenplatten zu vermeiden, wird empfohlen, Deckenplatten mit einem höheren Druckabfall zu verwenden oder aktive mit passiven Deckenplatten zu kombinieren (siehe Abbildung 3). Im letzteren Fall werden sowohl die aktiven zementgebundenen Holzwolleleichtbauplatten als auch die passiven Platten mit einer zusätzlichen Schicht aus Mineralwolle als Decke für die diffuse Lüftung verwendet. Die Schicht aus Mineralwolle kann die akustischen Eigenschaften verbessern und ermöglicht die Regelung der Luftverteilung im Raum.

- Öffnungsbereich für die diffuse Deckenlüftung und Anordnung der Öffnung

Die aktiven Platten sollten gleichmäßig verteilt und mindestens 10 % des Deckenbereichs ausmachen.

- Höhe des Hohlraums

Die Höhe des Hohlraums sollte mindestens 20 cm betragen, um eine gleichmäßige Luftverteilung durch die Decke für die diffuse Lüftung sicherzustellen. In diesem Fall wird der Gebläsekonvektor als Heiz-/Kühlanlage eingesetzt. Der Hohlraum muss ausreichend hoch sein, damit genug Platz für die Montage des Gebläsekonvektors vorhanden ist.

- Hohlraumeinlass

Aufgrund der hohen Luftwechselrate und der großen Raumgröße ist die Anlage für eine mechanische Belüftung ausgelegt. Um eine gleichmäßige Luftverteilung im Hohlraum sicherzustellen, wird ein Luftkanal zum Verteilen der Luft in einem Teil des Hohlraums verwendet. Mehrere Einlässe sind an den Luftkanal angeschlossen und leiten die Luft im Hohlraum in verschiedene Richtungen.

## QUELLEN

- [1] C. Zhang, P. Heiselberg und P. V. Nielsen, „Diffuse Ceiling Ventilation: A Review“, *International Journal of Ventilation*, Vol. 13, Nr. 1, S. 49–63, 2014.
- [2] C. A. Hviid und S. Terkildsen, „Experimental study of diffuse ceiling ventilation in classroom“, in *33<sup>rd</sup> AIVC Conference, 2<sup>nd</sup> TightVent Conference*, 2012.
- [3] C. Zhang, P. K. Heiselberg, M. Pomianowski, T. Yu und R. L. Jensen, „Experimental study of diffuse ceiling ventilation coupled with a thermally activated building construction in an office room“, *Energy and Buildings*, Vol. 105, S. 60–70, 2015.
- [4] C. Zhang, M. H. Kristensen, J. S. Jensen, P. K. Heiselberg, R. L. Jensen und M. Pomianowski, „Parametrical analysis on the diffuse ceiling ventilation by experimental and numerical studies“, *Energy and Buildings*, Vol. 111, S. 87–97, 2016.
- [5] P. V. Nielsen, R. L. Jensen und L. Rong, „Diffuse Ceiling Inlet Systems and the Room Air Distribution“, in *Clima 2010: 10<sup>th</sup> REHVA World Congress*, 2010.
- [6] J. Fan, C. A. Hviid und H. Yang, „Performance analysis of a new design of office diffuse ceiling ventilation system“, *Energy and Buildings*, Vol. 59, S. 73–81, Apr. 2013.
- [7] C. A. Hviid und S. Svendsen, „Experimental study of perforated suspended ceilings as diffuse ventilation air inlets“, *Energy and Buildings*, Vol. 56, S. 160–168, 2013.
- [8] P. V. Nielsen und E. Jakubowska, „The Performance of Diffuse Ceiling Inlet and other Room Air Distribution Systems“, in *Cold Climate HVAC*, 2009.
- [9] P. V. Nielsen, „The 'Family Tree' of Air Distribution Systems“, in *Roomvent*, S. 12, 2011.
- [10] CIBSE, *AM13 Mixed Mode Ventilation*. 2000.
- [11] CIBSE, *Energy Efficiency in Buildings*. 2004.
- [12] C. A. Hviid und S. Svendsen, „Experimental study of perforated suspended ceilings as diffuse ventilation air inlets“, *Energy and Buildings*, Vol. 56, S. 160–168, Jan. 2013.
- [13] R. W. Vilsboll, „Diffuse ceiling ventilation - Experimental and numerical analysis based on variation of room geometry and heat load distribution“, Fachbereich Bauingenieurwesen, Universität Aalborg, 2014.
- [14] A. D. Chodor und P. P. Taradajko, „Experimental and Numerical Analysis of Diffuse Ceiling Ventilation“, Fachbereich Bauingenieurwesen, Universität Aalborg, 2013.
- [15] Internationale Norm, „ISO 7730:2005 Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria“, 2005.
- [16] P. Jacobs und B. Knoll, „Diffuse ceiling ventilation for fresh classrooms“, in *4<sup>th</sup> International Symposium on Building and Ductwork Air Tightness*, S. 1–7, 2009.
- [17] N. Artmann, H. Manz und P. Heiselberg, „Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe“, *Applied Energy*, Vol. 84, Nr. 2, S. 187–201, Feb. 2007.
- [18] H. Jin, F. Bauman und T. Webster, „Testing and modeling of underfloor air supply plenums“, *ASHRAE Transactions*, Vol. 112, Nr. 2, S. 581–591, 2006.

- [19] F. S. Bauman, *Underfloor Air Distribution (UFAD) Design Guide*. USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2013.
- [20] C. Zhang, P. Heiselberg, Q. Chen, M. Pomianowski und T. Yu, „Numerical study of an integrated system with diffuse ceiling ventilation and thermally activated building constructions“, 2016.
- [21] P. V. Nielsen und E. Jakubowska, „The Performance of Diffuse Ceiling Inlet and other Room Air Distribution Systems“, in *Cold Climate HVAC*, 2009.
- [22] G. S. Okochi und Y. Yao, „A review of recent developments and technological advancements of variable-air-volume (VAV) air-conditioning systems“, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 59, S. 784–817, 2016.
- [23] „Variable Air Volume (VAV)“, 2014.
- [24] Wikipedia, „Variable air volume“, 2016.
- [25] KRUEGER, „Fan coil engineering“, S. 1–15.
- [26] LTG Aktiengesellschaft, „Ceiling-mount fan coil unit - VKE - LTG Aktiengesellschaft“, 2016.
- [27] CIBSE, *CIBSE TM43: Fan Coil Units*. 2008.
- [28] M. H. Kristensen und J. S. Jensen, „Impact of diffuse ceiling ventilation systems on indoor environmental quality in classrooms“, Universität Aalborg, 2015.
- [29] Europäische Norm, „EN 15251 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics“, Brüssel, 2007.
- [30] Dänisches Ministerium für Wirtschaft, Handel und Industrie, *Building Regulations* 2010. 2010.
- [31] A. U. Danish Building Research Institute, „Simple method for calculation of 24 hour average temperatures in buildings“, in *SBI-Direction* 196, 2000.

