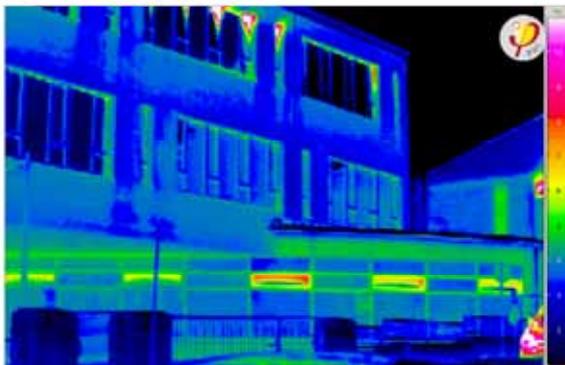


Leitfaden für energie- effiziente Bildungsgebäude



Autoren:

Oliver Kah
Tanja Schulz
Susanne Winkel
Dr. Jürgen Schnieders
Zeno Bastian
Dr. Berthold Kaufmann

Darmstadt, Juli 2010

Die Veröffentlichung wurde erstellt vom:

Passivhaus Institut
Dr. Wolfgang Feist
Rheinstr. 44/46
D-64283 Darmstadt
www.passiv.de

im Auftrag des
Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz und mit Mitteln
des EU-Fonds (EFRE)

Inhaltliche Eingrenzung / Haftungsausschluss

Diese Veröffentlichung befasst sich vor allem mit dem Teilbereich der energetischen Aspekte von Bildungsgebäuden. Sie erhebt daher nicht den Anspruch, auch sämtliche anderen für die Planung und Realisierung von Schulen, Schulsportanlagen und Kindertagesstätten wichtigen Aspekte abzudecken.

Der Inhalt dieser Veröffentlichung wurde mit größter Sorgfalt und nach bestem Wissen und Gewissen zusammengestellt. Hinsichtlich der Verwendung von gezeigten Informationen muss dennoch jeder die Anforderungen von Gesetzen, Normen oder Verordnungen eigenverantwortlich überprüfen. Jegliche Haftung für die Richtigkeit und Vollständigkeit der Inhalte und Daten sowie insbesondere für eventuelle Schäden oder Konsequenzen, die durch die Nutzung des dargestellten Wissensstoffes entstehen, ist ausgeschlossen.

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis.....	1
2	Einleitung	1
3	Häufige Fragen zu energieeffizienten Schulen, Kindertagesstätten und Schulsporthallen in Kürze	4
4	Gebäudeentwurf.....	13
4.1	Der Passivhaus-Standard.....	13
4.2	Entwurf, Zonierung und Orientierung.....	16
4.3	Bauweise	20
4.4	Tageslichtnutzung.....	21
5	Gebäudehülle.....	22
5.1	Außenwände.....	22
5.2	Fenster und Verglasungen	35
5.3	Dächer	51
5.4	Kalte Keller	66
5.5	Bodenplattendämmung.....	75
5.6	Hocheffiziente Gebäudehülle in Kürze	79
6	Lüftung	82
6.1	Luftqualität	83
6.2	Messungen zur Raumluftqualität	84
6.3	Dimensionierung der Lüftung.....	92
6.4	Konzepte zur kontrollierten Lüftung mit Wärmerückgewinnung.....	93
6.5	Betrieb der kontrollierten Lüftung.....	111
6.6	Küchen.....	113
6.7	Effiziente Lüftung in Kürze.....	118
7	Heizung.....	121
7.1	Beheizung.....	121
7.2	Beheizungssonderfall: Sporthalle	127
7.3	Trinkwarmwasser-Versorgung.....	131
7.4	Wärmeversorgung	133
7.5	Verteilverluste sowie Heizungs- und Zirkulationspumpen	134
7.6	Betrieb / Regelung.....	135

7.7	Heizung für energieeffiziente Bildungsgebäude in Kürze	137
8	Sommerbetrieb.....	139
8.1	Temperaturverhalten im Sommer	139
8.2	Lüftung im Sommer	147
8.3	Sonnenschutz	149
8.4	Nachtlüftung.....	152
8.5	Begrenzung interner Lasten	157
8.6	Zusätzliche Kühlstrategien für den Sommer.....	158
8.7	Sommerbetrieb in Kürze	159
9	Stromanwendungen	160
9.1	Kunstlicht	160
9.2	Weitere Stromanwendungen	162
10	Energetische Bilanzierung	163
11	Anhang.....	166
11.1	Messkampagne in einer Grundschule zur Feinstaubbelastung.....	166
11.2	Herleitung der Passivhaus-Anforderung bei Schulsporthallen	178
12	Literatur.....	181

2 Einleitung

Die Kinderbetreuung soll in den nächsten Jahren deutlich ausgebaut werden. Bis zum Jahr 2013 soll z.B. für jedes dritte Kind unter drei Jahren ein Betreuungsplatz entstehen (gegenüber 2007 wären dies etwa 500.000 neue Betreuungsplätze). Gleichzeitig werden verstärkt Ganztagsbetreuungen angeboten.

In Deutschland gibt es mehr als 40.000 Schulen, von denen eine Vielzahl sanierungsbedürftig ist. Der Ausbau der Ganztagschule mit Speisenangeboten erfordert darüber hinaus die Bereitstellung geeigneter Einrichtungen.

Im Bereich der Bildungsgebäude besteht akuter Bau- und Modernisierungsbedarf. Mit einer Baumaßnahme wird heute der Energiebedarf für Raumheizung und Warmwasser für die nächsten 30 bis 40 Jahre festgelegt. Gerade in Schulen, Kindertagesstätten und Sporthallen können Energieeffizienz und Komfortverbesserung unmittelbar erlebt werden und durch Nachahmung in der Region verstärkt Verbreitung finden. Kommunen sollen daher speziell in diesem Bereich ihre Vorbildfunktion wahrnehmen.

Der vorliegende Leitfaden richtet sich mit Themen rund um Energieeffizienz und Komfort bei Bildungsgebäuden an interessierte Bauverwaltungen, Planer und Baubeteiligte. Argumente für mehr Energieeffizienz, Beispiele und praxisnahes Know-how sollen beim Planungs- und Bauprozess unterstützen.

In diesem Leitfaden sollen die Besonderheiten bei energieeffizienten Schulen, Kindertagesstätten und Schulsportstätten behandelt werden. Charakteristisch für Schulen und Kindertagesstätten sind hohe Belegungsdichten in den Aufenthaltsräumen und in der Regel (z.B. im Vergleich zu Bürogebäuden) eher kurze Nutzungszeiten. Die Sporthallen mit großen Raumhöhen und in der Regel geringeren Belegungsdichten unterscheiden sich dabei von den vorher genannten Gebäudetypen.

Was sind energieeffiziente Bildungsgebäude?

Die Europäische Kommission fordert von den europäischen Mitgliedsstaaten bis zum Jahr 2020 die Einführung eines jeweils nationalen Niedrigstenergiestandards für Neubauten und umfassend zu renovierende Gebäude (novellierte "EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden). Bei öffentlichen Gebäuden soll diese Verpflichtung bereits 2018 gelten. Für das Jahr 2012 ist in der Bundesrepublik bereits eine erneute Novellierung der Energieeinsparverordnung angekündigt. Die Zeichen stehen auf Energieeffizienz!

Bildungsgebäude haben Vorbildfunktion und werden für die Zukunft gebaut. Dementsprechend gehen die im Folgenden beschriebenen Effizienzmaßnahmen deutlich über das heute übliche Maß hinaus. Eine Vielzahl inzwischen gebauter

Bildungsgebäude beweist, dass der Passivhaus-Standard im Neubau insbesondere bei den hier betrachteten Nutzungen Energieeinsparung und Komfortverbesserung zusammenbringt. Die folgenden Empfehlungen zu energieeffizienten Bildungsgebäuden im Neubau orientieren sich daher am Passivhaus-Standard.

Bei der Modernisierung gilt: Gelegenheiten nutzen! Erneuerungs- oder Instandhaltungsmaßnahmen umfassend nutzen, um dann auch gleich möglichst weitgehend den wärmetechnischen Zustand zu verbessern (vgl. [AkkP 39]). Denn für energetisch nur mäßig sanierte Bauteile lohnt in der Regel eine zukünftige energetische Verbesserung nicht mehr: heute mäßig sanierte Bauteile sind die zukünftigen Problemfälle. Dabei spielt der Zeitpunkt der Sanierung eine geringere Rolle, sofern weitgehende Effizienzverbesserungen erzielt werden. Wie Wirtschaftlichkeitsrechnungen auf Basis von Lebenszyklusbetrachtungen zeigen, haben sich die wirtschaftlich optimalen Maßnahmen deutlich hin zu verbesserter Effizienz verschoben (vgl. [Kah et al 2008]). Passivhausübliche Dämmstärken und Fenster mit Dreischeiben-Wärmeschutzverglasungen liegen heute, bereits ohne öffentliche Förderungen, im wirtschaftlichen Bereich.

Zentrales Thema: Raumluftqualität

Zahlreiche Untersuchungen belegen mangelhafte Luftqualität in Schulen und Kindertagesstätten. Aufgrund der hohen Belegungsdichten ist häufig ein ausreichendes Lüften über Fenster kaum zu realisieren. Hinzu kommt, dass es bei den erforderlichen hohen Luftmengen schnell zu Zugerscheinungen kommt. Dabei sollte uns die Luftqualität in Bildungsgebäuden besonders wichtig sein. Kinder sind nachweislich empfindlicher gegenüber Innenraumluftbelastungen, da sie im Verhältnis zu ihrem Gewicht höhere Luftmengen einatmen und ihre Organe sich noch im Wachstum befinden (vgl. [Faustman et al. 2000], [Landrigan 1998]).

Aus diesen Erfahrungen wurde die Erkenntnis gewonnen, dass eine gute Luftqualität in Schulen und Kindertagesstätten praktikabel nur über eine kontrollierte Lüftung gesichert werden kann.

Neben der Verbesserung der Luftqualität spart die effiziente Lüftung mit Wärmerückgewinnung, als zentrale Komponente im Passivhaus-Standard, auch beträchtlich Energie. Dieser Leitfaden befasst sich daher auch intensiv mit den Themenkreisen Luftqualität und Konzepte zur effizienten kontrollierten Lüftung.

Win-Win-Situation für Kommunen

Die Vorteile von Maßnahmen zur Effizienzverbesserung bei Gebäuden sind überzeugend und beschränken sich nicht nur auf die resultierende

Energieeinsparung. Wichtig bei Investitionsentscheidungen sind insbesondere folgende Aspekte:

- **Komfort:** Eine kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung verbessert nachhaltig die Luftqualität in Schulen und in Kindertagesstätten. Zudem sorgt insbesondere bei Bestandsgebäuden ein guter Wärmeschutz für behaglichere und gesündere Verhältnisse.
- **Schutz der Bausubstanz:** Ein verbesserter Wärmeschutz schützt die Bausubstanz und führt zu einer Wertsteigerung des Objekts. Eine besondere Problematik in Altbauten stellt der Schimmelbefall dar. Untersuchungen zeigten, dass Pilzwachstum auch bereits vor einer Tauwasserbildung auftreten kann (vgl. z.B. [Sedlbauer 2002]). Besonders kritisch sind die Verhältnisse, wenn Möbel vor Außenwänden oder Außenwandkanten stehen. Ein guter Wärmeschutz und eine kontrollierte Be- und Entlüftung helfen auch hier dauerhaft Pilzbefall zu vermeiden.
- **Beitrag zum Klimaschutz:** Ein bedeutender Anteil des Energieeinsatzes in Deutschland wird in Gebäuden für Niedertemperaturwärme, insbesondere für Heizzwecke verwendet. Die Reduzierung des Energiebedarfs und damit der CO₂-Emissionen ist ein aktiver Beitrag zum Klimaschutz.
- **Planungssicherheit bzgl. Betriebskostenentwicklung:** Ein verringerter Energiebedarf macht unabhängiger von zukünftigen Energiepreisentwicklungen und bedeutet auch mehr Planungssicherheit hinsichtlich der zukünftigen Betriebskosten. Ein etwaiger Umstieg auf nachhaltige Energiequellen wird durch einen stark verminderten Bedarf erst möglich.
- **Regionale Wirtschaftsförderung:** Die Alternative zur Dienstleistung Energiebezug, die vor allem zu Rohstoffimporten führt, sind Investitionen in Energieeffizienz. Die Wertschöpfung für Wärmeschutzmaßnahmen erfolgt fast ausschließlich im Inland, und dort wieder im mittelständischen Handwerk; die hier angesiedelten Betriebe haben eine sehr hohe Arbeitsplatzintensität, so dass Maßnahmen zur Energieeffizienz eine bedeutende Beschäftigungswirkung haben.
- **Wirtschaftlichkeit der Energieeffizienz-Maßnahmen:** Passivhausübliche Wärmedämmstärken und Fenster mit Dreischeiben-Wärmeschutzverglasungen sind auch ohne Förderung wirtschaftlich (vgl. [Kah et al. 2008]). Die zusätzlichen Investitionsmittel für eine kontrollierte Lüftung bleiben bei zweckmäßiger Planung im Rahmen und sind, aufgrund der Energieeinsparung, im Gesamtkonzept wirtschaftlich darstellbar (vgl. [Bretzke 2009], [Baumgärtner 2009]). [Baumgärtner 2009] ermittelte anhand der nachgewiesenen Betriebskosteneinsparung einer Passivhaus-Schule, dass im Lebenszyklus eine Mehrinvestition in Höhe von 6 bis 9% der Baukosten refinanziert werden kann.

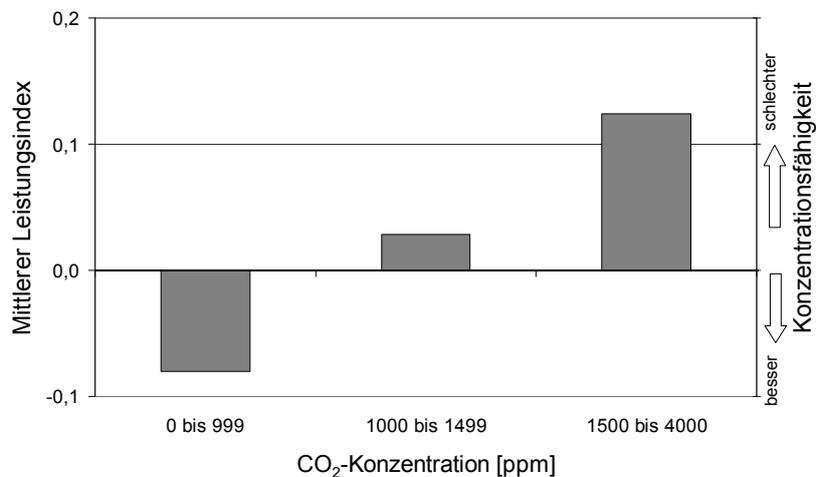
3 Häufige Fragen zu energieeffizienten Schulen, Kindertagesstätten und Schulsporthallen in Kürze

Warum hat die Lüftung eine zentrale Bedeutung bei Schulen und Kindertagesstätten?

Schulen und Kindertagesstätten haben im Vergleich zu Wohn- und Bürobauten eine abweichende charakteristische Nutzung mit hohen Belegungsdichten und eher kurzen Nutzungszeiten. Ein Grundproblem bei hohen Belegungsdichten ist die ausreichende Außenluftzufuhr. Zahlreiche Untersuchungen belegen, dass es gerade in Schulen an guter Luft mangelt. Dabei sollte, wie oben angeführt, insbesondere die Luftqualität in Schulen und Kindertagesstätten ein Anliegen sein. Nicht nur in Deutschland ist dieses Problem bekannt. Erste Untersuchungen hierzu wurden in den USA durchgeführt.

Es wurde untersucht, welchen Einfluss unzulängliche Luftqualität auf die Gesundheit und die Leistungsfähigkeit hat. [Myhrvold et al. 1996] konnten einen Zusammenhang zwischen der Konzentrationsfähigkeit und der Luftqualität (anhand der Leitgröße Kohlendioxid) nachweisen.

Abbildung 1: Leistungsindex und CO₂-Konzentration. Positive Werte korrespondieren mit schwacher Leistung und negative Werte mit guter Leistung (N=548, Diagramm nach [Myhrvold et al.1996]).



Wie Untersuchungen weiter zeigen, tritt das Problem mit der mangelnden Luftqualität vor allem im Winter auf, denn in der Regel lässt sich die schlechte Luft besser ertragen als eine Zugbeeinträchtigung. Bei reinem Fensterlüften muss ausreichend oft über Fenster gelüftet werden, damit sich eine gute Luftqualität einstellt. Dazu ist ein Fensterlüften nach Plan erforderlich, was auch in Forschungsarbeiten unter dem Stichwort „motivierte Fensterlüftung“ getestet wurde.

Mit unterschiedlichen Ansätzen wird versucht, die Raumluftqualität in Bildungsgebäuden zu verbessern. Die „motivierte Fensterlüftung“ setzt auf einen ausreichenden Außenluftwechsel durch gezieltes Lüften der Nutzer nach Zeitplan oder durch Warnmeldungen bei geringer Luftqualität durch sogenannte „Lüftungsampeln“.

Weiter gibt es Konzepte, über motorische Klappen kontrolliert natürlich zu lüften. Und es gibt Versuche, eine natürliche Lüftung durch eine kontrollierte mechanische Lüftung zu ergänzen, sogenannte hybride Lüftungskonzepte.

Die Steuerung der Luftmengen ist bei Konzepten mit natürlicher Lüftung aufgrund der schwankenden Antriebskräfte (Wind, Temperaturunterschiede) zudem eine Herausforderung. Eine Wärmerückgewinnung ist in der Regel aufgrund des Strömungswiderstands kaum möglich.

Die möglichst zugfreie Einbringung der Außenluft ist eine zusätzliche Herausforderung. Im Winter ist es vor allem eine Frage der Zulufttemperatur. Eine Möglichkeit bei natürlichen Lüftungskonzepten stellt die Erwärmung über geeignet angeordnete Heizflächen dar. Darüber hinaus sollten maximale Strömungsgeschwindigkeiten nicht überschritten werden, was aufgrund der schwankenden natürlichen Antriebskräfte kritisch ist.

Dagegen ist die kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung, als zentrale Haustechnik-Komponente im Passivhaus-Standard, eine ideale Lösung für Schulen und Kindertagesstätten. Die kontrollierte Lüftung sorgt ständig für ausreichend Außenluft und die Wärmerückgewinnung vermeidet zu geringe Zulufttemperaturen. Zahlreiche Erfahrungen aus realisierten Projekten mit kontrollierter Lüftung stützen diese Erkenntnis.

Die Notwendigkeit der kontrollierten Lüftung und die Bedeutung für die Raumluftqualität in Schulen wurden auch in Dänemark erkannt. Seit 1995 regelt eine Baurichtlinie (vgl. [BR 1995]), dass Unterrichtsräume eine Zu- und Abluftanlage haben müssen.

Ist eine hocheffiziente Wärmerückgewinnung bei den gebräuchlichen hohen Belegungsdichten sinnvoll?

Es wird die Frage diskutiert, ob in Schulen und Kindertagesstätten hohe Wärmebereitstellungsgrade überhaupt erforderlich sind. Schließlich sorgen die Kinder für hohe interne Gewinne, da könnte eine „zu gute“ Wärmerückgewinnung ggf. zu einem Kühlbedarf führen. Sollten 60 % nicht reichen?

Eine große Anzahl von Personen braucht entsprechend hohe Luftmengen, welche auch im Winter ohne Zugerscheinungen eingebracht werden müssen. Wie die Ergebnisse mit der Fensterlüftung zeigen, wird im Winter in der Regel lieber die schlechte Luft als der Zug im Nacken ertragen. Zuluft mit Temperaturen um 17 °C kann noch mit vertretbarem Zugluftrisiko eingebracht werden (vgl. [EN ISO 7730], [DIN 13799]), mit geringeren Zulufttemperaturen steigt die zu erwartende Unzufriedenheit deutlich an.

Mit welchen Zulufttemperaturen wäre denn bei nur mäßiger Wärmerückgewinnung zu rechnen? Bei einer typischen Tagestemperatur in der Heizzeit von 5 °C würde eine mäßige Wärmerückgewinnung von 60 % die Zuluft auf lediglich 14,6 °C erwärmen (Annahme Ablufttemperatur 21 °C). Eine vertretbare Zulufttemperatur um 17 °C, welche eine zugfreie Einbringung zulassen würde, würde sich sogar erst ab 11 °C Außentemperatur einstellen. Schon aus Gründen der Behaglichkeit scheint daher in deutschen Wintern eine effizientere Wärmerückgewinnung sinnvoll zu sein.

Aber erhöht die effiziente Wärmerückgewinnung nicht den Kühlbedarf in Räumen mit hohen Belegungsdichten? Im Prinzip schon, wenn in Übergangszeiten ohne Heizwärmebedarf weiterhin nur über die Lüftung mit Wärmerückgewinnung gelüftet wird. Dies würde genauso geschehen, wenn an milden sonnigen Tagen in natürlich belüfteten Räumen die Fenster geschlossen blieben. In der Regel werden die Fenster dann aber doch geöffnet und das „Kühlpotential“ der Außenluft kommt zum Einsatz. Mit Wärmerückgewinnung wird die Heizzeit also einfach etwas kürzer.

Mit der kontrollierten Lüftung mit effizienter Wärmerückgewinnung können gleich zwei Anforderungen in dicht belegten Räumen erfüllt werden. Sie sorgt für eine gute Luftqualität und gleichzeitig für thermischen Komfort.

Ebenso verbessert eine kontrollierte Lüftung die Luftqualität in Sporthallen. Die Nebenräume wie Duschen und Umkleiden werden in der Regel auch bei konventionellen Sporthallen kontrolliert belüftet. Mit dem einfachen Konzept der gerichteten Durchströmung (vgl. Abschnitt 6.4.4) kann mit einem Lüftungsgerät mit vergleichbarer Größe mit nur geringem Mehraufwand auch die gesamte Sporthalle be- und entlüftet werden.

Hat eine kontrollierte Lüftung Einfluss auf eine etwaige Feinstaubbelastung?

Seit einiger Zeit steht die Feinstaubbelastung verstärkt in der öffentlichen Diskussion. Ein Grund hierfür war die Umsetzung der EU-Richtlinie 96/62/EG zur Feinstaubbelastung in der Außenluft, woraufhin vermehrt Messungen in Innenräumen und insbesondere in Schulen durchgeführt wurden. Aufgrund der unterschiedlichen Quellen der Feinstaubpartikel innen und außen, sind sie in Ihrer Wirkung nicht direkt vergleichbar. Die konkrete Gefährdung durch Feinstaubpartikel im Innenraum ist noch in der Diskussion, wobei die Innenraumlufthygiene-Kommission des UBA feststellt (vgl. [IRK 2007]), „dass erhöhte Feinstaubkonzentrationen in Innenräumen hygienisch unerwünscht sind (...). Eine Verringerung der Staubkonzentration der Luft dient damit der Vorsorge vor vermeidbaren Belastungen.“ Wie Messungen im Rahmen dieses Leitfadens in zwei Grundschulklassen zeigten, verringert eine kontrollierte Lüftung durch einen ausreichenden kontinuierlichen Luftaustausch auch signifikant die Feinstaubbelastung (vgl. Abschnitt 6.2).

Ist ein guter Wärmeschutz auch bei Schulen und Kindertagesstätten angemessen?

Eine vereinfachende stationäre Bilanzierung von Gewinnen und Verlusten in einer Schule oder einer Kindertagesstätte kann zu der Annahme verleiten, dass diese Gebäudetypen allein durch die anwesenden Personen warm bleiben und daher ein guter Wärmeschutz und eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung unnötig seien.

Zur Klärung dieser Frage ist jedoch eine stationäre Betrachtung nicht zielführend, da sich das Schulgebäude aufgrund des intermittierenden Betriebs ständig in Aufheiz- bzw. Abkühlphasen befindet. Die „kalte“ Gebäudekonstruktion muss am Morgen auf Temperatur gebracht werden, ein Teil der Heizleistung und internen Gewinne dient dem „Aufladen“ der wärmespeichernden Konstruktion. Hinzu kommt, dass am Abend und am Wochenende, und in Schulen auch während Fachstunden (die Schüler sind zu diesen Zeiten nicht im Klassenraum, sondern im Fachraum bzw. der Sporthalle), die internen Gewinne fehlen und die warme Konstruktion zu diesen Zeiten wieder entladen wird.

Daher wurden im Rahmen dieses Leitfadens dynamische Simulationsrechnungen für ein Schulgebäude durchgeführt. Dabei wurden für jeden Zeitschritt die Gewinne (Personenabwärme, Beleuchtung, Solarstrahlung) und die Lüftungs- bzw. Transmissionswärmeverluste berücksichtigt. Steht zu viel freie Wärme (solare und interne Gewinne) zur Verfügung, dann nimmt der Heizwärmebedarf nicht mehr proportional zur Reduzierung der Wärmeverluste ab. Der Ausnutzungsgrad der freien Wärme nimmt ab und die Reduzierung der Wärmeverluste wirkt sich nicht in vollem Umfang als Heizwärmeeinsparung aus. Abbildung 2 zeigt den resultierenden Heizwärmebedarf in Abhängigkeit von der Reduzierung der Wärmeverluste.

Wie die dynamischen Simulationsrechnungen für ein Schulgebäude zeigen, ist die mit der Passivhaus-Bauweise verbundene Verringerung der Wärmeverluste noch in vollem Umfang als Heizwärme-Einsparung nutzbar, der Heizwärme-Kennwert nimmt nahezu proportional mit der Reduzierung der Wärmeverluste ab (Anmerkung: die Heizwärme-Einsparung fällt lediglich um 2 % geringer aus als die Summe der reduzierten Wärmeverluste).

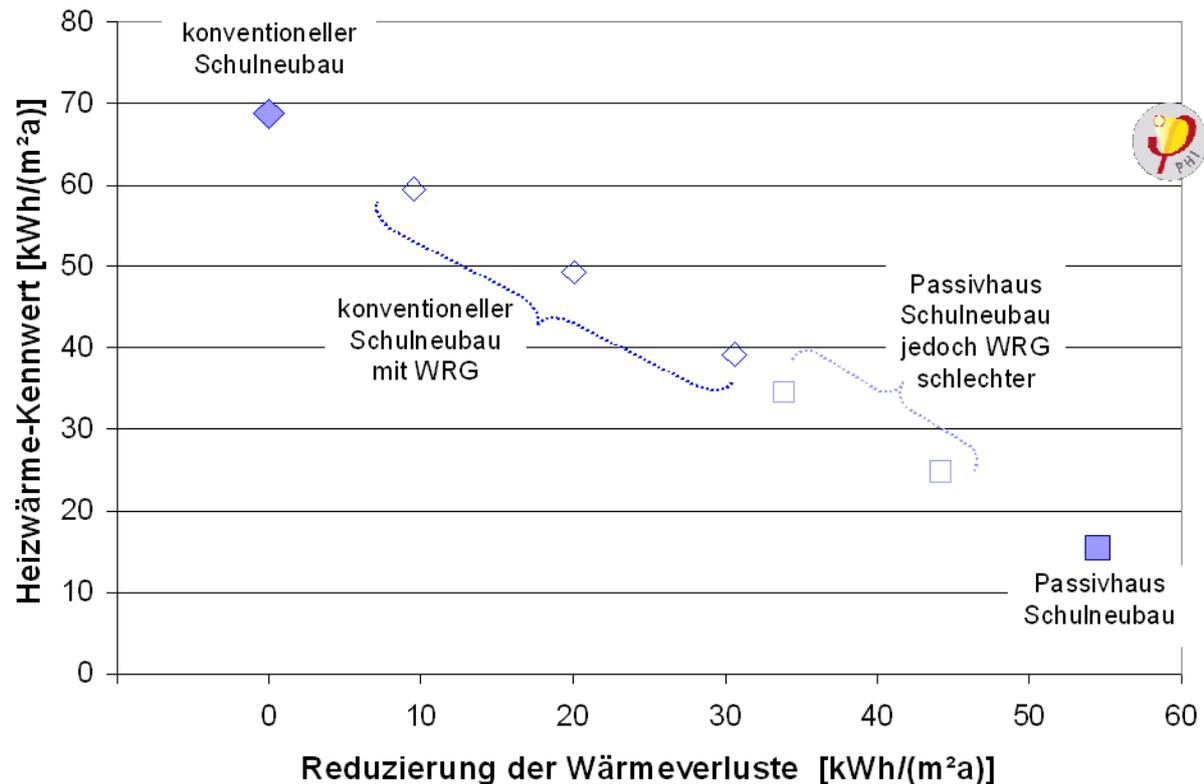


Abbildung 2: Mit dynamischen Simulationsrechnungen ermittelter Heizwärmebedarf in einem Schulgebäude. Der Heizwärme-Kennwert nimmt nahezu proportional mit der Reduzierung der Wärmeverluste ab. Der verbesserte Wärmeschutz und die Lüftung mit Wärmerückgewinnung (beim Passivhaus-Standard) wirken sich in vollem Umfang als Heizwärmeeinsparung aus. (Quelle: PHI)

Was passiert im Sommer?

Zum Teil wird vermutet, dass der gute Wärmeschutz in Verbindung mit den hohen internen Gewinnen im Sommer zu Problemen führt. Um diese Frage genauer zu untersuchen, wurden systematische Simulationsrechnungen durchgeführt. Dabei wurde das Temperaturverhalten eines konventionellen Schulneubaus vergleichend mit dem einer Passivhaus-Schule untersucht.

Wie sich zeigte, sind drei Faktoren für den Sommer entscheidend:

- Sowohl Unterrichtsräume als auch Gruppenräume brauchen für gute Tageslichtbedingungen große Fensterflächen. Für den Sommerfall ist ein guter Sonnenschutz maßgeblich. Ohne Sonnenschutz können sich die internen Lasten durch die solare Einstrahlung mehr als verdoppeln.
- Im Sommer lüften, lüften, lüften. An den meisten Stunden im Sommer bietet die Außenluft ausreichendes Kühlpotential. In einem typischen Sommer treten nur etwa während 30 Schulstunden Außentemperaturen über 25°C auf

(Vormittagschule, Klimadatensatz Frankfurt). Bei Ganztagschulbetrieb sind es etwa 90 Stunden (bei Schulbetrieb bis 17:00 Uhr). In den restlichen Sommerstunden kann allein durch ausreichendes Lüften nahezu die niedrige Außentemperatur gehalten werden.

- Zur Pufferung von Temperaturspitzen sollten Bildungsgebäude ausreichend thermische Speicherkapazität aufweisen. In Hitzeperioden müssen die tags eingespeicherten Wärmelasten durch eine ausreichende Nachtlüftung abgeführt werden.

Die Simulationsergebnisse spiegeln diese Erkenntnisse wieder (vgl. Abschnitt 8.1). Ist ein guter Sonnenschutz vorhanden und wird ausreichend gelüftet, dann bleiben die Raumtemperaturen auch im Sommer in Schulen und Kindertagesstätten behaglich. Werden diese Strategien für beide Wärmeschutz-Standards angewendet, dann stellen sich nahezu identische Raumtemperaturverläufe ein. Messungen in einer Passivhaus-Grundschule (vgl. [Peper et al 2007]) bestätigen die guten Ergebnisse.

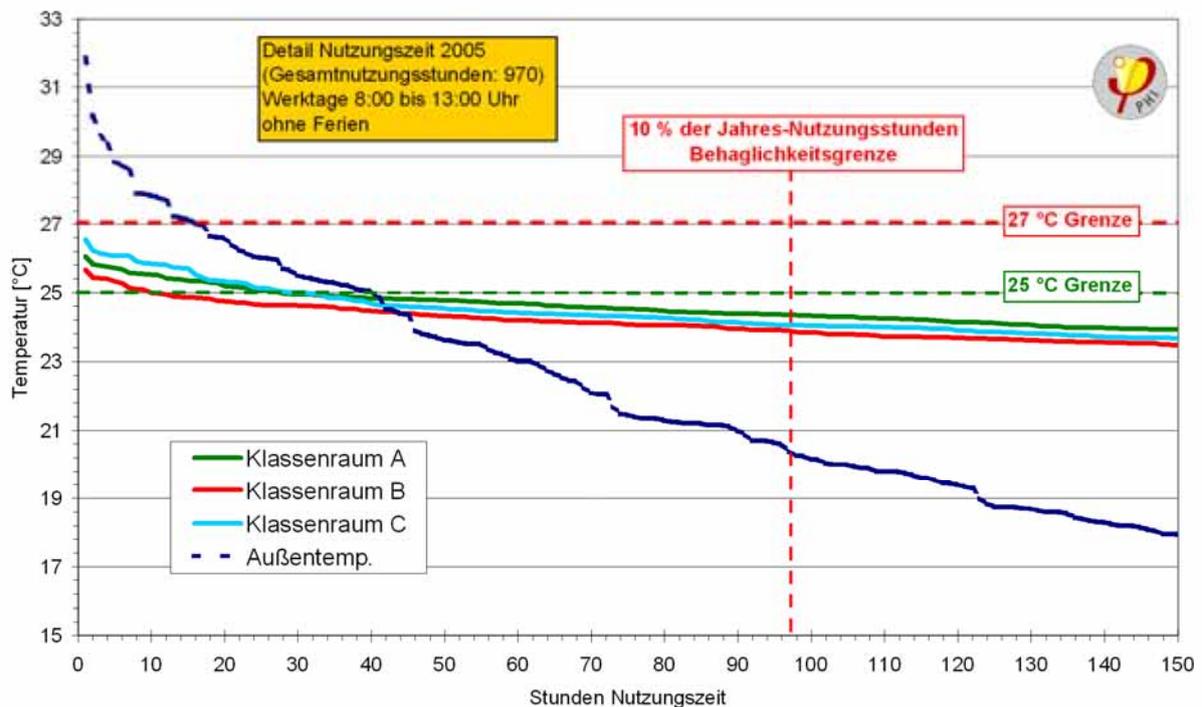


Abbildung 3: Jahresdauerlinie der gemessenen Raumtemperatur in einer Passivhaus-Grundschule. Die Raumtemperaturen bleiben auch im Sommer behaglich. (Quelle: [Peper et al 2007])

Sind die Wärmeverluste durch Eingangsbereiche relevant?

Eingangsbereiche von öffentlichen Gebäuden, wie Schulen und Kindertagesstätten, werden intensiv genutzt. Mit den häufigen Öffnungsvorgängen ist ein zusätzlicher Luftaustausch verbunden, der in der Heizzeit die Wärmeverluste ggf. relevant erhöhen kann. Mit einer Messkampagne in einer Schule (vgl. [Peper et al. 2007]) konnte der energetische Einfluss der Türöffnungsvorgänge abgeschätzt werden. Bezogen auf ein gesamtes Gebäude sind die zusätzlichen Lüftungswärmeverluste in der Regel gering, bei der untersuchten Schule wurde der zusätzliche Wärmeverlust zu $0,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ abgeschätzt. Speziell in Kindertagesstätten gibt es noch zusätzliche Gruppenraumtüren zum Außengelände. Wie die Erfahrung zeigt, werden im Kernwinter diese Türen kaum genutzt, schon um übermäßigen Schmutzeintrag zu vermeiden (im Winter wird der Eingang mit Trockenlaufzone genutzt). Übermäßige Wärmeverluste durch geöffnete Gruppenraumtüren sind vor diesem Hintergrund üblicherweise vernachlässigbar (vgl. Abschnitt 4.2).

Sollte bei kontrollierter Lüftung weiterhin Fensterlüftung möglich sein?

Auch in Passivhaus-Bildungsgebäuden ist es unerlässlich immer auch eine ausreichende Anzahl an Fenstern zur natürlichen Belüftung vorzusehen. Im Sommer ist eine natürliche Lüftung zu bevorzugen und erfahrungsgemäß bei den Nutzern auch erwünscht. Zudem spart dieser Sommerbetrieb die andernfalls erforderlichen und durchaus bedeutenden Antriebsenergien.

Während der Heizzeit hingegen wird kontrolliert be- und entlüftet. Die Nutzer *müssen nicht* über Fenster lüften (können dies aber bei Bedarf). Das Vorenthalten von Möglichkeiten zur Fensterlüftung führt auch dann in der Regel nur zu Unzufriedenheit. Im Unterschied zu konventionellen Schulen oder Kindertagesstätten sind die vorgehaltenen Heizleistungen in Passivhaus-Gebäuden deutlich geringer. Vor oder unter den Fenstern sind ferner keine Heizkörper erforderlich, so dass bei geöffneten Fenstern einströmende Außenluft rasch zu spürbarer Abkühlung führt. Erfahrungen aus Passivhaus-Schulen deuten daraufhin, dass in der Regel Fensterlüftung nur in geringem Umfang im Kernwinter praktiziert wird und dass dies weder die Funktion noch den Energieverbrauch unvertretbar beeinflusst.

Bestehen in Passivhaus-Sporthallen besondere Anforderungen an die Beheizung?

Eine Besonderheit von Sporthallen sind die großen Raumhöhen. In der Literatur werden für Hallen spezielle Maßnahmen empfohlen, welche einer ausgeprägten Temperaturschichtung entgegenwirken. Mit dem sehr guten Wärmeschutz ändern sich aber diese Verhältnisse – dies ist ein zentrales Ergebnis der im Rahmen dieses Leitfadens durchgeführten Untersuchungen:

Messungen und CFD-Simulationen, zeigen, dass sich sogar bei einer Beheizung über die Zuluft eine sehr gleichmäßige Temperaturverteilung einstellt und vergleichbar dem Passivhaus-Wohnbau die Art der Beheizung auch bei den großvolumigen Sporthallen keine große Rolle spielt (vgl. Abschnitt 7.2).

Welche Energieeinsparpotentiale sind zu erwarten?

Die kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung als zentrale Haustechnik-Komponente von Passivhaus-Gebäuden verbessert maßgeblich die Luftqualität und bietet eine ideale Lösung zur behaglichen Einbringung der Zuluft bei den in Schulen und Kindertagesstätten üblichen Belegungsdichten. Gleichzeitig werden mit der Wärmerückgewinnung die Wärmeverluste merklich verringert und es bleibt nur noch ein kleiner Schritt zum Passivhaus-Standard.

Bei Bestandsgebäuden kann der Passivhaus-Standard nicht immer mit vertretbaren Maßnahmen erreicht werden. Doch bietet die Modernisierung mit hocheffizienten Passivhaus-Komponenten auch dort ein sehr weitgehendes Einsparpotential. Heizenergieeinsparungen um 90 % sind bei energetischen Sanierungen möglich. Bei Modernisierungen bietet in der Regel auch die künstliche Beleuchtung erhebliche Einsparpotentiale abhängig von den Ausgangsqualitäten (bis zu 80 %; vgl. [VDI 3807-4]).

Im Neubau bestehen Heizenergieeinsparpotentiale mit dem Passivhaus-Standard von regelmäßig über 70 % im Vergleich zum Anforderungsniveau der EnEV (vgl. Abbildung 4). Die gemessenen Heizwärmeverbrauchswerte von drei exemplarischen Passivhaus-Bildungsgebäuden liegen im Bereich von 9 bis 22 kWh/(m²a) und belegen die erzielbaren großen Einsparpotentiale.

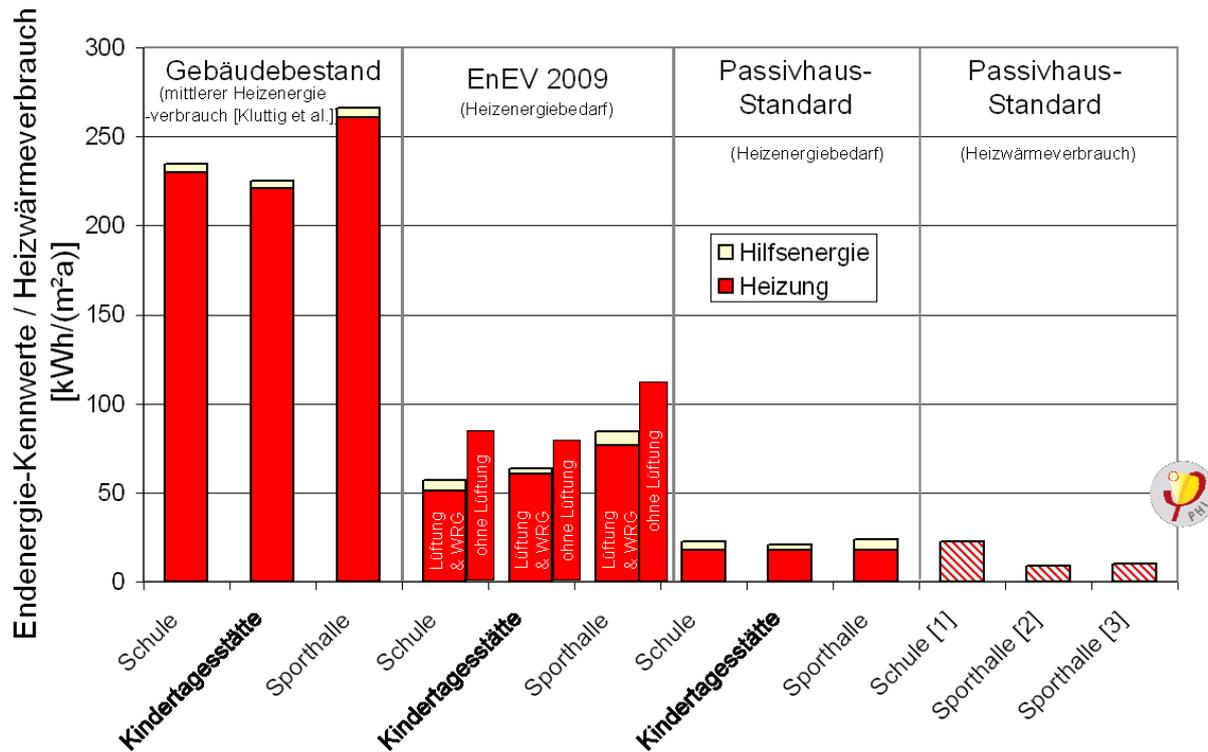


Abbildung 4: Heizenergie-Kennwerte von Bildungsgebäuden im Vergleich. Während im Gebäudebestand der Heizenergieverbrauch der betrachteten Gebäudetypen zwischen 260 und 220 kWh/(m²a) beträgt (vgl. [Klutig et al 2001]), sinkt der Bedarf mit der novellierten EnEV (EnEV2009) auf Heizenergiebedarfswerte zwischen 50 und 100 kWh/(m²a). Mit dem Passivhaus-Standard bei Bildungsgebäuden ist eine weitere maßgebliche Reduzierung des Heizenergiebedarfs möglich. Exemplarisch sind noch publizierte Messwerte zum Heizwärmeverbrauch von drei Passivhaus-Bildungsgebäuden angeführt. Die Messwerte zwischen 9,0 und 22,8 kWh/(m²a) belegen das große Potential von Energieeffizienz-Maßnahmen (der Heizenergieverbrauch (Endenergie) liegt etwa 15 % höher). (Quelle: PHI)

Die Energiebedarfswerte gemäß EnEV2009 und Passivhaus-Standard sind anhand konkreter Projekte mit dem Energiebilanzverfahren [PHPP 2007] berechnet. Zum Energiestandard gemäß EnEV2009 sind die Energiekennwerte mit und ohne kontrollierte Lüftung ausgewiesen.

[1]: Passivhaus Grundschule in Frankfurt Riedberg [Peper et al. 2007]

[2]: Passivhaus Sporthalle in Laatzen [Kis/Grobe 2006]

[3]: Passivhaus Sporthalle in Neuberend [Vollert et al. 2006], [Vollert et al. 2008]

4 Gebäudeentwurf

4.1 Der Passivhaus-Standard

Durch den ausgezeichneten Wärmeschutz von Passivhäusern sind die Wärmeverluste so gering, dass sie zu einem großen Teil durch die solaren und internen Wärmegewinne (Personen, elektrische Geräte) ausgeglichen werden können (vgl. Abschnitt 10). Der verbleibende Restwärmebedarf kann einfach und kostengünstig durch Nachheizung des für eine gute Luftqualität ohnehin erforderlichen Zuluftstroms gedeckt werden. Heizkörper sind nicht mehr zwingend erforderlich.

Das 1991 in Darmstadt-Kranichstein gebaute, weltweit erste Passivhaus war eine Zeile aus vier Reihenhäusern (vgl. [HMUE 1993], [Feist/Werner 1994]). Auch bei den im weiteren Verlauf der 90er-Jahre in immer größerer Zahl entstehenden Passivhäusern handelte es sich anfangs ausschließlich um Wohngebäude. Das erste Verwaltungsgebäude im Passivhaus-Standard entstand dann im Jahr 1998, das erste Produktionsgebäude im Jahr 2000 und erst im Jahr 2001 wurde die erste Passivhaus-Schule in Bremen-Sebaldsbrück fertiggestellt.

Entsprechend wurden die Passivhaus-Prinzipien und auch die Anforderungen für Passivhäuser ursprünglich vor allem für Wohngebäude entwickelt. Als zu Anfang des neuen Jahrtausends die ersten Schulen und Kindertagesstätten im Passivhaus-Standard gebaut wurden, stellte sich die Frage, ob die gleichen Prinzipien und Kriterien, die sich im Wohnbau nun schon einige Jahre bewährt hatten, angewendet werden könnten. Es stellte sich bald heraus, dass der Heizwärme-Kennwert von max. 15 kWh/(m²a) auch für Bildungsgebäude sinnvoll ist. Die Grundlagen hierzu wurden anhand von systematischen Gebäudesimulationsrechnungen im Arbeitskreis Passivhaus-Schulen erarbeitet (vgl. [AkkP 33]). Besondere Fragestellungen bei großvolumigen Sporthallen konnten in weiteren Parameterstudien im Rahmen dieses Leitfadens geklärt werden (vgl. Abschnitt 11.2). Dass der resultierende Heizwärme-Kennwert identisch ist zu den Anforderungen im Wohnbau ist dabei keinesfalls selbstverständlich. Die vergleichbaren Anforderungen an den Wärmeschutz rühren trotz unterschiedlicher Nutzung unter anderem daher, dass die Mittelwerte der Randbedingungen (zeitlich und räumlich gemittelte interne Wärmegewinne und mittlerer Außenluftwechsel) recht gut übereinstimmen.

Je mehr Passivhaus-Bildungsgebäude gebaut wurden, desto klarer wurde zudem, dass sich dieser Nutzungstypus sogar ganz besonders gut für die Anwendung des Passivhaus-Standards eignet. Auf Grund der hohen Belegungsdichten und des damit verbundenen hohen Frischluftbedarfs ist eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ohnehin unverzichtbar, um Einbußen bei Komfort und

Luftqualität zu vermeiden. Bildungsgebäude mit ihrem meist relativ großen Volumen haben zudem ein recht gutes A/V-Verhältnis, wodurch der Passivhaus-Standard im Vergleich zu Einfamilienhäusern schon mit geringeren Anforderungen an den Wärmeschutz der Einzelbauteile erreicht werden kann.

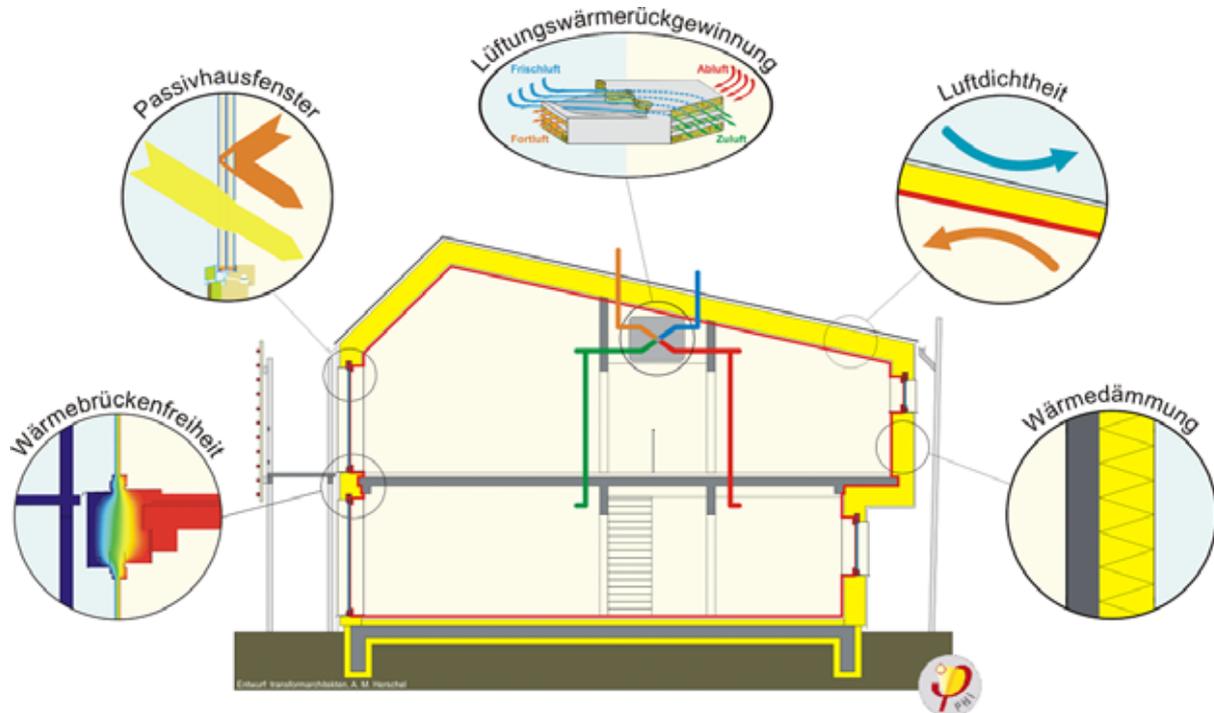


Abbildung 5: Die fünf Passivhaus-Grundprinzipien (Quelle: PHI)

Passivhäuser unterscheiden sich auf den ersten Blick nicht von anderen Gebäuden. Komponenten und Bauteile für Passivhäuser kommen auch in konventionellen Gebäuden vor. Alle relevanten Komponenten weisen jedoch hinsichtlich der Vermeidung von Wärmeverlusten eine deutlich verbesserte Qualität auf. Jedes der folgenden fünf Prinzipien ist dabei unverzichtbar für das Erreichen des Passivhaus-Standards:

4.1.1 Wärmedämmung

Eine durchgehende Dämmebene umschließt das beheizte Gebäudevolumen vollständig und minimiert die Transmissionswärmeverluste. Diese sollte einen Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) von maximal $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ aufweisen. Vor allem im Dach kann auch ein noch deutlich besserer Wärmeschutz sinnvoll sein und kostengünstig verwirklicht werden.

4.1.2 Wärmebrückenfreiheit

Lücken oder Versprünge in der Dämmebene sind Wärmebrücken und sollten daher vermieden werden. Das gleiche gilt für Durchdringungen der Dämmebene, die, wenn immer möglich, mit Materialien geringer Wärmeleitfähigkeit ausgeführt werden sollten.



Abbildung 6: Stiftregel:
Die wärmedämmende und die luftdichte Gebäudehülle sollten im Gebäudeschnitt möglichst ohne abzusetzen mit einem Stift eingezeichnet werden können. (Quelle: PHI)

4.1.3 Luftdichtheit

Eine luftdichte Hülle umschließt das beheizte Gebäudevolumen. Diese ist in der Regel raumseitig von der Wärmedämmung angeordnet. Sie verhindert Lüftungswärmeverluste durch In- und Exfiltration.

4.1.4 Passivhaus-Fenster

Passivhaus-Fenster werden auch als „Energiegewinn-Fenster“ bezeichnet, weil sie bei überwiegender Südorientierung während der Heizperiode mehr Wärme in Form von Sonneneinstrahlung ins Haus lassen, als sie durch Wärmeverluste wieder nach außen verlieren. Sie leisten dadurch einen Beitrag zur Gebäudebeheizung. Dies wird erreicht durch 3-fach-Wärmeschutzverglasung und wärmegeämmte Fensterrahmen.

4.1.5 Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung

Die Lüftungsanlage sorgt durch den Abtransport von Luftschadstoffen, Gerüchen und Feuchtigkeit zuverlässig für frische Luft. Die Wärmerückgewinnung überträgt die Wärme von der „verbrauchten“ Abluft an die frische Zuluft. Dadurch werden die Lüftungswärmeverluste um bis zu 90 % reduziert. Mit Hilfe eines einfachen Nachheizregisters im Zuluftstrang kann die Lüftungsanlage auch zur Gebäudebeheizung genutzt werden.

Wichtige Kennwerte für Passivhäuser

(vgl. auch Abschnitt 10, www.passiv.de)

Heizwärmebedarf:	max. 15 kWh/(m²a)	(Anforderung)
Primärenergiebedarf:	max. 120 kWh/(m²a)	(Anforderung)
Luftdichtheit (n₅₀):	max. 0,6 h⁻¹	(Anforderung)
Wärmedämmung (U-Wert):	max. 0,15 W/(m²K)	(Richtwert)
Fenster (U_{w,eingebaut})	max. 0,85 W/(m²K) bei gleichzeitig hoher Durchlässigkeit der Verglasung für Solarstrahlung)	(Richtwert)
Wärmerückgewinnung (η_{WRG})	min. 75 %	(Richtwert)

4.2 Entwurf, Zonierung und Orientierung

4.2.1 Entwurf

Die integrale Planung ist nicht nur, aber in besonderem Maße, bei Passivhäusern unverzichtbar für das Erreichen eines energie- und kosteneffizienten Gebäudes. Da während der Vorplanung die grundlegenden Entscheidungen hinsichtlich des Gebäudeentwurfs getroffen werden, sollte bereits zu diesem Zeitpunkt eine Integration der Fachingenieure (u.a. Bauphysik, Energiekonzept, Statik und Konstruktion, Gebäudetechnik und Brandschutz) in den Planungsprozess erfolgen. Die enge interdisziplinäre Zusammenarbeit im Planungsteam sollte durch alle Planungs- und Ausführungsphasen bis zur Fertigstellung des Gebäudes beibehalten werden.

Ein optimierter Gebäudeentwurf birgt die größten Kosteneinsparungspotentiale. Die Auswertung von 12 Wettbewerbsentwürfen für ein Bürogebäude ergab nach der Kostenermittlung eine Bandbreite von 1550 € bis 2280 € Investitionskosten pro Quadratmeter BGF. Die zusätzlichen Investitionskosten für die Ausführung im Passivhaus-Standard lagen dagegen nur bei im Vergleich zu vernachlässigenden 13 € [Kahlert et al. 2004]. Allerdings sind die zusätzlichen Investitionskosten für den Passivhaus-Standard sehr stark davon abhängig, wie gut der Gebäudeentwurf auf das Erreichen des Passivhaus-Standards hin optimiert wurde. Die folgenden Absätze enthalten einige Hinweise für eine solche Optimierung.



**Abbildung 7: Auch kleinere, eingeschossige Gebäude erreichen den Passivhaus-Standard - allerdings mit etwas erhöhtem Aufwand
Kinderkrippe in Lengdorf, Architekt: Gernot Vallentin (Foto: Gernot Vallentin)**

Bildungsgebäude sind häufig im Vergleich zu Wohnhäusern recht groß und weisen dadurch ein besseres Verhältnis von Oberfläche zu Volumen (A/V-Verhältnis) auf. Dieser „naturegegebene“ Vorteil kann durch eine kompakte Gebäudeform mit möglichst wenig Vor- und Rücksprüngen unterstützt werden. Mehrgeschossigkeit sowie eine große Gebäudetiefe mit Anordnung der Hauptnutzung (Klassenräume, Gruppenräume o.ä.) beidseitig der Erschließungsachse verbessern ebenfalls das A/V-Verhältnis. Werden diese Optimierungsmöglichkeiten genutzt, kann der Passivhaus-Standard mit entsprechend geringeren Anforderungen an den Wärmeschutz von Außenhülle und Lüftungsanlage erreicht werden.

Die hohen Qualitätsanforderungen bezüglich Luftdichtheit und Wärmebrückenfreiheit bei Passivhäusern erfordern eine besonders sorgfältige Planung und Ausführung. Die Erfahrung zeigt, dass sowohl der Planungsaufwand als auch die Mängelhäufigkeit bei der Ausführung deutlich reduziert werden können, wenn auf einfache Details, die sich zudem möglichst an allen vergleichbaren Stellen im Gebäude wiederholen, geachtet wird.

Frühzeitig sollte ausreichender Raum für die Lüftungsanlage vorgesehen werden. Die während der Nutzungszeit in Bildungsgebäuden erforderlichen relativ großen Volumenströme benötigen ausreichend große Kanalquerschnitte, die bei der Planung z.B. von abgehängten Decken berücksichtigt werden müssen. Bei mehrgeschossigen Gebäuden sind Schächte für die vertikale Kanalführung erforderlich. Eine optimierte Lage des Haustechnikraums mit dem Lüftungsgerät führt zu kleineren Kanaldurchmessern, einem kürzeren Kanalnetz sowie einer verbesserten Elektroeffizienz der Lüftungsanlage.

Die Eingänge zum Gebäude erfordern einen gewissen Aufwand für Windfänge sowie für gebrauchstaugliche, luftdichte und wärmegeämmte Türen. Ein Entwurf, der mit möglichst wenigen Eingängen funktioniert, ist daher kostengünstiger. Türen, die direkt von einem Gruppen- oder Klassenraum ins Freie führen, benötigen dagegen keinen Windfang, da sie erfahrungsgemäß ohnehin während der Heizperiode kaum benutzt werden. In dieser Zeit wird in der Regel, um übermäßigen Schmutzeintrag zu vermeiden, der Haupteingang mit Trockenlaufzone (Fußabstreiferplatten) genutzt.

Messungen in einer Passivhaus-Schule haben ergeben, dass der durch Türöffnungsvorgänge am Haupteingang verursachte zusätzliche Lüftungswärmeverlust mit maximal $0,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ziemlich gering ist. Wird der Eingangsbereich vor allem von größeren Personengruppen durchquert, wie das insbesondere bei Schulen vor Unterrichtsbeginn und zu den Pausen der Fall ist, so lassen sich durch Windfänge kaum Energieeinsparungen erzielen. Betreten die Personen das Gebäude einzeln, so kann dagegen durch einen Windfang der zusätzliche Lüftungswärmeverlust auf die Hälfte reduziert werden [Peper et al. 2007].

Die thermische Behaglichkeit kann jedoch durch einen Windfang deutlich verbessert werden, insbesondere wenn sich Aufenthaltsbereiche in Türnähe befinden, da sich durch die Türöffnungsvorgänge Kaltluftseen bilden können. Dies gilt z.B. für Kindertagesstätten, in denen die Verkehrsflächen regelmäßig als zusätzliche Spielzone fungieren. Hinsichtlich Behaglichkeit und Reduktion der Lüftungswärmeverluste sind mechanische Türschließer gegenüber automatisch öffnenden Türflügel vorzuziehen, da letztere deutlich längere Öffnungszeiten verursachen. Dies macht den Windfang nahezu unwirksam. Ist aus Gründen der Barrierefreiheit eine automatische Türöffnung erforderlich, so kann untersucht werden, ob es evtl. ausreicht, diese nur bei einem zusätzlichen Nebeneingang einzusetzen.



Abbildung 8: Eingangsbereich einer Passivhaus-Schule mit Windfang (Frankfurt Riedberg).
Architektur: 4a, Stuttgart

Auch im Bereich der Windfänge gilt die Regel, dass es nur eine luftdichte (und wärmedämmende) Ebene gibt. Das heißt, nur eine der zwei Türenebenen muss mit luftdichten Passivhaus-Türen ausgeführt werden, für die zweite Ebene reicht ein einfacherer Standard aus. Um eine unnötige Vergrößerung der thermischen Hüllfläche durch den Windfang zu vermeiden, ist es vorteilhaft diese Passivhaustür wie in Abbildung 8 in einer Linie mit der umgebenden Gebäudehülle zu positionieren.

4.2.2 Zonierung

Eine klare funktionale Gliederung des Gebäudes vereinfacht Versorgung und Regelung insbesondere hinsichtlich Heizung und Lüftung. Dazu gehört vor allem eine räumliche Konzentration der Installationszonen (Sanitärräume). Dies ermöglicht ein kurzes Abluftkanalnetz, was zu Baukosteneinsparungen und zu geringeren Druckverlusten der Lüftungsanlage mit entsprechend niedrigerem Stromverbrauch im Betrieb führt.

Unnötige Bau- und Wartungskosten können durch eine mangelhafte Abstimmung zwischen Brandschutz- und Lüftungsplanung entstehen. Wenn Lüftungskanäle durch Wände oder Decken in einen benachbarten Brandabschnitt führen, sind aufwändige Brandschutzmaßnahmen erforderlich (z.B. Brandschutzklappen, vgl. Abschnitt 6).

4.2.3 Orientierung

Da Bildungsgebäude meist große kompakte Baukörper sind, spielt die Ausrichtung eine weniger große Rolle für den Heizwärmebedarf als bei kleineren Wohngebäuden. Eine Nord-Süd-Ausrichtung ist allerdings hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes günstiger, da die solaren Wärmeeinträge im Sommer bei Ost- oder West-Fenstern deutlich höher sind. Dennoch sollte für eine Nutzung der Solarstrahlung zur Verminderung des Heizwärmebedarfs auf eine möglichst geringe Verschattung der Fenster geachtet werden. Dies gilt sowohl für die Eigenverschattung durch Fensterleibung und -sturz sowie andere Gebäudeflügel als auch für die Fremdverschattung durch andere Gebäude, Bäume und die Topographie. Der Schutz vor übermäßigem sommerlichem Solareintrag sollte nicht über eine dauerhafte Verschattung oder Sonnenschutzverglasung sondern möglichst über temporäre Verschattungselemente, wie z.B. außenliegende Raffstores erfolgen.

Um im Sommer eine räumliche Konzentration von internen (insbesondere Wärmeabgabe von Personen) und solaren Wärmelasten zu vermeiden, kann es sinnvoll sein, statt der Klassen- bzw. Gruppenräume die Pausen- und Verkehrsflächen nach Süden auszurichten. In diesen Bereichen wird eine zeitweilige Übertemperatur zudem in der Regel eher toleriert, so dass sie als eine Art „Pufferzone“ dienen können. Im Gegenzug sollten Räume mit hohen internen Lasten, wie z.B. Serverräume oder Kochküchen, eher auf der Nordseite angeordnet werden.

4.3 Bauweise

Bei Wohn- und Bürogebäuden hat die Bauweise (Massiv- oder Leichtbau) nur einen geringen Einfluss auf das thermische Verhalten [AkkP 15]. Bei Bildungsgebäuden gibt es jedoch durch die hohe Personenbelegung in den Gruppen- oder Klassenräumen während der Nutzungszeiten eine hohe räumliche und zeitliche Konzentration von internen Wärmegewinnen. Diese führt im Sommer und während der Übergangszeit in den betroffenen Räumen während der täglichen Nutzungsdauer zu einem kontinuierlichen Temperaturanstieg [AkkP 33]. Passivhaus-Gebäude und Gebäude mit geringerem Wärmeschutzstandard (Niedrigenergiehaus) unterscheiden sich hierin übrigens kaum. Decken und Wände mit hoher Wärmespeicherkapazität (Massivbau) dämpfen diese tägliche Temperaturamplitude. Sie mildern außerdem die kontinuierliche Erwärmung über mehrere aufeinander folgende Nutzungstage.

Wichtig ist eine gute thermische Kopplung der Speichermasse an den Raum. Abgehängte (Akustik-) Decken, Einbauschränke o.ä. können daher problematisch sein. Auch eine thermische Kopplung der Räume untereinander ist vorteilhaft, da sie Temperaturspitzen abmildert, die sonst durch in einzelnen Räumen konzentrierte Wärmelasten entstehen können. Massive Bauteile haben in der Regel auch eine höhere Wärmeleitfähigkeit, so dass sie die thermische Kopplung verbessern. Im Schulbau kann zudem eine massive Ausführung der Innenwände auch Vorteile für den Brand- und Schallschutz bieten.



Abbildung 9: Klassenraum in der Passivhaus-Schule Frankfurt-Riedberg. Die Decke ist nur im Bereich der Kanalführung abgehängt (der Zuluft-Schlitz ist erkennbar). Eine Pinnwand an der Klassenrückwand wirkt zusätzlich als Akustik-Element.
Architektur: 4a, Stuttgart / Haustechnik: ICRZ Ing. Cons. Ruth + Zimmermann, Neuenhagen

4.4 Tageslichtnutzung

Der Hauptstromverbraucher ist in Bildungsgebäuden in der Regel die künstliche Beleuchtung. Maßnahmen zur Verbesserungen der Tageslichtnutzung können daher zu beträchtlichen Energieeinsparungen führen.

Das übliche Beurteilungskriterium ist der sogenannte Tageslichtquotient. Dieser beschreibt das Verhältnis der horizontalen Beleuchtungsstärke eines Punktes im Raum zur Beleuchtungsstärke einer waagrechten Fläche im Freien. Ein Tageslichtquotient auf Arbeitsplatzhöhe zwischen 2 und 6 % wird für Klassenräume empfohlen (vgl. [Chuard 1993]).

Der Tageslichtquotient lässt sich durch eine geeignete Fenstergeometrie verbessern. Neben der absoluten Fenstergröße bewirkt vor allem eine große Sturzhöhe (deckengleicher Sturz) eine gute Tageslichtversorgung in der Raumtiefe. Eine Verglasung unterhalb der Nutzungsebene (z.B. Tischhöhe in Schulen) ist dagegen nahezu wirkungslos.

Einen deutlichen Einfluss hat außerdem der Reflexionsfaktor der Raumbooberflächen. Helle Farben können den Tageslichtquotienten in weiter vom Fenster entfernten Bereichen verdoppeln und führen außerdem zu einer gleichmäßigeren Verteilung der Beleuchtungsstärke (vgl. [AkkP 33]).

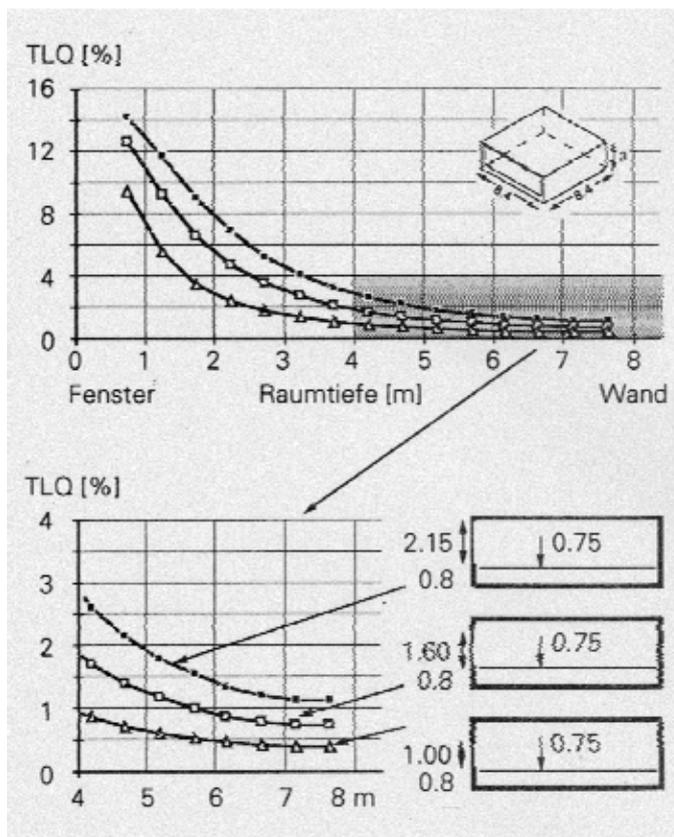


Abbildung 10: Einfluss der Fenstergröße auf den Tageslichtquotienten.
(Quelle: [Chuard 1993])

5 Gebäudehülle

5.1 Außenwände

Durch ihren hohen Flächenanteil an der gesamten Gebäudehülle (typischerweise um 30 %) haben speziell Bauteile der Fassaden einen großen Einfluss auf die Energiebilanz (vgl. Abschnitt 10) eines Gebäudes. Passivhaustaugliche Wärmedurchgangskoeffizienten im Außenwandbereich liegen zwischen 0,10 bis 0,15 W/(m²K). Wie Wirtschaftlichkeitsrechnungen zeigen, liegt dieses Dämmniveau auch im Rahmen einer energetischen Sanierung im wirtschaftlichen Bereich (vgl. [Kah et al. 2008]).

Hochwärmegedämmte Konstruktionen sind inzwischen in allen gebräuchlichen Bauweisen in der Praxis erprobt. Mögliche Schwachstellen in der Dämmhülle in Form von Befestigungselementen und sonstigen Durchdringungen verlangen eine erhöhte Aufmerksamkeit, da sie, obwohl sie im Einzelnen nur geringe Wärmeverluste verursachen, in der Gesamtheit den U-Wert einer Fassade und somit den Heizwärmebedarf des Gebäudes erhöhen können.

Eine detailliertere Beschreibung der folgenden Ausführungen bietet der Protokollband 35 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser [AkkP 35], der unter anderem auf die Reduzierung der Wärmebrücken im Fassadenbereich eingeht und das umfassende Handbuch „Altbaumodernisierung mit Passivhauskomponenten“ [Bastian et al. 2010], in dem, auch für den Neubau relevante, Grundlagen und ausführliche Hintergrundinformationen zur Fassadendämmung zu finden sind.

5.1.1 Dämmstärken und Wärmeleitfähigkeiten für hochwärmegedämmte Passivhaus-Fassaden

Erfahrungsgemäß liegen die Stärken der Außenwanddämmung eines Passivhauses meist bei 20 bis 30 cm mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,035$ W/(mK) (hier ist immer der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit relevant) – je nach vorgegebenen Randbedingungen und Möglichkeit zur Optimierung der übrigen Gebäudekomponenten.

Expandiertes Polystyrol (EPS) erreicht eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,035$ W/(mK). Durch eine Weiterentwicklung (Zusatz von Trübungsmittel, das als Infrarot-Absorber bzw. -reflektor wirkt) ist seit einiger Zeit auch EPS mit bis zu $\lambda = 0,031$ W/(mK) erhältlich [Albrecht 2010].

Wird aufgrund von Brandschutzanforderungen die Baustoffklasse A verlangt, ist meist Mineralwolle der Dämmstoff der Wahl. Mineralwollgedämmplatten erreichen bis

zu einer Dicke von 200 mm eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,035 \text{ W/(mK)}$, seit Kurzem auch $\lambda = 0,032 \text{ W/(mK)}$. Bei größeren Dämmstärken wird der Dämmstoff aus Gründen der Stabilität gedreht, man spricht von Mineralwolle-Lamellen, so dass der Wärmestrom nun parallel zur Faser verläuft. Dadurch erreicht Mineralwolle bei einer Dämmstärke über 200 mm nur eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,040 \text{ W/(mK)}$.

In Bereichen, in denen die Dämmstoffstärke aus baupraktischen Gründen reduziert werden muss, kann auch ein Hochleistungsdämmstoff (z.B. Polyurethan oder Phenol-Hartschaum) mit λ -Werten von bis zu $0,022 \text{ W/(mK)}$ gewählt werden. Z.B. zwischen Mauerwerk und fassadenbündigen Jalousiekasten kann mit solchen Materialien die Wärmebrückenwirkung reduziert werden.

Zudem sind hochwärmegedämmte Konstruktionen mit vielen weiteren Dämmstoffen, wie z.B. Holzfasern, Zellulose, Flachs, Hanf, Kork, Schilf, Gras oder Stroh, herstellbar. Teilweise werden diese Dämmstoffe als Platten bzw. Ballen oder lose – meist in Holzkonstruktionen – verbaut. Neben der Fassadenkonstruktion muss hier auch die Dämmstärke den jeweiligen Produkteigenschaften angepasst werden.

Das Passivhaus Institut hat eine Reihe passivhausgeeigneter Konstruktionen inkl. aller Anschlussdetails geprüft. Informationen und genaue Kennwerte sind im Internet verfügbar (www.passiv.de).

5.1.2 Spezielle Anforderungen an Bildungsgebäude

Besondere Anforderung an die Außenwände bestehen bei Bildungsgebäuden hinsichtlich Brandschutz und Schutz der Fassade vor Vandalismus.

5.1.2.1 Brandschutz

Entsprechend der jeweiligen Landesbauordnung müssen je nach Gebäudeklasse bestimmte Brandschutzanforderungen an die Gebäudehülle erfüllt werden. Da Schulen und Kindergärten zu den Sonderbauten gehören, können durch die Brandschutzbehörde auch weitergehende Anforderungen gestellt werden. Im Rahmen der Schulbaurichtlinie werden bezüglich des Brandverhaltens von Fassadensystemen jedoch keine weiteren Forderungen als die der Landesbauordnungen gestellt.

Für Außenwandverkleidungen einschließlich Wärmedämmung und Unterkonstruktion fordert z.B. die Hessische Bauordnung [HBO 2003] bei den Gebäudeklassen 1 - 3 die Baustoffklasse B2 (normal entflammbar), bei den Gebäudeklassen 4 und 5 die Baustoffklasse B1 (schwerentflammbar), wobei die Baustoffklasse B1 bei Unterkonstruktionen nur ausreicht, wenn die Brandausbreitung lange genug begrenzt bleibt.

Bei Verwendung von EPS-Dämmstoff müssen bei einer passivhaustauglichen Dämmstärke zusätzliche Brandschutzmaßnahmen ergriffen werden, um die Baustoffklasse B1 zu erreichen. Mit der Anbringung von Brandbarrieren (A1-Dämmstoff im Bereich der Fenster) oder Brandriegeln (um das Gebäude laufender Streifen aus A1-Dämmstoff) wird eine Brandausbreitung über die Fassade von einem Geschoss auf das andere begrenzt und Fluchtwege werden von brennend abtropfenden Substanzen freigehalten. Der Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e.V. macht je nach Dämmstärke und Fenstereinbausituation (auch hochwärmegedämmte Konstruktionen) Vorgaben für die Notwendigkeit der jeweiligen Variante [Kotthoff 2009]. Diese Vorgaben sind als Stand der Technik in die bauaufsichtlichen Zulassungen eingeflossen. Eine eventuelle Verschlechterung des U-Wertes in Teilbereichen durch den A1-Dämmstoff muss in der Energiebilanz berücksichtigt werden.



Abbildung 11: Albert-Schweizer-Gymnasium Alsfeld, Brandbarriere.
Architektur: BLFP, Friedberg

Vandalismus - Schutz

Bei der Fassadenausführung von Bildungsgebäuden sollte dem stoßgefährdeten Bereich im Erdgeschoss besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Um die Sockelbereiche von Wärmedämm-Verbundsystemen vor Beschädigungen zu schützen, gibt es – je nach Beanspruchungsstärke – mehrere Möglichkeiten. Neben der Verwendung von sogenanntem Panzergewebe in der Putzschicht werden häufig auch spezielle Sockel- oder Vandalismusschutzplatten in die Dämmebene eingelassen. Zusätzlich zu einer geringfügigen Reduzierung der Dämmstärke muss hierbei ggf. auch ein Wärmebrückenzuschlag durch eine notwendige Verdübelung in der Energiebilanz beachtet werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung karbonfaserhaltiger Fassadensysteme in stoßgefährdeten Bereichen.

Alternativ kann natürlich das WDV-System in diesem gefährdeten Bereich auch durch andere Fassadenkonstruktionen, wie z.B. eine Vorhangfassade nur im Erdgeschoss (Abbildung 12) oder eine Betonvorsatzschale ersetzt werden.



Abbildung 12: Vorhangfassade in Teilbereichen des Erdgeschosses, Albert-Schweizer-Gymnasium Alsfeld. Architektur: BLFP, Friedberg.

Eine wärmebrückenfreie Lösung in der Optik einer Klinkerfassade sind die vielfach angebotenen Flachverblender (kunstharzgebundene Platten) oder keramischen Beläge – Fliesen, Platten oder Riemchen, wie sie bei der Albert-Einstein-Schule in Schwalbach verwendet wurden (vgl. Abbildung 36).

5.1.3 Wärmedämm-Verbundsystem

Vermutlich aus Kostengründen werden bei Bildungsgebäuden oft WDV-Systeme gewählt. Ein wärmetechnischer Vorteil gegenüber vorgehängten oder vorgestellten Fassaden besteht darin, dass die Dämmschicht nicht durch eine Unterkonstruktion unterbrochen wird. Selbst wärmebrückenarme Verankerungen haben in der Regel einen merklichen Einfluss auf den resultierenden Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils (vgl. Kapitel 5.1.4, Vorhangfassaden).

Polystyrol-Dämmplatten können bis zu passivhaustauglichen Dämmstärken im Normalfall geklebt werden (ohne statisch relevante Verdübelung). Eine zusätzliche Verdübelung wird von Herstellerseite in der Regel bei Sanierungsprojekten bei Verlegung der Dämmplatten auf bestehendem Putz gefordert. Auch in diesen Fällen lohnen sich Abriss-Versuche, die u.U. erhebliche Kosten einsparen helfen.



Abbildung 13: Fassaden mit Warmedämmverbundsystem. Links: Albert-Schweitzer-Gymnasium in Alsfeld. Architektur: BLFP, Friedberg. Rechts: Sporthalle in Heidelberg. Architektur: ap 88, Heidelberg

Bei Mineralwolle-Dämmplatten ist immer eine zusätzliche Verdübelung erforderlich. Mineralwolle-Lamellen können bis 200 mm geklebt werden, bei größeren Dämmstärken ist auch hier eine zusätzliche Verdübelung notwendig (vgl. [Merkblatt 2005]).



Abbildung 14: Links: Edelstahldübel für Warmedämm-Verbundsystem mit Kunststoffhülse und Dämmstoffstopfen. Rechts: Versenkte Dübel werden mit zylindrischen Dämmstopfen verschlossen.

Der häufig vorhandene Rücksprung zwischen Wanddämmung und Perimeterdämmung wird oftmals mit Hilfe eines speziellen Sockelprofils ausgebildet. Üblicherweise wird es leider oft noch als Blechprofil aus Aluminium oder Edelstahl ausgeführt und verursacht so erhebliche Wärmebrückenverluste. Inzwischen sind Sockelprofile aus Kunststoff auf dem Markt, die aus baupraktischer Sicht ausreichen und nahezu wärmebrückenfrei sind. In vielen Fällen ist allerdings gar kein durchgehendes Sockelprofil erforderlich. Häufig ist die Ausbildung einer Tropfkante durch ein Kunststoffprofil mit Einputzgewebe ausreichend. Bei Verzicht auf das Sockelprofil kann es erforderlich sein, die erste Reihe Dämmblöcke konstruktiv mit Dübeln zu sichern.

5.1.4 Vorhangfassaden

Um den Schutz der Wärmedämmung zu gewährleisten und vielfältige Gestaltungsmöglichkeit zu erhalten, wird statt eines WDVS gerade bei Schulen und Kindergärten gern eine vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF) gewählt. Auch hochwärmegedämmte Konstruktionen können als Vorhangfassade ausgeführt werden.

Für die Dämmung einer VHF ist entscheidend, dass hinter der Bekleidung aufgrund des Kamineffekts nur feuerbeständige Dämmstoffe eingesetzt werden dürfen, die außerdem wasserabweisend sein müssen. In der Regel werden hier Mineralwolleplatten mit Vlieskaschierung gewählt.

Bei Vorhangfassaden muss Sorgfalt auf eine winddichte Ausführung der Wärmedämmung gelegt werden, da im Gegensatz zum WDVS der Dämmstoff bei der VHF nicht automatisch durch eine Putzschicht gegen Durchspülung mit kalter Luft geschützt ist.

Des Weiteren muss ein besonderes Augenmerk auf die Reduzierung der Wärmebrücken durch Befestigungselemente gerichtet sein. Diese durchdringen bei konventionellen Unterkonstruktionen die gesamte Dämmschicht mit Baustahl oder Aluminium und führen dadurch, selbst mit einer thermische Trennung von der massiven Wand durch Unterlegplättchen aus PVC, zu einer massiven Verschlechterung des U-Werts. Z.B. können Wärmebrückeneffekte einer konventionellen Aluminium-Unterkonstruktion den U-Wert des ungestörten Bauteils mehr als verdoppeln (vgl. [AkkP 35])!

Für die Bekleidung, die Unterkonstruktion und die Befestigungsmittel ist eine bauaufsichtliche Zulassung erforderlich. Dass die Entwicklung wärmebrückenreduzierter Lösungen Erfolg gebracht hat, zeigen die vielen gebauten Beispiele vor allem im Bereich von Schulen und Kindergärten (auch hier hat das Passivhaus Institut eine Reihe wärmebrückenarmer Konstruktionen zertifiziert, vgl. www.passiv.de). Wenn für eine energetisch ambitionierte Baumaßnahme keine geeigneten Unterkonstruktionen mit bauaufsichtlicher Zulassung auf dem Markt verfügbar sind, kann es sinnvoll sein, eine Zulassung im Einzelfall anzustreben. Teilweise ist auch eine statische Berechnung ausreichend.

Um die Wärmebrückenverluste über die Unterkonstruktion zu reduzieren, empfiehlt sich die Orientierung an den folgenden Prinzipien [AkkP 35]:

- Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit wählen (z.B. Edelstahl statt Aluminium oder Normalstahl, GFK, Leimholz, Kohlefaser)
- thermische Trennungen verwenden

- geometrische Optimierung: minimierte Querschnitte, Fachwerkkonstruktionen mit hoher Tragfähigkeit bei geringem Materialeinsatz
- besser wenige dicke als viele dünne Durchdringungen

Dagegen stellen die Dämmstoffhalter, die zusätzlich die Wärmedämmung durchdringen, in aller Regel kein Problem dar. Es gibt sogar absolut wärmebrückenfreie Dämmstoffhalter, die an der Unterkonstruktion der Fassadenbekleidung befestigt werden und die Dämmung von außen halten.

Verschiedene wärmebrückenreduzierte Unterkonstruktionen wurden bereits im Protokollband Nr. 35 „Wärmebrücken und Tragwerksplanung“ des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser untersucht [Schnieders 2007].

Eine einfache Lösung ist z.B. die kreuzweise Verlegung von Kanthölzern und die Ausdämmung der jeweiligen Zwischenräume. Die Befestigung der äußeren Kanthölzer muss dann nicht durch die gesamte Dämmung bis in die tragende Wand hineinführt werden. Bei der Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten sind die entsprechenden Holzanteile in der jeweiligen Dämmebene zu berücksichtigen. Eine Möglichkeit, den Holzanteil in der Dämmung zu reduzieren, bieten Holzstegträger, die sowohl im reinen Holzbau als auch zur Dämmung von massiven Wänden Verwendung finden. Die Träger gehen zwar von der äußeren Dämmschicht bis zur tragenden Wand durch, sind aber in Gurte und schmale Stege aus Hartfaserplatten aufgelöst. Eine leiterförmig aufgelöste Variante dieser Stegträger, führt zu nochmals geringeren Holzanteilen in der Dämmebene und wurde z.B. beim Albert-Schweizer-Gymnasium in Alsfeld verwendet (Abbildung 15 links).

Bei der Dämmung von Stegträgern ist darauf zu achten, dass auch die Rücksprünge im Stegbereich vollständig ausgefüllt sind, was durch das Einlegen passender Dämmstreifen oder durch die Verwendung von Einblasdämmung erreicht wird.



Abbildung 15: Links: Unterkonstruktion aus leiterförmig aufgelösten Holzstegträgern, Albert-Schweitzer-Gymnasium in Alsfeld. Architektur: BLFP, Friedberg..
Rechts: Holz-Metall-Unterkonstruktion

Eine weitere, wenn auch energetische nicht ganz so optimale Möglichkeit ist die Wahl einer Mischkonstruktion (Abbildung 15 rechts). An der Wand werden auf einer thermischen Trennung metallische U-Profile angebracht, die im Abstand einer Dämmlage vor der Wand ein vertikales Vierkantholz tragen. Die Bekleidung (hier: Faserzementplatten) kann direkt auf diesem Vierkantholz befestigt werden [Schnieders 2007].

Seit einiger Zeit werden von verschiedenen Herstellern wärmebrückenfreie Konsolen aus Kunststoffen oder Faserverbundstoffen angeboten. Bei der Vorhangfassade des Schulzentrums Neckargemünd wurde ein solches System realisiert (Fa. S+T Fassaden). Die Wärmebrücken sind hierbei vernachlässigbar. Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass die Dämmung die Konsolen gut umschließt und die Winddichtigkeit der Dämmebene gewährleistet ist.



Abbildung 16: Schulzentrum Neckargemünd, Vorhangfassade mit Kunststoff-Konsolen.
Architektur: Donnig und Unterstab, Rastatt.

5.1.5 Zweischalige Konstruktionen - Sichtmauerwerk

Auch zweischaliges Mauerwerk ist bei energieeffizienten Bildungsgebäuden möglich und, wenn auch in geringerer Anzahl, bereits realisiert. Allerdings sind auch hier einige Überlegungen hinsichtlich der Reduzierung von Wärmebrücken erforderlich. Befestigungselemente aus Baustahl sollten aufgrund der hohen Leitfähigkeit durch Edelstahlanker oder – wenn möglich – durch Anker aus faserverstärktem Kunststoff ersetzt werden. Edelstahlanker für zweischaliges Mauerwerk haben eine bauaufsichtliche Zulassung für einen Schalenabstand bis 20 cm. Diese Dämmstärke reicht für den Passivhaus-Standard erfahrungsgemäß nicht aus. Übliche Anker können aber bei größeren Schalenabständen ausknicken, weshalb für solche Anwendungsfälle sogenannte Gelenkanker entwickelt wurden, die mit Zulassung im Einzelfall bis 35 cm Schalenabstand erhältlich sind [Bastian et al. 2010].

Zusätzliche Lasten, beispielsweise über Wandöffnungen, werden meist über Edelstahlkonsolen abgetragen. Diese sind mit bauaufsichtlicher Zulassung bis 35 cm Schalenabstand erhältlich. Am Fußpunkt der Wand können solche Edelstahlkonsolen durch ein Fundament für die Vormauerung vermieden werden.

Alle zusätzlichen Wärmebrückenverluste durch die Befestigung der Fassade sollten sorgfältig minimiert werden und müssen in der Energiebilanz berücksichtigt werden.



Abbildung 17: Klinkerfassade an der Justus-Liebig-Schule in Waldshut.
Architektur: Harter und Kanzler, Freiburg / Energiekonzept: Stahl und Weiß,
Freiburg. (Foto: Stahl und Weiß). [AkkP 33]

5.1.6 Monolithische Bauweise

In den letzten Jahren kamen verschiedene hochwärmegedämmte monolithische Bausysteme, z. B. Ziegel mit einem λ -Wert von $0,07 \text{ W}/(\text{mK})$ oder Porenbetonsteine auf den Markt. Auch passivhaus-geeignete Schalungssteine sind verfügbar. Bei entsprechend geringen Anforderungen an die Lastabtragung durch die Außenwände sind solche Bausysteme auch für Kindergärten und Schulen geeignet. Möglich wäre hier auch eine Abtragung zusätzlicher Lasten über den Gebäudekern, um Stahlbeton-Anteile in der Fassade zu minimieren.

Einige dieser Bausysteme erreichen den im Passivhausstandard geforderten U-Wert der Außenwand von $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nur knapp. Bei der Wahl eines solchen Systems sollten die sonstigen Randbedingungen des Gebäudes optimiert sein, um einen Heizwärmebedarf von $15 \text{ kWh}/(\text{m}^3\text{a})$ nicht zu überschreiten (z.B. A/V-Verhältnis, solare Gewinne, U-Werte der sonstigen Außenbauteile, Wärmebrücken, Haustechnik).

5.1.7 Holzleichtbauwand

Reine Holzkonstruktionen mit geringer thermischer Speichermasse sind in Bildungsgebäuden weniger empfehlenswert. Simulationen haben gezeigt, dass für die sommerliche Behaglichkeit bei den hohen inneren Lasten eine ausreichende raumseitige thermische Wärmespeicherfähigkeit empfehlenswert ist. Die Empfehlung wird z.B. von Mischkonstruktionen erfüllt, wenn die innere Struktur massiv ausgeführt wird (vgl. Abschnitt 8).



Abbildung 18: Links: Passivhaus-Sporthalle Unterschleißheim in Mischbauweise. Architektur: PSA-Architekten, München.
Rechts: Passivhaus-Sporthalle Zentgrafenschule in Holzbauweise, Frankfurt a.M. / Architektur: D'Inka Scheible Hoffmann Architekten.

Ein Beispiel für eine realisierte Passivhaus-Schule als Mischkonstruktion ist die Montessori-Schule in Aufkirchen. Hier wurde ein Innenskelett aus Stahlbeton mit einer Außenhülle aus vorgefertigten Holzbauelementen kombiniert. Besonderes Augenmerk wurde auf die Reduktion von Wärmebrücken und auf die Luftdichtigkeit sowohl in der Fläche als auch in allen Anschlusspunkten gelegt. Der Luftdichtheitstest ergab einen sehr guten n_{50} -Wert von $0,09 \text{ h}^{-1}$.



Abbildung 19: Montessori-Schule in Aufkirchen, Walbrunn Grotz Vallentin Architekten, Bockhorn. Links: Stahlbetonskelett. Rechts: Außenwand in Holzleichtbau. [AkkP 33] (Fotos: G. Vallentin)

Eine sorgfältig geplante und ausgeführte luftdichte Ebene ist nicht nur eine Frage der Vermeidung von Wärmeverlusten, sondern vor allem im Holzbau auch ein Garant für eine schadensfreie Konstruktion. Der Luftdichtheitstest dient daher besonders in der Holzbauweise als Qualitätssicherung (vgl. Kapitel 5.3).

Die möglichen Konstruktionsvarianten einer Außenwand in Holzbauweise unterscheiden sich bei Bildungsgebäuden nicht von anderen Gebäudetypen. Aufgrund von mehrfach sich wiederholenden Raumstrukturen bei Kindergärten und

Schulen sind vorgefertigte Elemente oft wirtschaftlicher einzusetzen als z. B. beim Bau eines Einfamilienhauses. Bezüglich allgemeiner Informationen zum Passivhaus in Holzbauweise sei auf eine Ausgabe des Holzbau-Handbuches des Informationsdienst Holz verwiesen: Das Passivhaus – Energieeffizientes Bauen [Kaufmann/Feist 2002].

5.1.8 Sanierungen

Bei der Dämmung bestehender Schulgebäude muss – wie auch bei Wohngebäuden – auf die Tragfähigkeit und mögliche Unebenheiten der Altbauwand geachtet und entsprechend reagiert werden. Bei einer Dämmung mit WDVS reicht eine Verklebung meistens nicht aus. Die Dämmplatten müssen oft zusätzlich verdübelt werden (Abriss-Versuch). Bei schwierigen Untergründen ist eventuell eine vergleichsweise aufwändige Befestigung der Dämmplatten mit Schienen erforderlich, um eine umfangreiche Untergrundvorbereitung zu umgehen. In der Regel entstehen bei dieser Befestigungsart Hohlräume hinter der Wärmedämmung, weshalb durch entsprechende Ausbildung der Randbereiche des WDVS (Sockel, Fensteranschlüsse etc.) eine Hinterströmung mit Außenluft verhindert werden muss. Solche Befestigungssysteme sind jedoch teilweise nur bis 200 mm zugelassen, so dass im Einzelnen geprüft werden muss, ob ein Wärmeschutz in Passivhaus-Qualität erreicht werden kann [Bastian et al. 2010].

Da sich die Sanierung von Außenwänden einer Schule in den Grundzügen nicht von denen eines Wohngebäudes unterscheidet, sei hier auf das Handbuch „Altbaumodernisierung mit Passivhauskomponenten“ verwiesen [Bastian et al. 2010]. Vom WDVS über die verschiedenen Konstruktionen einer Vorhangfassade bis hin zur Kerndämmung bestehender Vormauerungen werden hier Problemstellungen erläutert und Lösungsmöglichkeiten dargestellt. Auch dem Thema Innendämmung ist ein ausführliches Kapitel gewidmet.

5.1.9 Wärmebrücken im Fassadenbereich

Neben den Wärmebrücken durch die Fassadenbefestigung gibt es bei jedem Gebäude diverse andere Stellen, an denen besondere Aufmerksamkeit erforderlich ist, um zu hohe Wärmeverluste oder gar Bauschäden zu vermeiden. Als Beispiele seien hier Jalousiekästen, Fenstertüraustritte, Anschlüsse für Vordächer, Fluchtbalkone oder Übergänge zu bestehenden Gebäudeteilen zu nennen.

Prinzipiell gilt das Prinzip, Wärmebrücken sind wenn möglich zu vermeiden. Unvermeidbare Wärmebrücken können in der Regel durch Unterkonstruktionen aus Holz oder druckfeste Dämmblöcke (z. B. PU-Recycling-Werkstoff) entschärft werden, z.T. auch in Verbindung mit speziellen Halterungen aus faserverstärktem Kunststoff. Bei einer verminderten Dämmstärke im Bereich der Wärmebrücke empfiehlt es sich,

hier auf Produkte mit besserer Dämmwirkung (z.B. $\lambda = 0,024 \text{ W/(mK)}$) auszuweichen. Generell sollte eine Durchdringung der gesamten Dämmstärke durch metallische Werkstoffe vermieden werden. Notfalls bringt schon die Wahl von Edelstahl ($\lambda = 17 \text{ W/(mK)}$) anstelle von Baustahl ($\lambda = 50 \text{ W/(mK)}$) eine Verbesserung.

Um bei Fluchtbalkonen, Außentreppen oder Verbindungselementen zu bestehenden Gebäudeteilen die Abmessungen der einzelnen Verankerungen zu reduzieren, sollte die Lastabtragung solcher Bauteile nicht über die Fassade, sondern so weit wie möglich separat durch freistehende oder hängende Konstruktionen erfolgen. Im Protokollband Nr. 35 des Arbeitskreises kostengünstiger Passivhäuser wird im Kapitel „Balkonanschlüsse – wärmebrückenoptimierte Lösungen“ die Problematik solcher Anschlüsse erläutert und es werden eine Vielzahl von Lösungsmöglichkeiten durch realisierte Beispiele aus dem Wohnbau aufgezeigt, die auf Anwendungen in Schulen und Kindergärten übertragen werden können [Schulz 2007].



Abbildung 20: Links: Fluchttreppen der Montessori-Schule in Aufkirchen. Walbrunn Grotz Vallentin Architekten, Bockhorn.
Rechts: Abgehängter Fluchtbalkon an der Freien Walldorfschule Bremen Sebaldsbrück. Architekten: Prof.W.Dahms und F. Sieber, Bremen.

5.1.10 Luftdichtheit

Wie alle Teile der Gebäudehülle müssen auch die Außenwände luftdicht sein, um Bauschäden und Wärmeverluste durch Leckagen zu vermeiden. Die Festlegung auf eine umlaufende luftdichte Ebene und deren konsequente Umsetzung in der Planung und der Ausführung sind von großer Bedeutung, wie bereits im Kapitel 4 (Entwurf) beschrieben. Im neu zu errichtenden Massivbau wird als luftdichte Ebene im Wandbereich meist der Innenputz gewählt. Hierbei ist entscheidend, dass der Innenputz nicht unterbrochen wird und mit anderen Bauteilen dauerhaft verbunden ist. Ein lückenloser Innenputz wird erreicht durch

- Spachtelung auf dem Mauerwerk unter Innenfensterbänken, um Luftströmungen über die Hohlräume des Mauerwerks zu vermeiden.
- das Verputzen der Wände bis auf die Rohdecke.

- das „Vorverputzen“ aller später nicht sichtbaren Bereiche mit einem Mörtelglattstrich bereits im Rohbau (hinter Treppen, Vorwandinstallationen, leichten und massiven Innenwänden, etc.).
- Leerdosen in reichlich frischen Gipsmörtel setzen
- Ein sorgfältiges Verputzen auch von (gemauerten) Innenwänden.

Im Holzleichtbau werden oftmals luftdichte Holzwerkstoffplatten verwendet, die an den Stößen und Anschlüssen zu anderen Bauteilen mit geeigneten Klebebändern und ausreichend Bewegungstoleranzen verklebt werden müssen. Die luftdichte Ebene liegt auch hier meist auf der Innenseite der Wand oder – mit Abstand zur inneren Beplankung für Installationen – auf der Innenseite der Tragkonstruktion.

Bei allen Konstruktionen muss besonderes Augenmerk auf dauerhafte und möglichst einfach herzustellende Anschlüsse der verschiedenen Bauteile untereinander gelegt werden, damit eine sorgfältige Planung für die Ausführung praktikabel ist und somit die Luftdichtigkeit des Gebäudes dauerhaft gewährleistet werden kann (vgl. [Peper/Feist 1999]).

Die Notwendigkeit einer luftdichten Ebene ist nicht zu verwechseln mit der Anforderung, die Dämmung der Fassade durch winddichte Konstruktionen vor dem Durchströmen mit Außenluft zu schützen (Winddichtheit).

5.2 Fenster und Verglasungen

Thermisch hochwertige Fenster reduzieren nicht nur die Transmissionswärmeverluste der Gebäudehülle, sondern verbessern auch die thermische Behaglichkeit im Raum durch geringere Strahlungstemperatursymmetrie. Damit kann der Raum bis nahe an das Fenster heran genutzt werden. Ist die thermische Qualität ausreichend gut, sind keine Heizflächen vor oder unter den Fenstern für behagliche Verhältnisse notwendig (vgl. Abschnitt 7.1). Passivhaus-geeignete Fenster mit Wärmedurchgangskoeffizienten von $U_W \leq 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ mit Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung (WSVG) und wärmegeprägten Fensterrahmen erfüllen diese hohen thermischen Anforderung in allen mitteleuropäischen Klimaten.

Im Rahmen von energetischen Modernisierungen ist manchmal auch die Verwendung von geringeren thermischen Fensterqualitäten möglich, sofern im fensternahen Bereich bereits Heizflächen vorhanden sind. Wirtschaftlich besonders interessant sind aber in jedem Fall Dreischeiben-Wärmeschutzverglasungen.

Trotz der guten Dämmwerte von passivhaus-geeigneten Fenstern ist deren Verlustanteil im Vergleich zu opaken Bauteilen immer noch sehr viel höher, so dass Fensterflächen oft für über 50 % der Transmissionswärmeverluste eines Passivhaus-Gebäudes verantwortlich sind (vgl. Abschnitt 10).

Der Planer eines hocheffizienten Bildungsgebäudes sollte die grundlegenden Eigenschaften einer Verglasung bzw. eines Fensterrahmens kennen, damit er die ihm angebotenen Produkte ggf. kritisch prüfen kann. Fenster haben neben dem Wärmeschutz und der Energie-'Gewinn'-Funktion natürlich noch weitere wichtige Eigenschaften, die vom Nutzer im täglichen Umgang verlangt und geschätzt werden: Sichtbezug nach draußen, Tageslichtnutzung, Lüftung und Kommunikation durch Fensteröffnung (im Sommer). Daher werden die Fenster auch vom Nutzer als besonders 'wertvolles' Bauteil betrachtet und es ist besonders wichtig, hier eventuellen Mängeln vorzubeugen.

Im Folgenden werden einige grundlegende Eigenschaften und Kriterien von Verglasungen und wärmegeprägten Fensterrahmen näher erläutert, um dem Planer wichtige Entscheidungskriterien an die Hand zu geben. In den darauffolgenden Abschnitten werden einige Aspekte zu Sonderverglasungen (Abschnitt 5.2.2) und Sicherheit bei Fensteröffnung in Schulgebäuden (Abschnitt 5.2.6) näher beleuchtet.

5.2.1 Wärmeschutzverglasungen

Mit einer dreifachen Wärmeschutzverglasung (WSVG) sind heute je nach Gasfüllung, Stärke der Scheibenzwischenräume und Art der Beschichtung U_g -Werte von 0,5 - 0,8 $W/(m^2K)$ erreichbar. Dies ist der U -Wert einer ungestörten vertikal angeordneten Verglasung, der näherungsweise in Scheibenmitte erreicht wird! Hinzu kommt noch der Wärmeverlust am Glasrand. Dieser wird im Zusammenhang mit den Fensterrahmen weiter unten behandelt. Der U_g -Wert einer geneigten Verglasung z.B. in Dachflächenfenstern oder sonstigen Schrägverglasungen ist regelmäßig deutlich (etwa +25 %) höher. Als grobe Regel kann gelten: bei einer Dreischeiben-WSVG erhöht sich der U_g -Wert von 0,60 auf 0,75 $W/(m^2K)$, wenn die Scheibe nicht vertikal sondern mit 45 ° Neigung montiert wird.

Der Gesamtenergiedurchlassgrad von Dreischeiben-WSVG liegt abhängig von der Qualität der Beschichtungen bei 0,4 - 0,6. Für Passivhäuser sollte im Normalfall ein g -Wert von mehr als 0,5 angestrebt werden. Im mitteleuropäischen Klima ist die Energiebilanz einer Dreischeiben-WSVG dann immer günstiger als die von Zweischeibenverglasungen; das gilt auch für südorientierte Fenster.

Im Detail lässt sich die Anforderung an den g -Wert leicht aus dem sogenannten Passivhaus-**Energiekriterium** für eine Verglasung abschätzen. Diese besagt, dass der g -Wert nicht auf Kosten des U_g -Wertes zu weit absinken darf. Es muss gelten:

$$g \cdot 1,6 \text{ W}/(m^2K) \geq U_g$$

Diese Bedingung kann mit den validierten Daten (CE-Zeichen) der Produkte leicht überprüft werden. Ist sie erfüllt, so kann man mit einer solchen Verglasung in der

Regel über den Kernwinter netto solare Gewinne realisieren, sofern die Fenster nicht verschattet oder ungünstig orientiert sind. Die Relation ist nur eine empirische Faust-Formel, der Faktor 1,6 gilt nur für Mitteleuropa (Deutschland). Deshalb ist es wichtig, dass die genauen Kennwerte der Verglasung ermittelt und im [PHPP] eingetragen werden. Dort wird für das konkrete Projekt mit den dortigen Randbedingungen, der Fensterausrichtung und der Verschattung, berechnet, ob die Qualität der gewählten Verglasung, d.h. U_g -Wert und g -Wert für das Gebäude passend bzw. ausreichend ist. Weitere Überlegungen hierzu finden sich auch in [Krick 2010].

Hochwertige Wärmeschutzverglasungen (WSVG) sind aus drei Scheiben aufgebaut, von denen in der Regel zwei mit einer Beschichtung versehen sind. Diese selektiven sogenannten 'low-emissivity'- oder 'low-e'-Beschichtungen wirken wie Spiegel, die allerdings nur Wärmestrahlung, d.h. infrarotes Licht reflektieren und deshalb Wärme auch nur schlecht abstrahlen können. Eine Beschichtung je Scheibenzwischenraum genügt, um den Strahlungsaustausch zwischen zwei gegenüberliegenden Scheiben zu vermindern. Normalerweise werden die Oberflächen 2 und 5 (von außen nach innen gezählt) beschichtet (Abbildung 21).

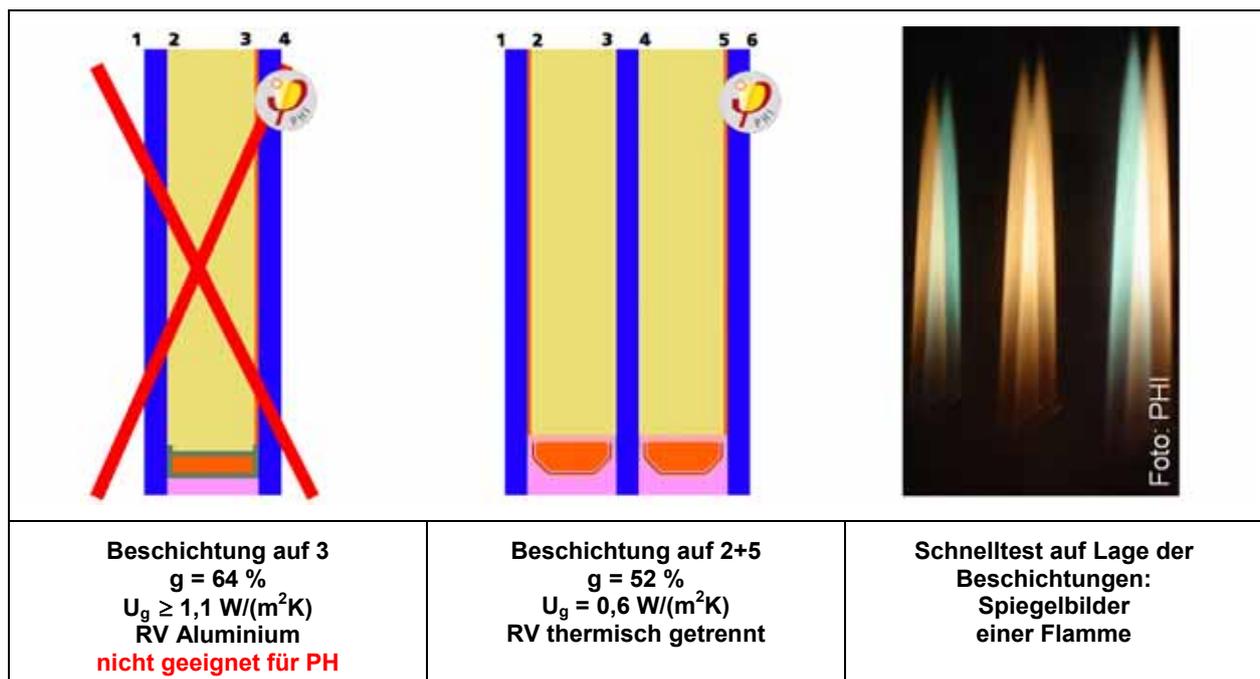


Abbildung 21: Schichtfolgen und Randverbund von Wärmeschutzverglasungen (WSVG). Zweifach WSVG mit Aluminium Randverbund (RV) sind für Passivhäuser ungeeignet. Dreischieben-WSVG haben in der Regel die 'low-e-Beschichtung' auf den Oberflächen 2 und 5. Die angegebenen U_g -Werte verstehen sich für die Scheibenmitte. Die Wärmeverluste über den Randverbund am Glasrand müssen separat ermittelt werden (Ψ_g - Wert). (Quelle: PHI)

'Selektiv' verspiegelt heißt übrigens, dass sichtbares Licht von diesen Beschichtungen gut durchgelassen wird. Deshalb sind die Scheiben für das Auge

transparent. Die Transparenz im sichtbaren Spektralbereich (τ_{vis}) werden durch die modernen Beschichtungen nur noch sehr wenig verringert, so dass der visuelle Eindruck von zweifach- und dreifach-WSVG fast nicht mehr zu unterscheiden ist.

Sogenannte 'Sonnenschutzgläser' mit einem absichtlich verringerten g-Wert sind für Passivhäuser in Mitteleuropa nicht empfehlenswert. Eine separate Verschattungsmöglichkeit – Dachüberstand bzw. Rollläden etc. – kann eine sommerliche Überhitzung bei weitem effektiver verhindern und kann im Winter, wenn man die solaren Gewinne im Gebäude benötigt, geöffnet werden. Raffstores können außerdem geteilt werden, so dass im unteren Bereich ein effektiver Blendschutz realisiert werden kann. Im oberen Bereich wird dagegen das Licht an die Decke umgelenkt.

Verglasungen für das Passivhaus sollten in Mitteleuropa U_g -Werte kleiner gleich $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ aufweisen. Standardglasaufbauten (Argon-Füllung, Scheibenzwischenraum $2 \times 16 \text{ mm}$) erreichen in der Regel schon U_g -Werte von $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Es ist mit den verschiedensten Scheiben-Konfigurationen möglich, das Energiekriterium zu erfüllen. Es muss für jede im Projekt verwendete Scheiben-Beschichtungskombination der U_g - und der g-Wert im Energiebilanzverfahren (vgl. Abschnitt 10) eingetragen werden, weil zusätzliche Scheiben bzw. Folien einer VSG den g-Wert vermindern. Hinweise, wie bei besonderen Sicherheitsanforderungen vorzugehen ist, finden sich weiter unten (Abschnitt 5.2.2).

Es sind auch einige für Passivhäuser geeignete Kasten- und Verbundfenster am Markt erhältlich (Liste von zertifizierten Produkten: www.passiv.de). Schalltechnisch sind diese Konstruktionen positiv zu bewerten. Diese Fenster nutzen eine Kombinationen von zwei Zweifach-WSVG (2+2) im 'Verbund' mit einem Luft-Zwischenraum, in dem eine vor Sturm und Wetter geschützte integrierte Jalousie als Sonnenschutz angeordnet werden kann. Möglich ist auch eine Kombination '2+1'. Dies ist vor allem in windreichen Küstengebieten ein Vorteil. Bei Schulen kommt noch der Vorteil der Vandalen-Sicherheit hinzu, weil die Jalousien vor direktem Zugriff geschützt sind. Trotzdem ist jedoch eine Wartung einfach möglich, weil die Doppelflügel der Verbundfenster jederzeit geöffnet werden können.

5.2.2 Sonderverglasungen

An Verglasungen in Bildungsgebäuden werden Anforderungen sowohl an die Bruchsicherheit als auch an den Personenschutz gestellt. So dürfen Verglasungen bis zu einer Höhe von 2 m oberhalb der Standfläche bei Beschädigung nicht splintern oder herabfallen [DIN 58125]. Dies gilt dann als gewährleistet, wenn Einscheibensicherheitsglas (ESG), Verbundsicherheitsglas (VSG) oder Teilvorgespanntes Glas (TVG) verwendet wird (siehe Zitat GUV-SI 8027 weiter unten).

Während sich der Einsatz von ESG nicht negativ auf den g-Wert auswirkt, wird dieser bei Verwendung von VSG z.T. deutlich reduziert. Ursache ist zum einen die

verwendete Polyvinylbutyral-Folie (PVB) die einen Teil des einfallenden Sonnenlichtes absorbiert. Zum anderen senkt die höhere erforderliche Glasdicke (2 x 4 mm Floatglas) den Energiedurchlass. Dort wo allein Anforderungen an die Bruchsicherheit gestellt werden, sollte zuerst die Möglichkeit der Verwendung von ESG geprüft werden.

Müssen die Gläser den Anforderungen einer absturzsicheren Verglasung genügen, so lässt sich der Einsatz von VSG Scheiben nicht vermeiden. Dennoch kann der Scheibenaufbau hinsichtlich der energetischen Eigenschaften optimiert werden. Die TRAV (Technische Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen) bietet eine Reihe von Aufbauten, die mit nur einer VSG Scheibe auskommen, was Aufbauten mit zwei VSG Scheiben auf jeden Fall vorzuziehen sind. Zusätzlich ist die Lage der VSG Scheibe im Scheibenaufbau von Bedeutung, denn die Reduzierung des g-Wertes durch eine außenliegende VSG Scheibe ist größer als durch eine innenliegende.

Bei bestimmten Beanspruchungen kann nach TRAV außen die energetisch günstigere ESG Scheibe eingesetzt werden. Dies ist dann der Fall wenn die Angriffsseite innen liegt und auch innen VSG eingesetzt wird.

Besitzt ein Scheibenaufbau ohne Sicherheitsglas einen g-Wert von 0,50, so verschlechtert dieser sich bei Verwendung von VSG als äußere Scheibe um bis zu 5 Prozentpunkte, also auf 0,45. Wird stattdessen die innere Scheibe aus VSG hergestellt, so wird der g-Wert nur um 3 Prozentpunkte auf 0,47 reduziert. Wird die Beschichtung des äußeren Scheibenzwischenraumes auf die Außenseite der mittleren Scheibe verlegt, so verbessert sich der g-Wert um 2 Prozentpunkte. In Summe kann damit der Scheibenaufbau einer absturzsichernden Verglasung so gewählt werden, dass der g-Wert lediglich um einen Prozentpunkt reduziert wird.

Neben dem g-Wert kann durch die Verwendung von VSG zusätzlich der U-Wert der Verglasung verschlechtert werden, wenn der Scheibenzwischenraum (SZR) durch den dickeren Glasaufbau verkleinert wird. Dies ist in den meisten Fällen vermeidbar, denn die meisten passivhaustauglichen Fensterrahmen besitzen noch ausreichend Reserven, Glasaufbauten bis 50 mm und mehr aufzunehmen. Selbst der oben beschriebene Glasaufbau kann mit 18 mm SZR ausgeführt werden! Limitierende Größe des möglichen SZR sind die Scheibenabmessungen. Werden diese zu groß, kann das Gewicht nicht mehr über den Randverbund abgetragen werden und der SZR muss verkleinert werden. Dies sollte bei der Fensteraufteilung frühzeitig abgefragt werden.

Nach dem oben gesagten muss geklärt werden, ob ESG, VSG oder TVG Glas verwendet werden muss. Ausnahme: wenn eine 80 cm hohe Brüstung vorhanden ist und die Fensterleibung mindestens 20 cm tief ist oder eine andere Absturzsicherung vorhanden ist, braucht kein bruchfestes Glas verwendet zu werden. Wie schon in

Abschnitt 4.4 dargestellt, sind Brüstungen auch bzgl. des Tageslichtkonzepts eine günstige Lösung.

Zitat aus [GUV-V S 1]: Verglasungen und lichtdurchlässige Flächen § 7. (1) In Aufenthaltsbereichen von Schülerinnen und Schülern müssen Verglasungen und sonstige lichtdurchlässige Flächen bis zu einer Höhe von 2,00 m ab Oberkante Standfläche aus bruchsischen Werkstoffen bestehen oder ausreichend abgeschirmt sein.

Erläuterung zu § 7 Abs. 1: Werkstoffe für Verglasungen und sonstige lichtdurchlässige Flächen gelten z.B. als bruchsicher, wenn bei Stoß- und Biegebeanspruchung (z.B. Abstützen aus dem Lauf heraus) keine scharfkantigen oder spitzen Teile herausfallen.

Nicht abgeschirmte Verglasungen sind in Sicherheitsglas als Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) oder Verbund-Sicherheitsglas (VSG) auszuführen. Drahtglas reicht zur Erfüllung des Schutzzieles nicht aus. Verglasungen oder sonstige lichtdurchlässige Flächen gelten als abgeschirmt, wenn z.B.

- mindestens 1,00 m hohe Umwehrungen, mindestens 20 cm vor den Verglasungen vorhanden sind oder die Verglasungen hinter bepflanzten Schutzzonen liegen,
- bei Fenstern die Fensterbrüstungen mindestens 80 cm hoch und die Fensterbänke mindestens 20 cm tief sind,
- Schränke und Vitrinen in Fachnebenräumen angeordnet sind.

Auch aus Kostengründen erscheint es in der Regel sinnvoll z.B. durch Fensterbrüstungen die Verwendung von Sonderverglasungen soweit als möglich zu vermeiden. In Kindertagesstätten jedoch sind für den Sichtbezug nach draußen meist nahezu raumhohe Fenster mit entsprechenden Anforderungen an die Verglasung notwendig. Auch in Sporthallen sind, aufgrund der erforderlichen Ballwurfsicherheit, Sonderverglasungen regelmäßig unvermeidlich.

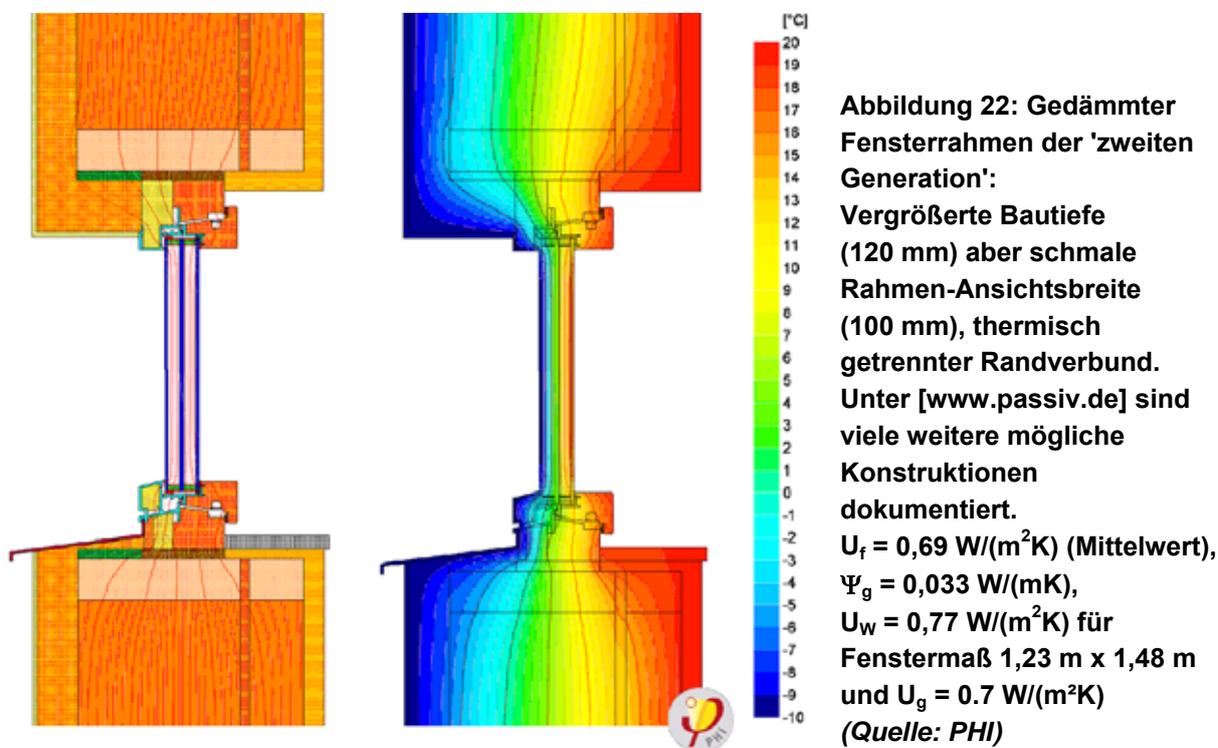
5.2.3 Gedämmter Fensterrahmen

Neben den Wärmeverlusten der Verglasung sind die Verluste durch einen ungedämmten Fensterrahmen erheblich. Bei einem herkömmlichen Fensterrahmen ($U_f = 1,5 \dots 2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) sind die Wärmeverluste mehr als doppelt so groß wie bei einer typischen Dreischeiben-WSVG ($U_g = 0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$). Zu einer hochwertigen Verglasung gehört daher auch ein gut wärmedämmender Fensterrahmen, denn die Rahmenanteile sind mit 30 bis 40 % bei typischen Fenstermaßen relativ hoch.

Die Verwendung eines thermisch getrennten Randverbundes trägt zudem erheblich zur Verringerung der Wärmeverluste am Glasrand bei und kann inzwischen als

'Stand der Technik' bei Fenstern für energieeffiziente Gebäude angesehen werden (vgl. Abbildung 22).

Der Rahmenanteil bzw. der Verglasungsanteil wird generell auf das Rohbaumaß der Fensteröffnung bezogen, unabhängig von einer etwaigen Überdämmung des Rahmens. Typische Rahmen-Ansichtsbreiten liegen bei etwa 120 mm (Laibung und Sturz) bis 140 mm (Brüstung) und zwar sowohl bei optimierten wärmegeämmten Rahmen als auch beim Standard-Fensterrahmen mit 68 mm Bautiefe (IV68). Bei mittleren Fenstermaßen von 1,23 m x 1,48 m ist der Rahmenanteil dann 34 %, bei Balkontüren (1,1 m x 2,2 m) beträgt er immer noch 31 %. Bei kleineren Fenstern steigt er schnell auf über 40 %. Gedämmte Fensterrahmen der 'zweiten Generation' (vgl. Abbildung 22) kommen mit einer Rahmen-Ansichtsbreite von etwa 100 mm aus. Damit wird der Rahmenanteil deutlich geringer.



Die wichtigsten Maßnahmen zur wärmetechnischen Optimierung von Fensterrahmen sind in [AKKP 14] und [Schnieders 2000] beschrieben. Neuere Entwicklungen finden sich in [Kaufmann/ Schnieders 2002] und [AKKP 37] und in einer Herstellerliste unter www.passiv.de. An erster Stelle steht die Vergrößerung der Bautiefe des Rahmens, um eine Dämmschicht unterbringen zu können. 68 mm Bautiefe sind für das Passivhaus zu wenig, selbst wenn heute verfügbare, thermisch optimierte Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit verwendet werden. Heute ist eine Vielzahl von gut wärmedämmenden Fensterrahmen am Markt erhältlich: Sandwich-Kanteln aus Holz-Purenit-PUR-Purenit-Holz führen zu einer Bautiefe von etwa 110 mm. Eine ähnliche Konstruktion ist auch mit Holz-Kork-Holz-Kork-Holz verfügbar (vgl. www.passiv.de).

Einige Hersteller fertigen Fensterrahmen aus Holz mit einer Dämmschale aus Kork, PUR, EPS oder anderem Dämmmaterial, die aber nicht mit dem Holzrahmen verklebt, sondern verschraubt oder aufgeklipst ist. So kann die Konstruktion im Entsorgungsfall leicht in ihre Komponenten zerlegt werden. Bei Kunststoff-Fensterrahmen müssen die größeren Kammern der Profile mit Dämmmaterial gefüllt sein. Weit verbreitet sind Einschieblinge, die aus Plattenmaterial gefräst sind. Bei ausgeschäumten Profilen muss vom Hersteller die Rohdichte des Materials kontrolliert werden, weil diese die Wärmeleitfähigkeit stark beeinflusst. Rahmen von Kasten- und Verbundfenstern erreichen wegen ihrer großen Bautiefe die geforderten Dämmwerte auch als Vollholz-Konstruktionen. Bei Kunststoff-Profilen müssen die Kammern jedoch in jedem Fall mit Dämmstoff gefüllt werden (vgl. www.passiv.de).

Eine Vorsatzschale aus Aluminium kann in vielen Fällen zusätzlich eingesetzt werden, um eine verbesserte Wetterbeständigkeit und Wartungsfreiheit der Oberfläche herzustellen. Wichtig ist, dass diese Alu-Profile nur an der Oberfläche des Rahmens verlaufen und nicht in die Dämmschicht eingreifen. Dies ist vor allem relevant, wenn der Rahmen überdämmt werden soll. Dann muss das Alu-Profil an der Putzkante enden, sonst wird die Überdämmung teilweise unwirksam.

Zur Beurteilung eines wärmegeprägten Rahmens gilt folgende Regel: Gleichgültig, welches Material verwendet wird, es muss darauf geachtet werden, dass die wärmedämmende Schicht den Rahmen möglichst ununterbrochen und 'gerade' durchzieht. Einzelne isoliert angeordnete Einsätze aus dämmendem Material sind nur wenig wirksam. Betrachtet man die Isothermen im Rahmenprofil, Abbildung 22, so sollten sie möglichst 'kurz' sein, d.h. geradlinig durch das Rahmenprofil verlaufen, denn jede Verschwenkung vergrößert die wirksame Oberfläche, über die Wärme von innen nach außen ausgetauscht wird.

Zu zertifizierten passivhausgeeigneten Fenstern sind beim Passivhaus Institut (www.passiv.de) alle erforderlichen Daten zur energetischen Bilanzierung zu finden.

Thermisch getrennter Randverbund, erhöhter Glaseinstand

Standard-Fensterrahmen haben einen Glaseinstand von lediglich 15 mm. In der Standard-WSVG wird darüber hinaus am Glasrand ein Abstandhalter aus Aluminium eingesetzt, der eine erhebliche Wärmebrücke darstellt.

Die Entschärfung der Wärmebrücke am Glasrand erfolgt auf zwei Wegen. Am Glasrand wird ein thermisch getrennter Abstandhalter aus dünnwandigem Edelstahlblech (Wandstärke $\leq 0,2$ mm) oder aus Kunststoffprofilen verwendet (vgl. [Kaufmann/ Schnieders 2002]). Bei gleicher Geometrie des Rahmenprofils lassen sich damit die Wärmeverluste eines Fensters um bis zu 8 % verringern. Ein weiterer

Vorteil ist, dass wegen der geringeren Wärmebrückenwirkung eine Tauwasserbildung am Glasrand nahezu ausgeschlossen wird.

Ein erhöhter Glaseinstand ist wärmetechnisch ebenfalls vorteilhaft, 25 bis 30 mm sind nach neueren Untersuchungen unproblematisch (vgl. [Pfluger et al. 2003]). Neuere Rahmenentwicklungen kommen jedoch wieder davon ab, weil von Seiten der Architektur zunehmend schlankere Rahmenprofile verlangt werden. Die Rahmen der 'zweiten Generation' haben daher zwar eine Bautiefe von mehr als 120 mm aber eine Rahmenansichtsbreite von nur noch 100 mm (vgl. Abbildung 22); an der weiteren Verbesserung des Randverbunds wird gearbeitet.

Luftdichter Fensteranschluss, Gebrauchstauglichkeit

Neben den hier beschriebenen wärmetechnischen Eigenschaften eines gut gedämmten Fensterrahmens sind selbstverständlich die luftdichte Ausführung der umlaufenden Dichtungen (bis zu drei Dichtungsebenen sind inzwischen üblich), die Schlagregendichtheit und die Funktionssicherheit bzw. Gebrauchstauglichkeit für eine lange Lebensdauer des Fensters wichtig.

Behaglichkeitskriterium für Passivhaus geeignete Fenster

Die Forderung nach einem U-Wert von weniger als $0,85 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für das eingebaute passivhaus-geeignete Fenster leitet sich von den Anforderungen an die Behaglichkeit und aus der Energiebilanz des Gebäudes her (vgl. [EN ISO 7730]). Verzichtet man auf einen Heizkörper unter dem Fenster, so empfiehlt sich eine mittlere Temperatur an der Innenoberfläche des Fensters auch im Auslegungsfall von mehr als $17 \text{ }^\circ\text{C}$. Ansonsten kann es zu einem Kaltluftsee am Boden kommen, so dass beim Aufenthalt in der Nähe der Fenster die Behaglichkeit eingeschränkt wird. Die Forderung nach Vermeidung von Schimmelwachstum führt bei üblichen Raumluftfeuchten auf eine Oberflächentemperatur von mindestens $13 \text{ }^\circ\text{C}$ an jeder Stelle der inneren Fensteroberfläche, d.h. auch am Glasrand. Mit den oben erwähnten thermisch getrennten Abstandhaltern und einem erhöhten Glaseinstand lässt sich dies ohne weiteres realisieren (diese Kriterien werden im Rahmen der Zertifizierung eines „Passivhaus geeigneten Fensters“ überprüft.)

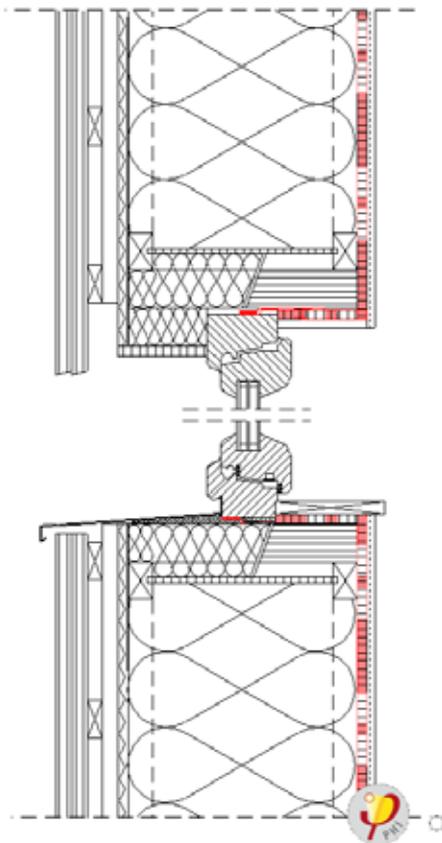


Abbildung 23: Optimierte Einbausituation: Fenster in Holz-Leichtbau-Wand. Das Fenster sitzt in der Mitte der Wand, d.h. in der Mitte der Dämmebene. In Laibung und Sturz kann der Rahmen weitgehend überdämmt werden. Die Wärmebrückenwirkung von statisch tragenden Elementen ist zu berücksichtigen.

$$\Psi_{\text{Einbau}} \leq 0,014 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$U_{\text{W,eingebaut}} = 0,82 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

(Quelle: [Kaufmann/Feist 2004])

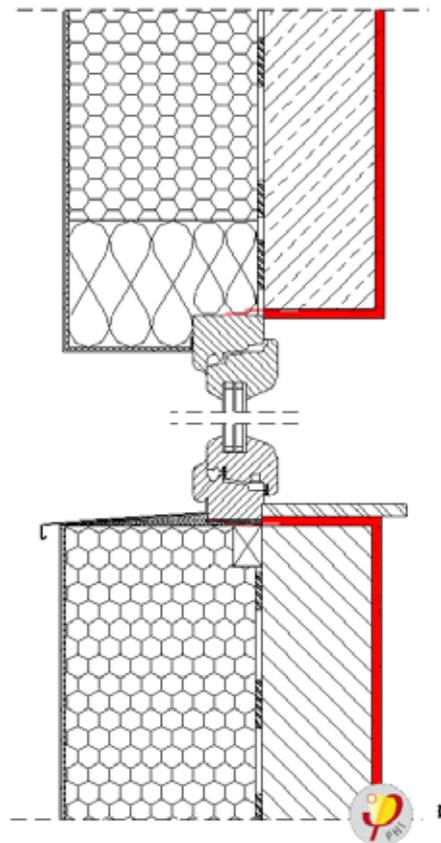


Abbildung 24: Optimierte Einbausituation: Fenster mit Einbaukonsole aus Holz oder Polyurethan-Recyclingmaterial in Massivbauwand mit Wärmedämm-Verbundsystem. Das Fenster wird vor dem Mauerwerk angeordnet und damit ausreichend weit in die Dämmebene gerückt. In Laibung und Sturz kann der Rahmen überdämmt werden.

$$\Psi_{\text{Einbau}} \leq 0,03 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$U_{\text{W,eingebaut}} = 0,80 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

(Quelle: [Kaufmann/Feist 2004])

5.2.4 Die Einbauwärmebrücke am Fenster

Beim Einbau eines Fensters in die Wand entsteht eine Wärmebrücke. Typische Wärmebrücken-Verlustkoeffizienten, Ψ_{Einbau} , von den für das Passivhaus optimierten Einbaudetails liegen im Brüstungsbereich bei $0,03 \text{ W/(mK)}$, weil hier wegen der Fensterbank und der Wasserführung der Rahmen kaum überdämmt werden kann. In Laibung und Sturz lassen sich mit einer konsequenten Überdämmung des Rahmens (Abbildung 24) auch negative Einbau- Ψ -Werte erreichen. Die genannten Werte beziehen sich auf eine Wand mit $U_{\text{Wand}} \leq 0,15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Ziel ist die Einhaltung des Grenzwerts für den U_{W} -Wert eines eingebauten Passivhausfensters von $U_{\text{W,eingebaut}} \leq 0,85 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.



Abbildung 25: Fenstereinbau mit Konsole aus Holz (unten) und Stahlwinkeln seitlich. Ein Wärmedämm-Verbundsystem wird anschließend angebracht bzw. der Rahmen wird überdämmt.
[Kaufmann/Peper 2009]

Viele konventionelle Einbaudetails weisen dagegen sehr große Wärmebrückeneffekte auf. Wird das Fenster nicht wie in Abbildung 23 und Abbildung 24 in der Dämmebene angeordnet, sondern weit aus der Mitte des Wandaufbaus heraus platziert, auf einem durchgehenden Brett befestigt oder beim Massivbau mit Wärmedämm-Verbundsystem auf dem Mauerwerk aufgesetzt, so können die durch ungünstigen Einbau verursachten Wärmebrückenverluste so groß werden, dass sich trotz der Verwendung eines thermisch optimierten Fensters mit $U_W \leq 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für das eingebaute Fenster eine erhebliche Verschlechterung ergibt [Kaufmann/Feist 2004].

Generell gilt: das Fenster sollte möglichst in der Dämmebene platziert werden. Das bedeutet, dass das Fenster bezogen auf die fertige Wand inkl. Dämmung, etwa in der Mitte der Fensterlaibung sitzen sollte. Für den Bewohner hat sich dann gegenüber einem konventionellen Haus nichts geändert, außer dass die Wand insgesamt ein wenig stärker ist.

Bei einer massiven Wand mit Wärmedämm-Verbundsystem muss allerdings das Fenster, bevor das Wärmedämm-Verbundsystem angebracht wird, vor dem Mauerwerk befestigt werden. In Abbildung 24 ist dies mit einer Einbaukonsole realisiert. Die Konsole kann aus Holz oder PU-Recyclingmaterial bestehen, die eine vergleichsweise geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen. In Abbildung 25 ist eine solche Konsole zu sehen. Zusätzlich werden Edelstahlwinkel seitlich und oben zur Befestigung des Fensters angebracht.

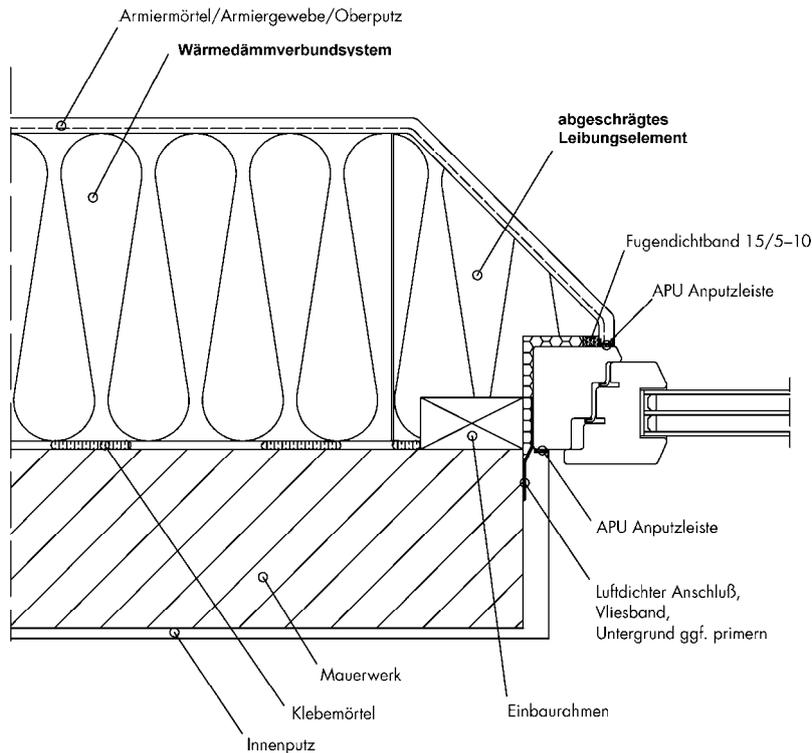


Abbildung 26: Ein Hersteller bietet ein abgeschrägtes Leibungselement für sein Wärmedämm-Verbundsystem als vorgefertigte Detaillösung an. Die Wirkung der Überdämmung des Rahmens bleibt weitgehend erhalten, während die seitliche Laibungverschattung deutlich verringert wird. (Quelle: ebök, Tübingen)

Bei der Zertifizierung von Fenstern als passivhaus-geeignetes Bauteil (vgl. www.passiv.de) werden neben den Eigenschaften des Fensters auch Einbaudetails für verschiedene Wandsysteme geprüft, die der Fensterhersteller ausarbeitet. Beim Einsatz von zertifizierten Fenstern kann der Architekt daher auf diese Einbaudetails zurückgreifen und braucht selbst keine weiteren Wärmebrückenuntersuchungen mehr durchzuführen.

Es kann von Vorteil sein, die äußere Fensterlaibung abzuschrägen, damit ein größerer freier Raumwinkel entsteht und die Sonne von der Laibung weniger stark abgeschattet wird. Für den Wärmeschutz ist es unerheblich, ob die Laibung rechteckig oder abgeschrägt ausgeführt wird. Ein Hersteller bietet inzwischen für sein Wärmedämm-Verbundsystem vorgefertigte abgeschrägte Formteile für die Laibung aus Mineralwolle an (Brandschutz), siehe Abbildung 26. Bei Fenstern auf der Südseite kann jedoch ein nicht abgeschrägter Sturz für die erwünschte Verschattung im Sommer sinnvoll sein. Eine Optimierung sollte im Einzelfall im Rahmen der energetischen Bilanzierung (vgl. Abschnitt 10) erfolgen.

Rollläden und Jalousien

Rollläden oder Jalousien sind prinzipiell auch im Passivhaus möglich. Ihr Einbau verursacht jedoch eine zusätzliche Wärmebrücke. Wenn möglich sollten Vorbau-Rollläden gewählt werden, die vor einer mindestens 6 cm starken Dämmschicht angeordnet werden, so dass sich auf der Innenoberfläche kein Tauwasser bilden kann, oder der Sonnenschutz wird vollständig vor die Fassade gehängt. Hinsichtlich

der Luftdichtheit ist es vorteilhaft, wenn die Jalousie elektrisch oder mit Kurbelwelle angetrieben wird. Kabeldurchführungen für den Antriebsmotor müssen natürlich luftdicht ausgeführt werden [Kaufmann/Feist 2004].

5.2.5 Eingangstüren / Außentüren

Außentüren sind thermisch und bezüglich der Luftdichtheit häufig Schwachpunkte und sind außerdem kostenintensive Bauteile. Aus diesem Grunde sollte schon vor der Auswahl bestimmter Produkte überlegt werden, ob nicht die Anzahl der Außentüren (Technik, Lager, Geräträume) reduziert werden kann.

Passivhaus-Qualität

Die Tür muss bei einer Prüfgröße von 1,10 m x 2,20 m im eingebauten Zustand einen U-Wert von $U_{D, eingebaut} \leq 0,80 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erreichen. Die Luftdichtheit ist wichtig: die umlaufenden Dichtungen sollten oben und seitlich zweifach und an der Schwelle mindestens einfach ausgeführt sein. Die Luftdichtheitsklasse 3 nach EN 12207 muss unter den Prüfklimaten d und e nach EN 1121 (bezogen auf die Fugenlänge) nachgewiesen werden: $Q_{100} \leq 2,25 \text{ m}^3/(\text{hm})$ bei 100 Pa Druckdifferenz. Der Einbau von Eingangstüren muss luftdicht und wärmebrückenarm (auch an der Türschwelle) erfolgen. Zertifizierte Passivhaus-Außentüren weisen diese Werte im Zertifikat aus.

Als Alternative können konventionelle Eingangstüren mit thermisch hochwertiger Wärmeschutzverglasung in den Eingangsbereichen verwendet werden. Dies kann dann sinnvoll sein, wenn für ein größeres Gebäude nur wenige Eingangstüren benötigt werden, diese dann aber einer hohen Beanspruchung ausgesetzt sind, weil sie sehr häufig frequentiert werden (z.B. die Haupteingangstüren von Bildungsgebäuden). Dann macht es Sinn, hoch belastbare konventionelle Türkonstruktionen zu wählen. Die geringere thermische Qualität an dieser Stelle kann aufgrund der Größe von Bildungsgebäuden in der Regel durch andere Maßnahmen leicht kompensiert werden. Trotzdem müssen die Rahmenprofile solcher Türkonstruktionen bestimmte Mindestanforderungen erfüllen: Das thermisch getrennte Rahmenprofil muss einen U_f -Wert von höchstens $2.0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ haben. Die Wärmeschutzverglasung muss die folgenden Anforderungen erfüllen: $U_g \leq 0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, g-Wert $\geq 50 \%$. Die Verglasung muss einen thermisch getrennten Randverbund (also **kein** Aluminium) aufweisen. Die Luftdichtheit ist ebenfalls wichtig.

In Gruppen- und Betreuungsräumen, bei denen die Türen weniger häufig benutzt werden, sollten in der Regel Fenstertüren verwendet werden - mit thermischen Qualitäten gemäß den weiter oben im Abschnitt Fenster beschriebenen.

Praxistaugliche Lösungen für die Luftdichtheit

In der Schule Frankfurt am Riedberg wurden das Verhalten und dabei auch die Luftdichtheit der Eingangstüren im Praxisbetrieb näher untersucht [Peper et al 2007]. Für dauerhaft luftdichte Eingangstüren werden auch im Bereich der Schwelle Anschlagdichtungen empfohlen. Bauart bedingt ist hierfür ein Absatz erforderlich. In der Regel können bei ausreichend geringen Absätzen Anschlagdichtungen auch in Bildungsgebäuden verwendet werden. Bürstendichtungen erreichen keine ausreichende Luftdichtheit. Abbildung 27 zeigt die Türdichtungen zweier Passivhaus-Schulen. Dicht schließende Türen verringern eine ungewollte In- und Exfiltration. Im Betrieb sollte aufgrund der intensiven Nutzung das korrekte Schließen der Türschließer und die Türdichtungen regelmäßig überprüft werden.



Abbildung 27: Außentüren mit Absenk- und Anschlagdichtung. Eingangstüren sollten nach Möglichkeit eine Anschlagdichtung aufweisen. Eingangstüren von Passivhaus-Schulen (links: Frankfurt Riedberg, Architektur: 4a, Stuttgart / rechts: Schulpavillon Walldorf, Architektur: IB W. Herrmann, Walldorf).

5.2.6 Fenster – Aspekte der Sicherheit und Architektur

„Alle Räume der Kindertageseinrichtung, die dem Aufenthalt der Kinder dienen, sollen ausreichend natürlich be- und entlüftet werden können.“ so steht es in § 7 des Regelwerks der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung für Kindertageseinrichtungen, das bis zur Neufassung eines Werkes für Schulen auch auf andere Bildungseinrichtungen angewandt wird [GUV-SR S2]. Diese Forderung steht auch bei Bildungsgebäuden in Passivhausbauweise trotz obligatorischer mechanischer Lüftung an oberer Stelle. Es muss von den baulichen Voraussetzungen her möglich sein, Aufenthaltsräume in Bildungsgebäuden während der Sommermonate unabhängig von der Lüftungsanlage zu belüften. Zum einen ist dies eine Maßnahme, die einen ganzjährigen Betrieb der Lüftungsanlage und den damit verbundenen Stromverbrauch zumindest teilweise vermeiden kann. Zum anderen zeigt die

Erfahrung, dass die Nutzer im Sommer über ausreichend große Fensterflächen lüften wollen und geschlossene Fenster oder zu wenig bzw. zu kleine Öffnungsflügel in der Regel nicht akzeptieren (vgl. Abschnitt 8.2).

Daher schreibt z.B. die Stadt Frankfurt in ihren „Leitlinien für wirtschaftliches Bauen“ [Linder 2009] vor: „Für die natürliche Lüftung in Unterrichtsräumen sind Fenster-Öffnungsflügel von mindestens 0,1 m² je Sitzplatz bei Querlüftung und min. 0,3 m² je Sitzplatz ohne Querlüftung vorzusehen. Dies gilt auch beim Einsatz einer mechanischen Lüftungsanlage (Passivhaus).“ Werden ausschließlich Kippfenster zum Lüften vorgesehen, so ist in der Regel auch mit einer großen Anzahl von Öffnungsflügeln kein ausreichender Lüftungsquerschnitt für einen Klassenraum oder ein Gruppenraum einer Kindertagesstätte erzielbar. Beim Einsatz von Drehflügeln reichen hingegen wenige Fenstertüren aus.

Die Verwendung von Drehflügeln ist jedoch nicht überall problemlos möglich. Die gesetzlichen Unfallkassen schreiben vor: „Fenster müssen so gestaltet sein, dass sie beim Öffnen und Schließen sowie in geöffnetem Zustand Schülerinnen und Schüler nicht gefährden.“ § 10 Abs.2 [GUV-V S1]. Aus diesem Grund werden häufig Drehflügel komplett vermieden oder mit Drehsperren versehen, so dass die Fenster nur bis zur Vorderkante der Fensterbank geöffnet werden können. Durch diese Lösung ist allerdings die Öffnungsfläche nur wenig größer als bei der Wahl von Kippflügeln. Die Unfallkassen weisen jedoch ausdrücklich darauf hin, dass ihre Vorschläge zum Erreichen der notwendigen Sicherheit nicht bindend sind, sondern dass „andere, mindestens ebenso sichere Lösungen“ nicht ausgeschlossen sind, vgl. Hinweis zur Durchführungsanweisung, [GUV-V S1].

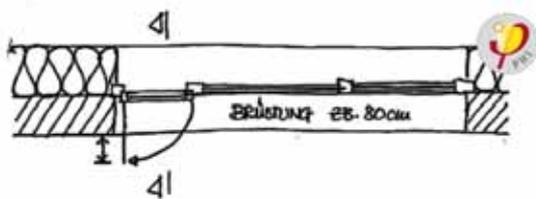


Abbildung 28: Schmale Öffnungsflügel, die nur unwesentlich über die innere Fensterleibung hinausragen Architektur: BLFP, Friedberg / Haustechnik: Neuplan, Gießen
(Quelle: PHI [AkkP 33])

Es lohnt sich demnach, das Beratungsangebot der Unfallkassen frühzeitig während der Planungsphase in Anspruch zu nehmen und für das jeweilige Projekt eine optimierte Lösung hinsichtlich Sicherheit und der auch im Passivhausstandard notwendigen natürlichen Lüftung zu finden. Mögliche Ausführungen wären z.B. einige schmale Drehflügel, die aufgrund der durch den passivhaustauglichen Fenstereinbau bedingten tieferen Laibung nur geringfügig über die Fensterbank hinausragen.

Eine andere Möglichkeit wäre, Öffnungsflügel oder Fenstertüren gegen eine Zwischenwand aufschlagen zu lassen oder nur im Oberlichtbereich Drehflügel zu verwenden. Grundsätzlich ist auch zu klären, ob die Fenster von jedem Schüler oder nur von Lehrern geöffnet werden können. Hier kann es auch einen Unterschied in der Beurteilung der Unfallgefahr geben.

Ein weiterer Aspekt, der bei der Aufteilung der Fensterflächen zu beachten ist, wäre die Gewährleistung einer natürlichen Nachtauskühlung in den Sommermonaten. Für Bildungsgebäude der Stadt Frankfurt a.M. sind z.B. Vorkehrungen zur natürlichen Nachtauskühlung obligatorisch, um auch hier die Betriebskosten durch kürzere Laufzeiten der Lüftungsanlage zu reduzieren: „Zusätzlich sind zur Vermeidung sommerlicher Überhitzungserscheinungen in Klassen- und Gruppenräumen ausreichend große Nachtlüftungsklappen mit geeignetem Einbruch- und Insektenschutz vorzusehen.“ [Linder 2009].

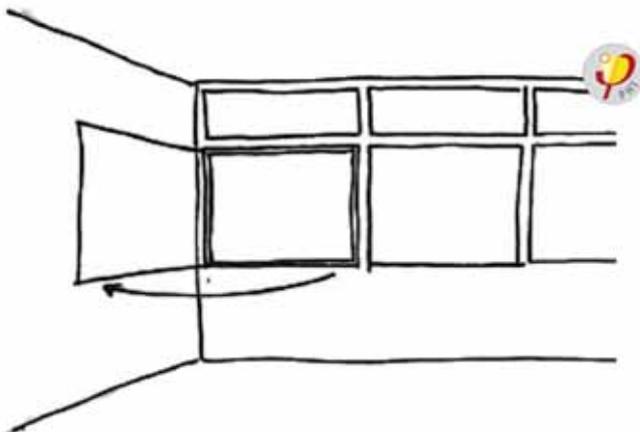


Abbildung 29: Fensterflügel schlägt nach innen auf, zur Vermeidung von Unfallgefahren aber gegen eine Zwischenwand. (Quelle: PHI)

Die notwendigen Öffnungsquerschnitte für eine natürliche Nachtauskühlung stehen – wie auch bei der Taglüftung – in engem Zusammenhang mit der Möglichkeit einer Querlüftung durch das Gebäude im Gegensatz zu einer raumweisen Lüftung (vgl. Abschnitt 8.4). Da Fenster für die Nachtauskühlung außerhalb der Nutzungszeiten geöffnet werden, sind die Unfallverhütungsvorschriften der Unfallkassen hier in der Regel nicht relevant. Es empfiehlt sich, dieses rechtzeitig zu überprüfen. Allerdings sind Belange des Einbruchschutzes zu klären.

5.3 Dächer

Prinzipiell kann bei Dachkonstruktionen zwischen belüftetem (Kaltdach) und unbelüftetem Dach (Warmdach) unterschieden werden. Bei einem belüfteten Dach ist der Aufbau nach außen diffusionsoffen, wodurch sich der Aufbau als feuchtespezifisch unproblematischer darstellt. Bei nicht belüfteten Dächern hingegen ist die äußere Abdichtung diffusionsdicht. Dieser Aufbau ist bauphysikalisch kritischer und erfordert eine besondere Sorgfalt bei Planung und Ausführung. Im Bereich der Bildungsgebäude findet man – zumindest im Neubau – häufig flache Dächer, die auch meist als unbelüftete Warmdächer ausgeführt werden.

Beide Konstruktionsarten sind auch als hochwärmegedämmtes Dach möglich, sowohl in Massivbauweise als auch in leichter Konstruktion aus Holz oder Metall. Dächer sollten im Passivhausstandard U-Werte zwischen 0,15 und 0,10 W/(m²K) erreichen, wobei durch die Ausdämmung hoher Holztragelemente von weit gespannten Flachdächern sehr gute U-Werte recht kostengünstig erreicht werden können (vgl. Abbildung 30).



**Abbildung 30: Montage der Holzbau-Dachelemente der Montessori-Schule in Aufkirchen. Auf eine tragende Unterkonstruktion wurde zugunsten großer Spannweiten und hoher Träger verzichtet. Durch entsprechend starke Dämmung zwischen den Trägern wurde so der U-Wert von 0,10 W/(m²K) sehr kostengünstig erreicht [Vallentin 2006].
Architektur: Walbrunn Grotz Vallentin, Bockhorn. (Foto: G. Vallentin)**

Die bauphysikalischen Grundsätze gelten bei hochwärmegedämmten Dachaufbauten genauso wie bei konventionellen Dämmstärken – die Beachtung der feuchtespezifischen Anforderungen an ein diffusionsoffenes oder diffusionsdichtes Dach sind unabdingbar. Neben der Vermeidung von Wärmebrücken ist vor allem im Dachbereich sorgfältig auf eine luftdichte Ausführung der Konstruktion zu achten (vgl. Kapitel 5.3.4 Luftdichtheit).

Der Protokollband des Arbeitskreises kostengünstiger Passivhäuser zum Thema „Hochwärmegedämmte Dachkonstruktionen“ [AkkP 29] bietet eine fundierte Erläuterung der bauphysikalischen Grundlagen und der sich daraus ergebenden praktischen Ausführung der verschiedenen Dachkonstruktionen. Es wird dargelegt, dass die Anforderungen an eine passivhausgeeignete Dachkonstruktion bei

entsprechender Umsetzung bauphysikalisch unproblematische Ausführungen und somit schadensfreie Konstruktionen gewährleisten.

5.3.1 Belüftetes Dach (Kaltdach)

Belüftete Konstruktionen sind häufiger bei geneigten Dächern zu finden, da bei Flachdächern oder flach geneigten Dächern ein erhöhter Aufwand notwendig ist, um eine ausreichende Durchlüftung der Konstruktion zu gewährleisten. Der Belüftungsraum muss ausreichend hoch sein und die Träger dürfen die Luftströmung nicht behindern. Im Bereich von Bildungsgebäuden sind belüftete Dächer daher eher bei kleineren Einheiten wie Erweiterungsbauten und kleineren Kindergärten oder bei Bestandsgebäuden zu finden.

Ein wesentlicher Vorteil einer belüfteten Konstruktion wird darin gesehen, dass durch die Belüftung Kondensat und Baufeuchte abtrocknen können. Die Innenverkleidung einer solchen Konstruktion muss jedoch trotz Belüftung mindestens dampfbremsend sein ($s_d \geq 2 \text{ m}$), um zu verhindern, dass ein zu hohes Maß an Wasserdampf in die Konstruktion gelangt. Ein wichtiger Punkt ist auch hier die sorgfältige luftdichte Verlegung der Dampfbremse. Wasserdampfkongvektion durch Leckagen kann zu beträchtlichen Kondensatmengen führen, die auch mit der belüfteten Konstruktion nicht abgeführt werden können (vgl. [Feist 2004]).

Zu beachten ist außerdem, dass die Tragkonstruktion der Dachhaut meist die Wärmedämmung durchdringt, was zu zusätzlichen Wärmeverluste im hochwärmedämmten Dach führt und bei der Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten durch z.B. entsprechende Holzanteile berücksichtigt werden muss.

5.3.2 Nicht belüftetes Dach (Warmdach)

Das unbelüftete Flachdach kann mit geringeren Konstruktionshöhen ausgeführt werden, sowohl in massiver als auch in leichter Konstruktion (Holz - oder Metallkonstruktion). Beide Konstruktionsarten sind auch als hochwärmedämmte Dächer möglich.

Da die obere Abdichtung bei einem unbelüfteten Dach diffusionsdicht ausgeführt wird, muss durch eine Dampfsperre das Eindringen von Wasserdampf innenseitig vermieden werden. Eine wichtige Voraussetzung hierfür ist eine sorgfältig geplante und ausgeführte luftdichte Verlegung der Dampfsperre, vor allem im Stoßbereich und an den Anschlüssen zu übrigen Bauteilen, um Wasserdampfkongvektion zu vermeiden. Zur Qualitätssicherung der Dachkonstruktion sollte der im Passivhaus ohnehin notwendige Drucktesttermin genutzt werden.

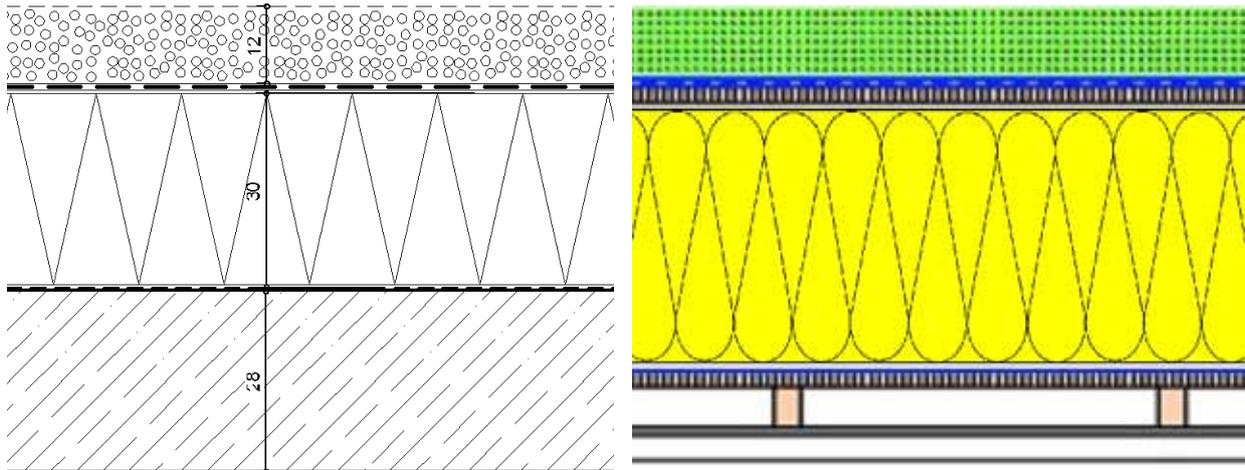


Abbildung 31: Links: Riedberg-Schule in Frankfurt. Nicht belüftetes Flachdach mit massiver Tragkonstruktion Quelle: 4A Architekten, Stuttgart. Rechts: Montessori-Schule in Aufkirchen. Nicht belüftetes begrüntes Flachdach mit leichter Tragkonstruktion und feuchteadaptiver Dampfbremse. (Quelle: Walbrunn Grotz Vallentin Architekten, Bockhorn, [AkkP 29])

Um eine nicht belüftete Konstruktion fehlertoleranter zu machen, ist statt der Dampfsperre auf der Innenseite eine sogenannte "feuchteadaptive Dampfbremse" sinnvoll (hierfür ist ein rechnerischer Nachweis des Tauwasserschutzes erforderlich). Diese hat die Eigenschaft, im Winter hinreichend dampfdicht ($s_d \geq 5 \text{ m}$), während der Trocknungsphase aber nahezu diffusionsoffen zu sein ($s_d \leq 0,3 \text{ m}$). Auch eine Konstruktion mit feuchteadaptiver Dampfbremse muss eine gute Luftdichtheit erreichen (vgl. [Kah 2004]).

Wie bei belüfteten Dächern ist auch bei Warmdächern darauf zu achten, dass die Dämmschicht durchdringende Befestigungen von möglichen Dacheindeckungen wärmebrückenarm ausgeführt werden. Dies kann z.B. mit Holzkonstruktionen wie Holzstegträgern, Z-Trägern, Boxträgern etc. erreicht werden.

Aber auch Metalleindeckung und/oder tragende Profile aus Metall sind als hochwärmegeämmte Dachkonstruktionen möglich. Abbildung 32 zeigt eine Lösung für Flachdächer. Eine Befestigungsschiene wird auf die Wärmedämmung aufgelegt und mit langen Schrauben an der Unterkonstruktion befestigt. Durch das Schienensystem wird die Wärmedämmung fixiert und gleichzeitig die Metalleindeckung gehalten. Da die Wärmebrücken durch die Befestigungsschrauben nur vereinzelt und punktförmig auftreten, ist dieser Aufbau bezüglich der Verluste durch Wärmebrücken mit einer Dachkonstruktion aus Holzstegträgern vergleichbar (vgl. [Kah 2004]).

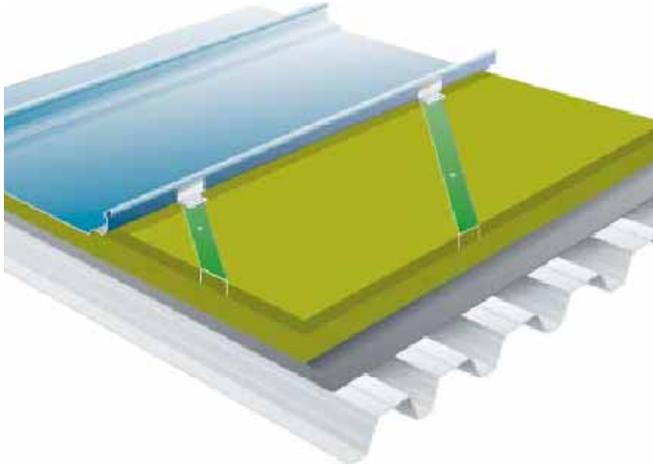


Abbildung 32: Unbelüftetes Flachdach mit Metalleindeckung (vgl. [Kah 2004]). Die Metalleindeckung wird über ein Schienensystem und Befestigungsschrauben gehalten, die gleichzeitig die Wärmedämmung fixieren. (Quelle: Firmenprospekt Rockwool)

Eine Besonderheit des Warmdaches stellt das Umkehrdach dar. Um die Temperaturschwankungen an der Dachabdichtung zu reduzieren, wird bei dieser Konstruktion die Wärmedämmung über der Abdichtung verlegt. Für Passivhäuser ausreichende Dämmstärken werden durch eine werkseitige Verklebung von extrudierten Polystyrol-Dämmplatten erreicht. Über der Wärmedämmung muss zusätzlich eine wasserabführende, diffusionsoffene Trennlage verlegt werden. Diese verhindert größtenteils, dass Niederschlagwasser auf der Dachhaut (unter der Wärmedämmung) abläuft und dadurch Wärmeverluste verursacht. Weiterführende Erläuterungen hierzu finden sich im Protokollband des Arbeitskreises kostengünstiger Passivhäuser zum Thema „Hochwärmedämmte Dachkonstruktionen“ (vgl. [Kah 2004]).

5.3.3 Wärmebrücken

Wie in der übrigen Gebäudehülle ist auch beim Dach darauf zu achten, die Dämmwirkung der Fläche nicht durch Wärmebrücken zu schwächen. Die Marker-Regel, d.h. das Prinzip einer das Gebäude lückenlos umschließenden Dämmhülle (vgl. Kapitel 4), muss selbstverständlich auch im Dach beachtet werden. Sind Wärmebrücken unumgänglich, müssen sie durch sorgfältige Planung und Ausführung minimiert werden. Neben einer Erhöhung des Heizwärmebedarfs besteht ansonsten die Gefahr von Schadensfällen durch Taupunktunterschreitungen im Bereich der Wärmebrücke. Eine Lösung für einen Anschluss einer massiven Wandkonstruktion an ein geneigtes Dach in Holzkonstruktion ohne Dachüberstand zeigen Abbildung 33 und Abbildung 34.

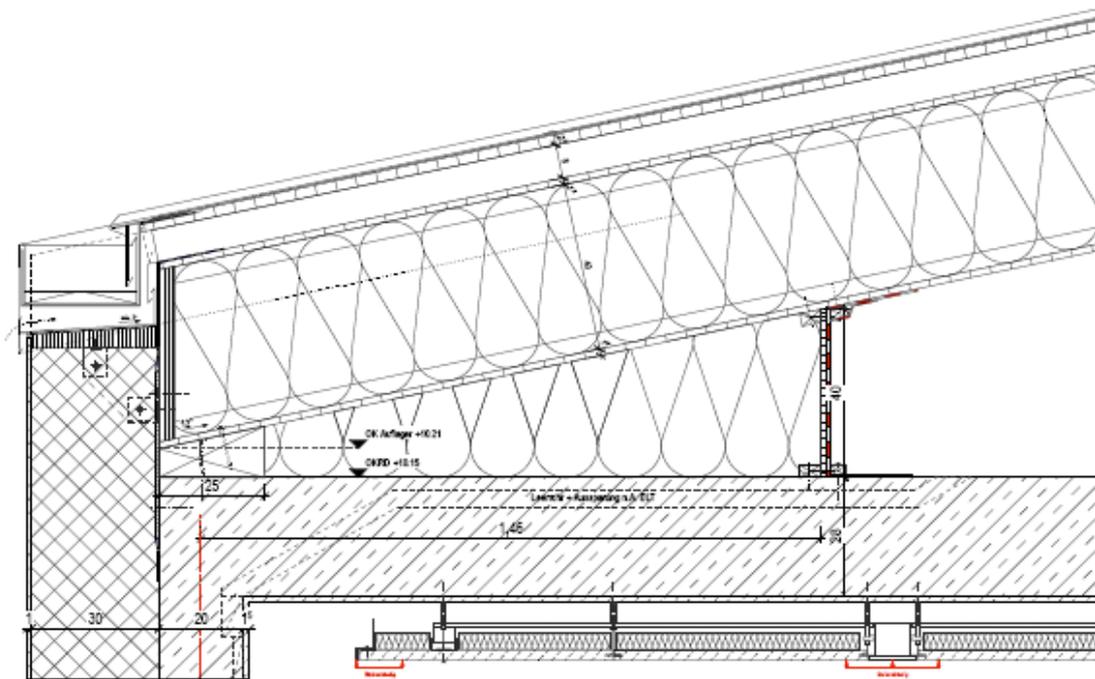


Abbildung 33: Tarifabschluss ohne Dachüberstand, Schule für praktisch Bildbare in Frankfurt a.M. (Quelle: Hausmann Architekten, Aachen)

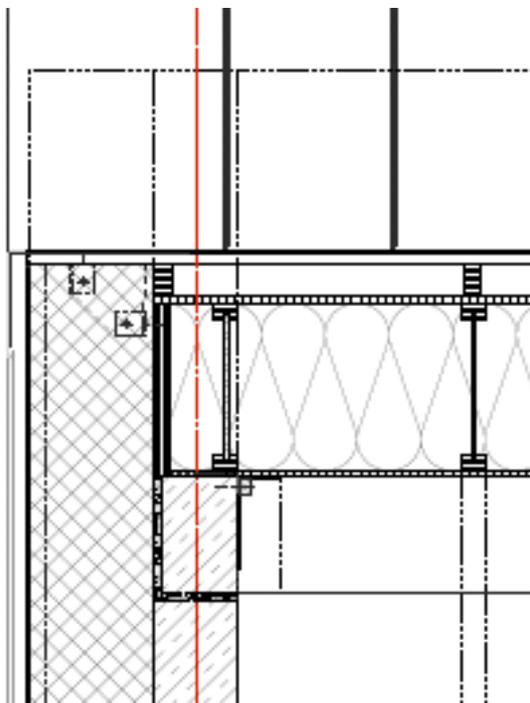


Abbildung 34: Ortgang ohne Dachüberstand, Schule für praktisch Bildbare in Frankfurt a.M. (Quelle: Hausmann Architekten, Aachen)

Im Schulbau werden häufig flache oder leicht geneigte Dächer gewählt deren Dachrand als Attika oder als Auskragung ausgeführt wird. Eine betonierte Attika stellt durch die Vergrößerung der Außenoberfläche eine geometrische Wärmebrücke dar, auch wenn sie umlaufend gedämmt wird. Wenn aus statischer Sicht auf eine betonierte Attika verzichtet werden kann, sind ausgedämmte „Kästen“ aus Holz- oder Betonwerkstoffplatten oder – als schmalere Variante – Aufkantungen aus Holzwerkstoffen vorzuziehen, die lediglich den oberen Abschluss der Fassadendämmung bilden (vgl. Abbildung 35). Diese Konstruktionen haben außerdem im Gegensatz zu einer umdämmten Attika aus Beton den Vorteil einer harten Grundlage für das Verkleben der Dachfolien.



Abbildung 35: Attika aus Holzwerkstoffen. Die Attika bildet lediglich den oberen Abschluss der Fassadendämmung. Das WDVS der Außenwand wird bis zum horizontalen Abschlussbrett hinaufgeführt. Adalbert-Stifter-Schule in Wiesbaden.
Architektur: Hügemeier und Thrun Architekten, Wiesbaden

Sind Dachüberstände vorgesehen, lassen sich diese auch bei massiven Dachkonstruktionen wärmebrückenarm realisieren. So wurden z.B. bei der Albert-Einstein-Schule in Schwalbach a. Taunus auskragende Sparren in der Dämmebene des Daches verlegt, wie Abbildung 36 zeigt.

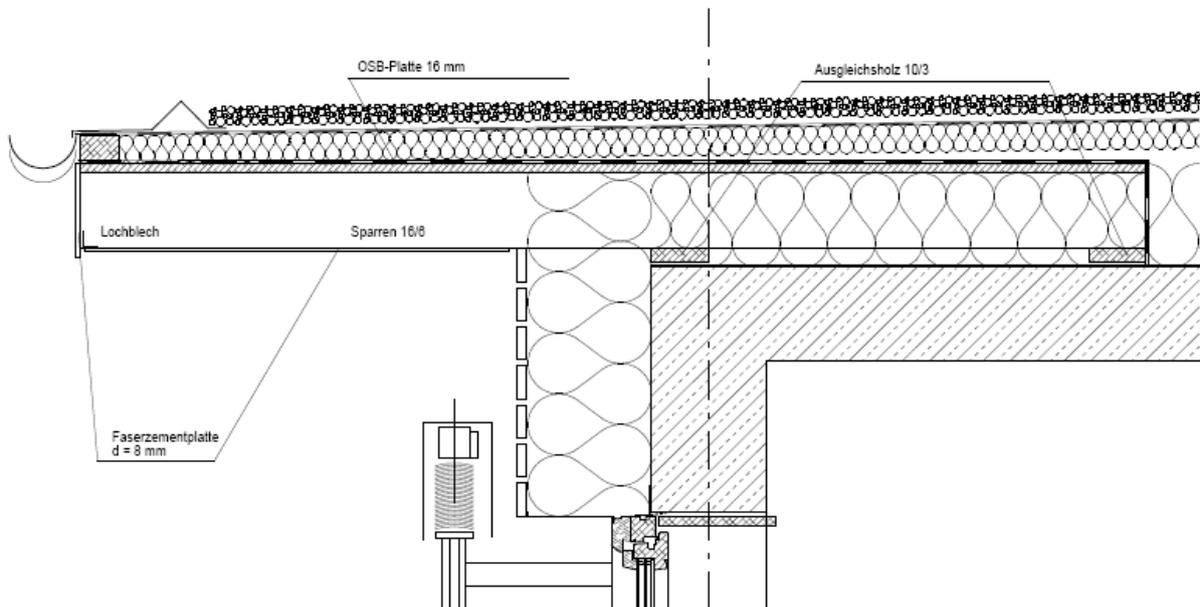


Abbildung 36: Nicht belüftetes Flachdach mit massiver Tragkonstruktion und wärmebrückenarmer Auskragung. Albert-Einstein-Schule in Schwalbach. Heibel + Wirth - Architekten, Frankfurt. (Quelle: Heibel + Wirth Architekten)

Für Durchdringungen der Dämmhülle gilt – wie beim Thema Luftdichtheit – auch in Bezug auf Wärmebrücken zunächst das Prinzip der Vermeidung. So sollten z.B. wenn möglich Unterdach-Entlüfter einer Fallrohrentlüftung über Dach vorgezogen werden. Auch auf innenliegende Regenfallrohre kann verzichtet werden, wenn die Entwässerung von Flachdächern zu den Randbereichen hin erfolgt und dann wärmebrückenfrei vor der Fassade geführt werden kann.

5.3.4 Luftdichtheit

Im Dachbereich ist das Thema Luftdichtheit ganz besonders relevant und zwar aus Gründen der Bauschadensvermeidung. In einem beheizten Gebäude besteht (in der Heizzeit) durch den thermischen Auftrieb fast dauerhaft ein Überdruck im Dachgeschoss (vgl. [Feist 2004], [Peper 2004]). Dies führt zu einer Durchströmung der Restleckagen von innen, also von tendenziell feuchterer Innenraumluft nach außen. Diese feuchte Luft kühlt sich auf dem Weg nach außen ab und kann ihre Feuchtebelastung im kühleren Zustand nicht mehr „halten“ („Taupunktunterschreitung“). Die Feuchte kann sich dadurch in der Konstruktion sammeln. Diese wird – wenn das Wasser nicht periodisch in mindestens der gleichen Menge wieder abtrocknet – auf Dauer in ihrer Funktion (Wärmedämmung, statische Konstruktion) geschädigt oder gar zerstört.

Insbesondere bei Warmdächern mit einem nach außen diffusionsdichten Dachaufbau, der auf der Innenseite durch eine Dampfsperre begrenzt wird, sind daher – neben einer absolut unverzichtbaren Luftdichtheit in der Fläche – dauerhaft luftdichte Anschlüsse des Daches an die übrigen Bauteile von besonderer Bedeutung. Hier bietet der Passivhaus-Standard mit seinen ohnehin hohen Anforderungen an die Luftdichtheit eine besonders große Sicherheit gegen Bauschäden.

Größere Gebäude können durch das günstigere A/V-Verhältnis häufig einen niedrigeren n_{50} -Wert einhalten als der Passivhaus-Grenzwert von $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$. Abbildung 37 zeigt eine Auflistung von Drucktestergebnissen von Bildungsgebäuden. Vor allem bei Sporthallen zeigt die Erfahrung, dass aufgrund der großen, kompakten Baukörper sehr gute Drucktest-Kennwerte erzielbar sind.

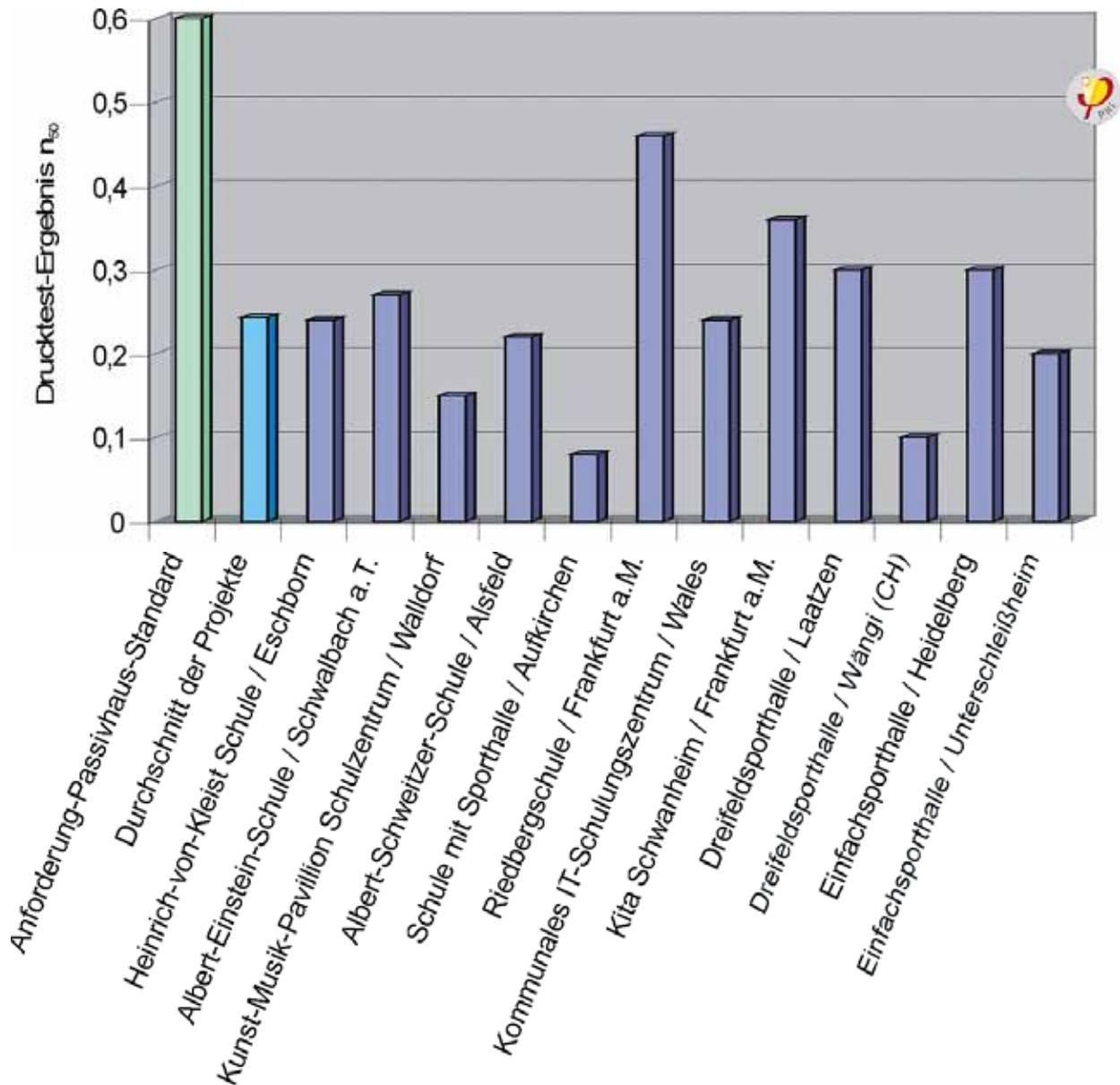


Abbildung 37: Exemplarische Drucktestergebnisse bei Passivhaus-Bildungsgebäuden. Die Passivhaus-Anforderung wird regelmäßig deutlich unterschritten.
(Quelle: PHI)

5.3.4.1 Anschlüsse

Um die Luftdichtheit im Dach zu gewährleisten, müssen zum Einen die Materialien der luftdichten Ebene untereinander dauerhaft verbunden sein. Zum Anderen ist auch besonderes Augenmerk auf luftdichte Verbindungen von Dachfläche und Wand zu legen. Entscheidend ist dabei je nach Art der Fläche (Holzwerkstoffplatten, Folien, Beton oder Mauerwerk) die Wahl der richtigen Verbindungsarten und -materialien. In [Peper 2004] werden die verschiedenen Anschlussmaterialien je nach Art der zu verbindenden Bauteile beschrieben. Für die luftdichte Verbindung von harten Holzwerkstoffplatten oder Folien gibt es z.B. spezielle dehbare Klebebänder, die

auch Bauteilbewegungen in gewissen Grenzen ohne Defekt aushalten können. Die Verbindung von Holzwerkstoffplatten als luftdichte Ebene im Dach und dem Wandputz wird beispielsweise mit Folienstreifen hergestellt, die mit den Holzwerkstoffplatten verklebt und durch einen Putzträger kraftschlüssig mit dem Putz verbunden werden. Bei der Auswahl der Verbindungsmaterialien sollten die Herstellerangaben beachtet und nur Produkte verwendet werden, durch die eine dauerhafte Verbindung der jeweiligen Bauteile garantiert wird.



Abbildung 38: Luftdichte Verklebung der Stöße von Holzwerkstoffplatten mit Spezial-Kleband. Deckenuntersicht des Schul-Pavillon Walldorf. Architektur: IB W. Herrmann, Walldorf.

Folien dürfen bei zu erwartenden Bauteilbewegungen (z.B. Anschluss Dach – Wand) nicht stramm an der Wand befestigt werden, sondern müssen mit ausreichend Spiel verlegt werden. So bleibt der Anschluss auch luftdicht, wenn der Putz in diesen Bereichen durch Bewegungen aufreißt. Dies konnte bereits bei vielen Gebäuden messtechnisch bestätigt werden (vgl. [Peper et al 2005a]).

5.3.4.2 Durchdringungen

Das in Kapitel 5.3.3 (Wärmebrücken) beschriebene Prinzip, die Anzahl von Durchdringungen der Gebäudehülle zu minimieren, gilt auch aus Gründen der Luftdichtigkeit. Die Vermeidung von Fallrohrentlüftungen über Dach reduziert z.B. nicht nur die Wärmeverluste, sondern vermeidet auch potentielle Undichtheiten.

Für notwendige Durchdringungen von luftdichten Holzwerkstoffplatten oder Folien durch Kabel- und Rohrdurchführungen sind von einigen Herstellern Klebemanschetten verfügbar. Diese werden für diverse Anwendungen und in verschiedenen Rohr- bzw. Kabeldurchmessern angeboten.

Für eine luftdichte Ausführung von Durchdringungen sind neben der beschriebenen sorgfältigen Planung eine Koordinierung der Gewerke und eine ausreichende Kommunikation entscheidend. Abbildung 39 zeigt die Auswirkungen einer schlechten Planung der Arbeitsabläufe im Bereich der Abdichtung: Ein in der Wand verlegtes Kabel war noch nicht eingeputzt, die luftdichte Ebene des Dachs mit einer PE-Folie aber bereits am Putz verklebt. Im Bereich der Kabeldurchführung ist damit eine nennenswerte Leckage vorhanden, welche nur mit erheblichem Aufwand nachträglich verschlossen werden kann (vgl. [Peper 2004]).



Abbildung 39: Die Kabelführung in der Wand ist unverputzt, obwohl der Dachanschluss mittels Folienverklebung bereits hergestellt wurde. [Peper 2004]

Weitere detaillierte Erläuterungen von Problemstellungen und Lösungsbeispiele finden sich im Beitrag von Sören Peper zum AkkP „Hochwärmedämmte Dachkonstruktionen“ (Arbeitskreis kostengünstiger Passivhäuser, Protokollband 29) [Peper 2004].

5.3.5 Besonderheiten im Altbau

Für die hochwärmedämmende Sanierung von Flachdächer ist das sogenannte Duo-Dach-System eine mögliche Konstruktion (vgl. [Kah 2004]): Auf die bestehende Dachdämmung wird auf einer gegebenenfalls ausgebesserten Dachabdichtung die neue Dämmlage und darüber eine wasserführende diffusionsoffene Trennlage aufgebracht. Es wird sozusagen ein nicht belüftetes Flachdach mit einem Umkehrdach kombiniert (vgl. Kapitel 5.3.2). Die Dachabdichtung verläuft dann zwischen den Wärmedämmlagen und ist somit vor zu großen Temperaturschwankungen geschützt. Aufgrund der diffusionsdichten Abdichtung über der bestehenden Dämmung muss geprüft werden, ob eine funktionstüchtige

diffusionshemmende Schicht unterhalb der bestehenden Dämmung vorhanden ist. Diese muss gegebenenfalls ertüchtigt werden.

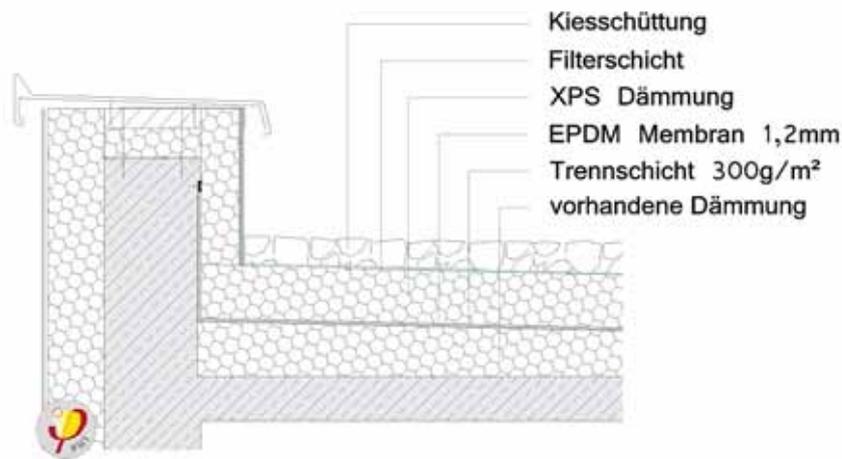


Abbildung 40: Aufdopplung einer bestehenden, zu dünnen Wärmedämmung oberhalb der Dachabdichtung als DUO-Dach. (Quelle: PHI [Bastian et al. 2010])

Geneigte Dächer sind in der Sanierung von Bildungsgebäuden häufiger zu finden, als im Neubaubereich. Hier hängt die Art der Dachsanierung stark von der Spannweite der Träger bzw. von deren Abmessungen ab. Die Sparrenhöhen bestehender Holzkonstruktionen reichen bei kleineren Spannweiten meist nicht aus, um die notwendige Dämmstärke aufzunehmen. Hier gibt es zum Einen die Möglichkeit, den Sparren durch Aufdopplung, Beilaschung oder nebengestellte Doppel-T-Träger zu vergrößern. Häufig sind Änderungen an den alten Sparren aufgrund der Statik ohnehin erforderlich. Zum Anderen kann die Dämmung zwischen den bestehenden Sparren mit einer Aufdach- oder Untersparrendämmungen kombiniert werden.

Im Beitrag von Berthold Kaufmann im Protokollband 29 „Hochwärmegedämmte Dachkonstruktionen“ [Kaufmann 2004] und im Handbuch „Altbaumodernisierung mit Passivhaus-Komponenten“ [Bastian et al. 2010] findet sich eine große Bandbreite an möglichen Lösungen und ein Vergleich der vorgestellten Holzkonstruktionen hinsichtlich Dämmwirkung und Kosten. Hier werden auch Beispiele aufgeführt, wie im Sanierungsbereich mit eingeschränkten Konstruktionshöhen hochwärmegedämmte Dachkonstruktionen realisiert werden können. Vor allem bei der Sanierung von innen, wenn also die bestehende Dachhaut nicht erneuert wird, fällt häufig die Wahl auf Dämmstoffe mit geringeren Wärmeleitfähigkeiten (z.B. Polyurethan, λ bis 0,024 W/(mK) möglich), um gute Dämmwerte zu erreichen [Kaufmann 2004].

Ob bei Holzkonstruktionen mit größeren Spannweiten die Trägerhöhe für eine passivhaustaugliche Zwischensparrendämmung ausreicht, muss von Fall zu Fall

ermittelt werden. Bei Metallkonstruktionen wird meist wegen der hohen Wärmeleitfähigkeit der Träger die hauptsächliche Dämmung als Aufdachdämmung realisiert.

In die Überlegungen zur Lage der Dämmung sollten die Dachanschlüsse einbezogen werden, um im Trauf- und Ortgang- oder Attikabereich unakzeptable Wärmebrücken zu vermeiden. Problematisch ist hier vor allem die Erhöhung der Dämmstärke nach innen, da in diesem Fall die Wärmebrücken bei Ortgang und tragenden Trennwänden oft nur schwer entschärft werden können. Auch die Beachtung feuchtespezifischer Anforderungen und die Lage der luftdichten Ebene müssen in die Entscheidung über den Dachaufbau einfließen.

Ein häufig auftretendes Hindernis bei der Wärmedämmung der Fassade sind zu geringe Dachüberstände. Im Ortgangbereich kann durch sogenannte Dachlattenverlängerungen - spezielle U-Profile aus Stahl - Abhilfe geschaffen werden (vgl. Abbildung 41). So kann mit geringem Aufwand ein Dachüberstand bis 450 mm für die Fassadendämmung geschaffen werden. Im Bereich der Traufe kann diese Verlängerung durch einen hölzernen Aufschiebling erreicht werden. Durch diesen Aufschiebling wird gleichzeitig die Dachhaut in diesem Bereich angehoben, so dass der wärmebrückenfreie Anschluss von Dach- oder oberster Geschosdecke zur Fassadendämmung hier auch ohne Aufsparrendämmung erreicht werden kann [Bastian et al. 2010].

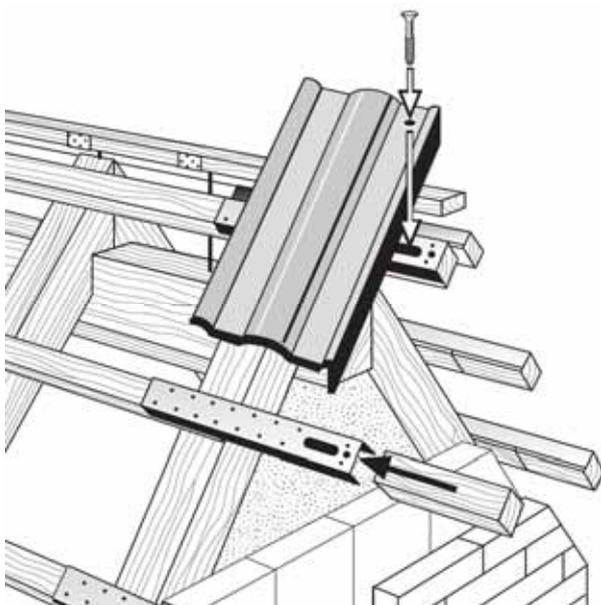


Abbildung 41: Links: Anpassung des Dachüberstands am Ortgang für die Wärmedämmung der Giebelwand mit Hilfe von U-Profilen zur Dachlattenverlängerung (*Quelle: Fleck GmbH*) Rechts: Verlängerung des Dachüberstands an der Traufe mit einem „Aufschiebling“ auf dem vorhandenen Sparren. Der Anschluss der Fassadendämmung an die Dämmung der obersten Geschosdecke kann ohne Lücke durchgeführt werden (Nürnberg, Jean-Paul-Platz, Architekt: Dr. Burkhard Schulze Darup, Nürnberg).

Bei zu sanierenden Bildungsgebäuden stellt sich häufig die Frage nach dem Umgang mit massiven Auskragungen oder Fassadenverzierungen, wie z.B. Gesimsen. Solche Bauteile stellen meist enorme Wärmebrücken dar und aus energetischer Sicht ist hier auf jeden Fall eine Umdämmung erforderlich. Ob solche architektonischen Merkmale den Charakter eines Gebäudes bestimmen oder ob man auf sie verzichten kann, ist immer im Einzelfall zu klären. Für den ersten Fall sei auf den Protokollband Nr. 32 des Arbeitskreises kostengünstiger Passivhäuser verwiesen, der sich mit Passivhauskomponenten und Innendämmung bei sensiblen Altbauten beschäftigt (vgl. [AkkP 32]).

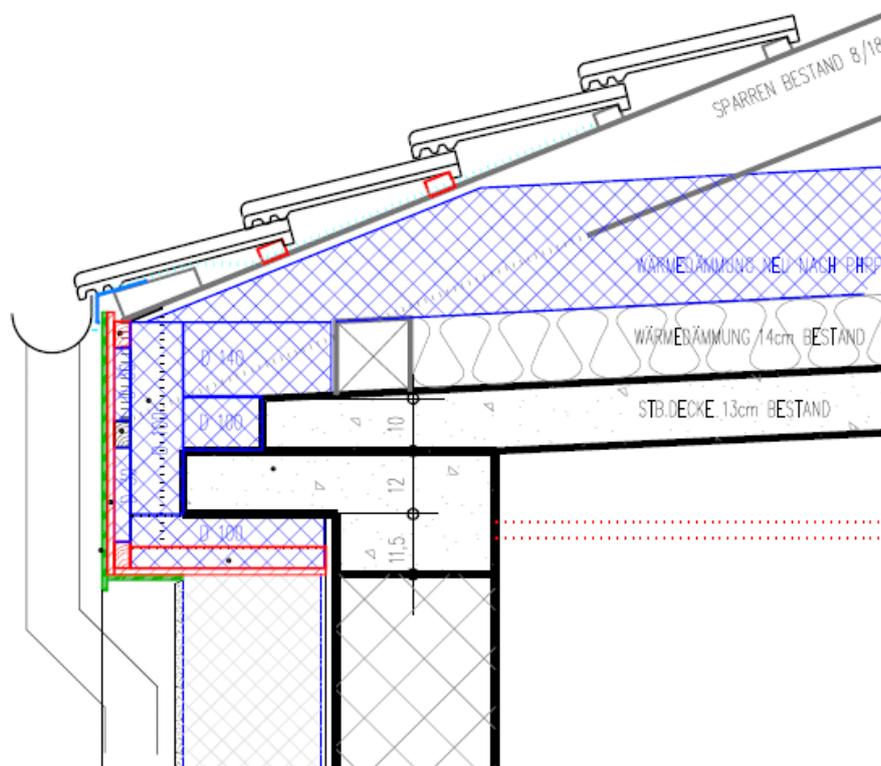


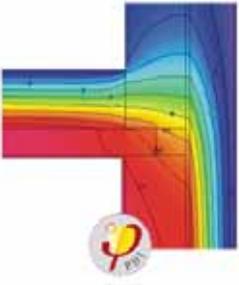
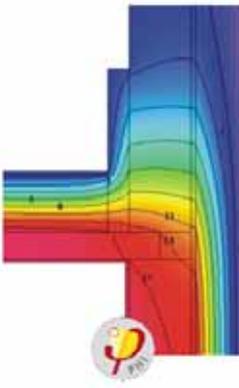
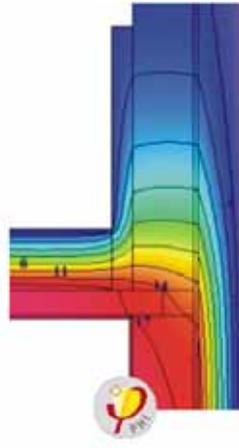
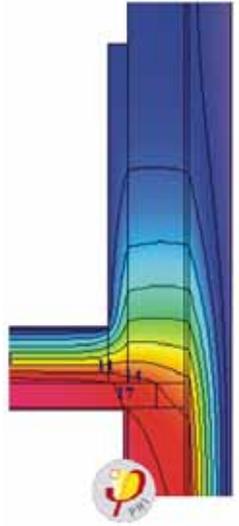
Abbildung 42: Umdämmung von bestehendem Gesims, Sanierung Wohngebäude Schlesierstrasse in Ludwigshafen. (Quelle: GAG, Ludwigshafen)

Im Falle eines nicht genutzten Dachraumes und einer erhaltenswerten Dachkonstruktion kann es sinnvoll sein, die Wärmedämmung einfach auf die oberste Geschosdecke zu legen. Die Dämmung der obersten Geschosdecke gehört – auch ohne auslösende Instandsetzung – zu den wirtschaftlichsten Wärmeschutzmaßnahmen (vgl. Arbeitskreises kostengünstiger Passivhäuser „Schrittweise Modernisierung mit Passivhauskomponenten“ (Protokollband Nr. 39), Beitrag von Zeno Bastian [Bastian 2009]).

Allerdings ergeben sich bei einer Dämmung der obersten Geschosdecke Wärmebrücken durch aufgehende Giebelwände und sonstige ins unbeheizte Dach führende Trennwände. Untersuchungen eines Beispielgebäudes haben ergeben, dass sich die durchaus signifikante Wärmebrücke durch eine aufgehende

Giebelwand mit einer 10 cm starken und 50 cm hohen inneren Begleitdämmung halbieren lässt. Eine weitere, jedoch nur leichte Verbesserung wird bei 1 m Höhe der Begleitdämmung erreicht. Eine nochmalige Erhöhung der Begleitdämmung bringt jedoch keinen nennenswerten Effekt mehr (vgl. Tabelle 1). Ähnlich verhält es sich bei Trennwänden. Die aufgehenden Wände des untersuchten Beispielgebäudes bestehen allerdings aus Hohlblocksteinen. Bei Wänden mit höherer Wärmeleitfähigkeit (Vollsteine oder Stahlbeton) ist auch ein höherer Wärmebrückenverlustkoeffizient zu erwarten, der eine längere Begleitdämmung sinnvoll machen kann [Bastian 2009].

Tabelle 1: Anschluss der Giebelwand an die gedämmte oberste Geschossdecke mit unterschiedlich langer innenseitiger Begleitdämmung (Länge der Giebelwand: 2 x 10 m). (Quelle: PHI [Bastian 2009])

			
Maße der Begleitdämmung an der Giebelwand [cm]:			
Keine	10 x 50	10 x 100	10 x 150
Wärmebrückenverlustkoeffizient Ψ -Wert [W/(m ² K)]			
0,127	0,064	0,055	0,055

Bei Treppenhauköpfen sollten in der Regel keine Wärmebrücken auftreten. Wenn sie als Teil der beheizten Zone rundherum mit Wärmedämmung eingepackt werden (inkl. einer wärmegeprägten und luftdichten Tür zum Dachraum) ergeben sich hier im Idealfall keine Durchdringungen der Dämmebene.

Auch bei Bildungsgebäuden kann es sinnvoll sein, die Sanierung – statt in einem Zuge – schrittweise in Einzelmaßnahmen durchzuführen. Wirtschaftlich sind die meisten Energiesparmaßnahmen an Altbauten nur dann, wenn am betroffenen Bauteil ohnehin Arbeiten erforderlich sind. Diesem Prinzip kann durch Komplett-sanierungen – bei all ihren Vorteilen – meist nicht bei allen Bauteilen Rechnung getragen werden, da nicht alle Bauteile gleich stark sanierungsbedürftig

sind. Die besondere Herausforderung bei einer schrittweise durchgeführten Sanierung besteht darin, bei der Ausführung von Einzelmaßnahmen schon die Auswirkungen auf andere Energiesparmaßnahmen zu berücksichtigen, die u.U. erst Jahre später durchgeführt werden sollen. Der Arbeitskreis kostengünstiger Passivhäuser „Schrittweise Modernisierung mit Passivhauskomponenten“ (Protokollband Nr. 39) beschäftigt sich ausführlich mit dieser Problematik und zeigt anhand vieler Beispiele, dass auch durch Sanierungen, die nicht in einem Zuge ausgeführt werden, ein optimaler Endzustand erreicht werden kann [AkkP 39].

5.4 Kalte Keller

5.4.1 Allgemeine Anforderungen

Der untere Abschluss des beheizten Gebäudevolumens zum kalten Keller oder zum Erdreich stellt eine besondere Herausforderung für den Wärmeschutz dar. Es müssen die Konstruktions- und Verkehrslasten sicher in den Baugrund geleitet werden. Durch größere Deckenspannweiten und Mehrgeschossigkeit sind diese Lasten häufig größer als im Wohnbau. Gleichzeitig müssen Wärmebrücken, durch Wände oder Stützen, die die Dämmebene durchdringen, nach Möglichkeit vermieden oder zumindest deutlich abgeschwächt werden. Abgemildert wird eine Wärmebrücken-Problematik allerdings dadurch, dass das Erdreich in der Heizperiode immer eine höhere Durchschnittstemperatur als die Außenluft hat, so dass die Wärmeverluste bei gleichem Wärmeschutzniveau entsprechend geringer ausfallen.

In Energiebilanzverfahren wird die im Vergleich zur Außentemperatur höhere Durchschnittstemperatur des Erdreichs und der Keller im Kernwinter durch Temperaturkorrekturfaktoren berücksichtigt. Oft werden pauschale Faktoren angesetzt. Genauere Berechnungen ermitteln gebäude- und standortabhängig den Erdreicheinfluss. Im Passivhaus-Planungstool [PHPP] ist ein entsprechendes Verfahren integriert (Tabellenblatt „Erdreich“ gemäß [EN ISO 13370]). Eine Ausnahme stellen Tiefgaragen unter beheizten Gebäuden dar. Durch die starke Durchlüftung zur Abführung der Abgase liegen die Temperaturen in der Garage nahen an den Außentemperaturen (Temperaturkorrekturfaktor nahe 1).

Bildungsgebäude haben meist keinen ausgeprägten Bedarf an unbeheizten Lagerflächen, so dass der Fall einer Vollunterkellerung mit Lage der thermischen Hülle in Ebene der Kellerdecke eher die Ausnahme darstellt. Bei einer Teilunterkellerung mit Haustechnikräumen empfiehlt sich eine Integration dieser Bereiche in die thermische Hülle, um die Wärmeverluste der Wärmeerzeugung, -speicherung und -verteilung, soweit möglich, für die Beheizung des Gebäudes nutzen zu können.

Soll dennoch ein kalter Keller zur Ausführung kommen, so kann die Wärmedämmung auf oder unter der Kellerdecke angeordnet werden. Möglich ist außerdem eine Kombination von Dämmung auf und unter der Kellerdecke. Die Dämmung unter der Kellerdecke liegt als Außendämmung bauphysikalisch auf der richtigen Seite. Machen große Spannweiten eine Vielzahl von Unterzügen notwendig, wird die Dämmung unter der Kellerdecke allerdings aufwändiger und die Unterzüge stellen auch bei vollständiger Umdämmung Wärmebrücken dar. Außerdem kann die Herstellung einer Dämmebene unterhalb der Kellerdeckendämmung recht aufwändig werden, wenn viele Installationsleitungen integriert werden müssen.

Dämmplatten können einfach von unten an die Kellerdecke geklebt, geschraubt oder gedübelt werden. Grundsätzlich ist im Kellerbereich meist keine hochwertige Sichtoberfläche der Dämmung nötig. Eine Spachtelung der Dämmplatten ist aber dennoch unverzichtbar, um Wärmeverluste durch Konvektion in Fugen zwischen und über den Platten zu reduzieren. Aus dem gleichen Grund sollten bei der Verwendung von Dämmplatten Produkte mit einem vorgefertigten Nut-und-Feder-System, mit dem die Platten weitgehend fugenfrei verbunden werden können, bevorzugt werden. Auf dem Markt sind solche Platten auch als Sandwichkonstruktion mit vorgefertigter Sichtoberfläche erhältlich. Ist eine geringe Aufbauhöhe gewünscht, so kann auf Hochleistungsdämmstoffe z.B. aus PUR oder in Teilflächen sogar auf Vakuumdämmung zurückgegriffen werden. Bei vielen Leitungen kann es sinnvoll sein, eine abgehängte Decke zu erstellen, die dann mit Dämmstoff ausgeblasen oder ausgestopft wird.

5.4.2 Wärmebrücken

5.4.2.1 Mauerwerkswände

Wie eingangs beschrieben, sollten Wände und Stützen die Kellerdeckendämmung nicht ohne eine thermische Trennung durchdringen, um hohe, durch diese Wärmebrücken verursachte Wärmeverluste zu vermeiden. Bei Mauerwerkswänden ist die Verwendung sogenannter Kimmsteine mit reduzierter Wärmeleitfähigkeit eine schon im Wohnbau bewährte und kostengünstige Lösung. Diese werden je nach Position der Dämmebene in der Mauersteinlage direkt unterhalb oder oberhalb der Kellerdecke eingesetzt. Unterschiedliche Materialien wie Porenbeton, Leichtbeton, Kalksandstein, Ziegel oder Schaumglas können verwendet werden, so dass alle im Mauerwerksbau üblichen Steinfestigkeitsklassen abgedeckt werden können. So kann eine Reduktion der Wärmebrückenverluste der andernfalls durchlaufenden Mauerwerkswand von ca. 50 bis 90 % erzielt werden (vgl. [AkkP 35]). Dies ist in der Regel die beim Massivbau günstigste Variante.

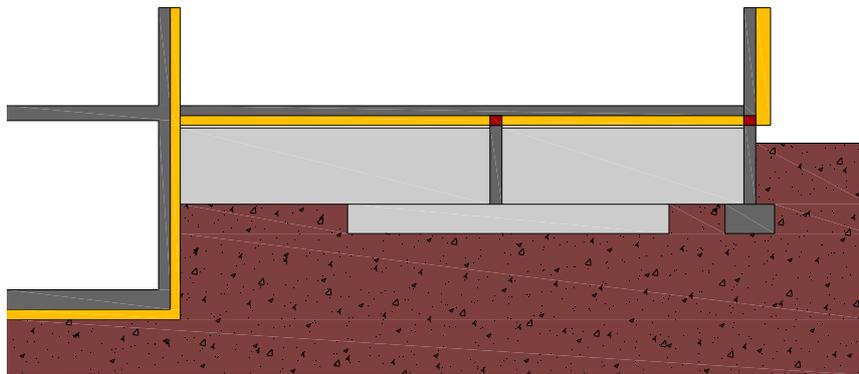


Abbildung 43: Thermische Trennung der Kellerwände durch Schaumglasplatten, Schul-Pavillon Walldorf / Architektur: IB W. Herrmann, Walldorf.

5.4.2.2 Stahlbetonwände und -stützen

Bei Stahlbetonwänden scheidet die Lösung mit Kimmsteinen naturgemäß aus. Durchgehende Stahlbetonwände stellen jedoch eine massive Wärmebrücke dar. Eine deutliche Verbesserung kann aber allein schon durch Verwendung von Stahlbeton-Stützen statt -Wänden erzielt werden. Trotz des höheren Bewehrungsgrads der Stützen können die Wärmeverluste so wegen des deutlich geringeren Querschnitts der Stützen um ca. zwei Drittel reduziert werden. Ob zur Abtragung der gleichen Last Stützen mit großem Querschnitt und geringem Bewehrungsgrad oder schmalere Stützen mit dafür mehr Bewehrung eingesetzt werden, macht dabei für die Höhe der Wärmeverluste nur einen geringen Unterschied.

Eine Reduktion der Wärmeverluste um etwa die Hälfte lässt sich durch eine so genannte Begleitdämmung erzielen. Hierbei wird die Stütze im Anschluss an die Kellerdeckendämmung auf etwa 1 m Länge mit einer ca. 10 cm dicken Wärmedämmung ummantelt. Größere Längen als 1 m führen nur noch zu einer geringfügigen Verringerung des Wärmeverlusts.

5.4.3 Luftdichtheit

Die Dämmung auf der Kellerdecke stellt grundsätzlich eine Innendämmung dar, mit den bekannten, bauphysikalischen Gefahren der Bildung von Tauwasser auf der kalten Seite der Dämmung bei unsachgemäßer Ausführung. Grundsätzlich sollte daher die luftdichte Ebene bei Dämmung auf der Kellerdecke an der Oberseite der Dämmung liegen - d.h. bauphysikalisch richtig im warmen Bereich. Dies gilt nicht bei nur geringen Dämmdicken, die durch eine Dämmung unterhalb der Kellerdecke ergänzt werden.

Bei Dämmung unter der Kellerdecke kann die Stahlbetondecke die luftdichte Ebene bilden. Auch dann muss die luftdichte Ebene der Außenwände sorgfältig angeschlossen werden, d.h. zum Beispiel, dass der Wandputz durchgehend bis auf den Rohfußboden heruntergezogen werden muss.

5.4.4 Kellertreppe

Abgänge in den kalten Keller stellen eine besondere Herausforderung für die Herstellung einer durchgehenden luftdichten und wärmedämmenden Gebäudehülle dar. Bei Fahrradkellern oder selten begangenen Lagerkellern kann es daher sinnvoll sein, auf eine interne Kellertreppe zu verzichten und einen Zugang von außen zu realisieren. Ist eine interne Kellertreppe nutzungsbedingt erforderlich, so kann der Treppenraum entweder innerhalb oder außerhalb des beheizten Gebäudevolumens liegen (siehe Abbildung 45). In ersterem Fall befindet sich die luftdichte und wärmedämmte Kellertür am unteren Treppenende, in letzterem am oberen Ende der Kellertreppe. Ausreichend Platz für die Dämmung der Hüllflächen des Kellerabgangs muss bei der Gebäudeplanung vorgesehen werden.



Abbildung 44: Deckendämmung und Begleitdämmung der Wände bei der Kellertreppe nach der Sanierung (Quelle [Kaufmann et al. 2009])

Ein offener Kellerabgang mit einem durchgehenden Luftraum zwischen beheiztem Gebäudevolumen und kaltem Keller sollte vermieden werden. Er führt zu sehr hohen Wärmeverlusten. Bei der Aufstellung einer Gebäudeenergiebilanz mit dem [PHPP] können diese Verluste bei Wärmedurchgang von oben nach unten näherungsweise mit einem äquivalenten Wärmedurchgangskoeffizienten von $12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für den Treppenraumquerschnitt angesetzt werden [Peper et al 2005].

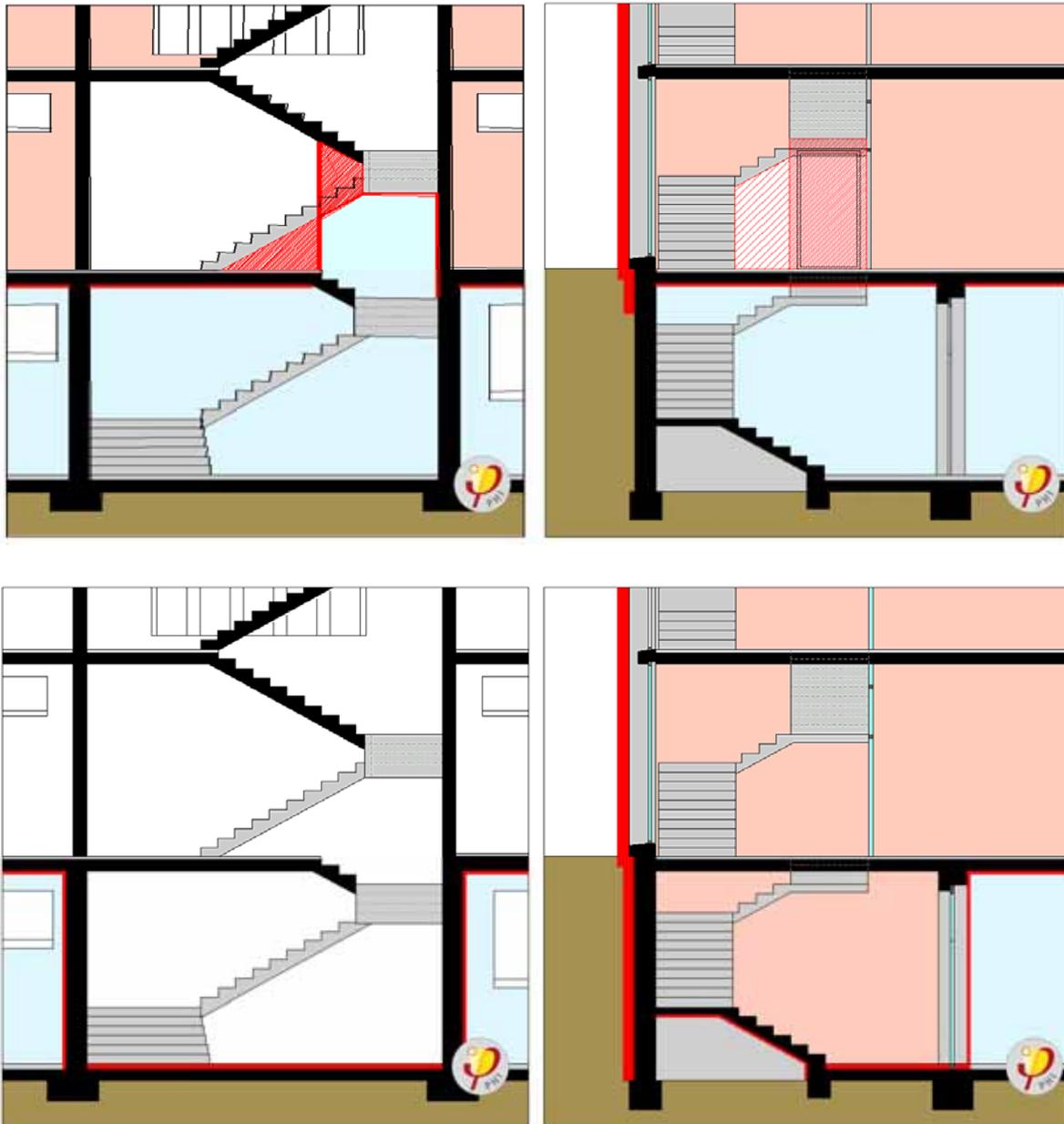


Abbildung 45: Kellerabgang außerhalb (oben) oder innerhalb (unten) des beheizten Gebäudevolumens. (Quelle: PHI)

5.4.5 Besonderheiten bei der Modernisierung

Die Möglichkeiten, den Keller mit in die beheizte Hülle zu integrieren, sind bei Modernisierungsmaßnahmen beschränkter. Eine Umdämmung der Fundamente ist nachträglich nicht mehr möglich und das Abgraben der Kelleraußenwände ist mit erheblichen Kosten verbunden. Dies lohnt sich häufig nur dann, wenn die Kellerwände z.B. aus Feuchteschutzgründen ohnehin von außen saniert werden müssen. Die Anordnung einer Innendämmung im Kellerbereich muss sorgfältig überlegt werden, da der Versprung von außen- zur Innendämmung mit erheblichen Wärmebrücken verbunden ist. Diese können und müssen zwar so entschärft werden, dass keine bauphysikalischen Probleme entstehen (Unterschreitung des Taupunktes) dennoch limitieren sie die zu erreichende Energieeinsparung der Modernisierungsmaßnahme.

5.4.5.1 Dämmung auf der Kellerdecke

Daher wird die Wärmedämmung bei der Sanierung in der Regel im Bereich der Kellerdecke angebracht werden, d.h. der Keller bleibt kalt. Beim Aufbringen größerer Dämmdicken oberhalb der Kellerdecke ergeben sich allerdings verschiedene Schwierigkeiten durch die dadurch verursachte Anhebung des Fertigfußboden-Niveaus. So verringert sich neben der Deckenhöhe auch die Durchgangshöhe bestehender Türen. Außerdem entsteht evtl. eine Stufe beim Übergang zum Treppenhaus. Für die ausschließliche Dämmung auf der Kellerdecke kommen daher in der Regel nur Hochleistungsdämmstoffe, wie zum Beispiel Vakuumdämmung, in Frage, die eine gute Dämmwirkung bei sehr geringen Dicken erzielen. Ist die Dämmstärke unterhalb der Kellerdecke aufgrund einer geringen Raumhöhe begrenzt, kann es sinnvoll sein, sie durch einige Zentimeter Dämmung oberhalb der Kellerdecke zu ergänzen.

5.4.5.2 Dämmung unter der Kellerdecke

Eine besonders kostengünstige Form der nachträglichen Gebäudedämmung ist die Dämmung unterhalb der Kellerdecke. Einschränkungen gibt es hier oft durch sowieso schon recht geringe Deckenhöhen im Keller, die keine großen Dämmdicken zulassen. Außerdem muss bei der Ausführung der Kellerdeckendämmung darauf geachtet werden, dass Türen oder Fenster, deren Oberkante nur einen geringen Abstand zur Decke hat, auch nach Ausführung der Dämmmaßnahme noch aufschwingen können. An der Kellerdecke befinden sich oft Wasser- und Heizungsrohre, die eine einfache Montage von Dämmplatten erschweren. Absperrventile usw. müssen weiterhin frei zugänglich bleiben und dürfen nicht durch Dämmstoff verdeckt werden. Ist die Kellerdecke feucht, so muss zuerst die Ursache der Durchfeuchtung gesucht und behoben werden, bevor die Wärmedämmung montiert werden kann.

5.4.5.3 Begleitdämmung der Wände und Stützen

Wände und Stützen, die die Dämmebene durchdringen, verbleiben als Wärmebrücken. Da die in Abschnitt 5.4.2.1 beschriebene Lösung mit Kimmsteinen im Altbau in der Regel ausscheidet, weil der Aufwand die Wände aufzuschneiden und eine komplette Steinlage auszutauschen zu hoch ist, bleibt nur die Verminderung der Wärmeverluste durch eine Begleitdämmung, analog Abschnitt 5.4.2.2. Als Daumenregel reicht bei Mauerwerkswänden eine Länge der Begleitdämmung von 50 cm aus, während bei Stahlbetonwänden und -stützen aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit etwa 1 m empfehlenswert ist. Die Begleitdämmung sollte sowohl an den Innen- als auch an den Außenwänden ausgeführt werden. Die Außenwanddämmung sollte nach unten über die Kellerdecke hinaus bis mindestens Oberkante Erdreich verlängert werden. Dies verhindert außerdem die Bildung von Tauwasser durch die Anhebung der Innenoberflächentemperatur am Rand der Kellerdecke.

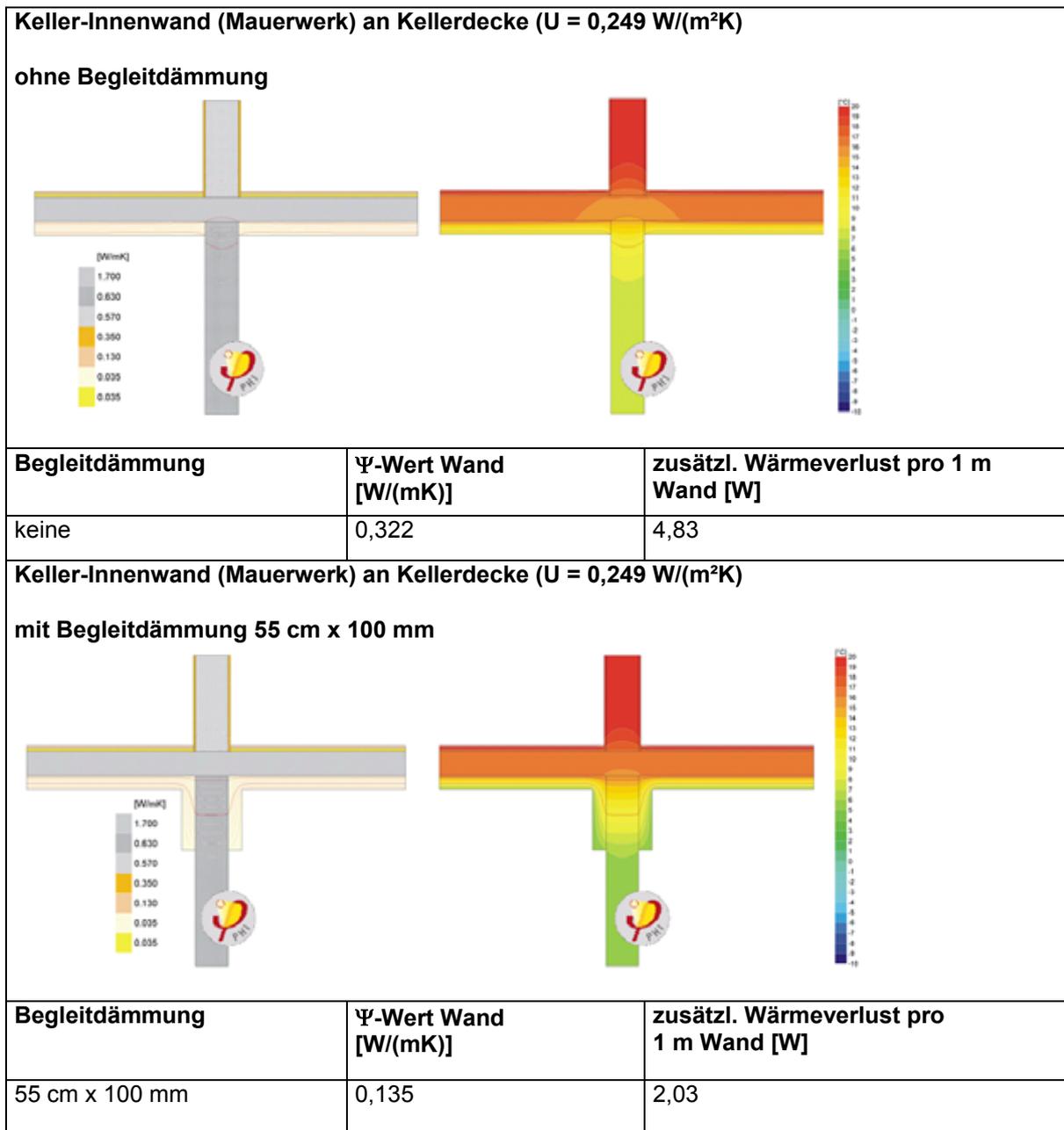


Abbildung 46: Keller-Innenwand, ohne (oben) und mit Begleitdämmung (unten)
(Quelle: [Kaufmann 2009])

5.4.5.4 Luftdichtheit

Vorhandene Stahlbetondecken können als luftdichte Ebene verwendet werden. Der größere Anteil der Dämmdicke sollte dann aber unterhalb der Kellerdecke liegen, um eine Unterschreitung des Taupunkts an der Kellerdecke zu vermeiden. Bei anderen Deckenkonstruktionen, wie zum Beispiel Stahlsteindecken, muss geprüft werden, ob zusätzliche Maßnahmen zur Herstellung der Luftdichtheit erforderlich sind. Dies kann zum Beispiel das Aufbringen eines Anhydritestrichs direkt auf die Rohdecke oder eine zusätzliche Luftdichtheitsfolie bedeuten.

5.4.5.5 Kellertreppe

Hat das Gebäude eine offene Treppe in den unbeheizten Keller, so empfiehlt es sich, zur Vermeidung übermäßiger Wärmeverluste einen definierten Abschluss mit einer luftdichten und wärmegeprägten Kellertür herzustellen. In der Regel wird es etwas einfacher sein, diesen Abschluss am oberen Ende der Treppe zu realisieren. Sollen die Treppenstufen oberseitig wärmegeprägten werden, so muss sich die Dämmdicke an der Stufenhöhe orientieren, um abweichende Steigungsmaße an der ersten oder letzten Stufe zu vermeiden. Die Geometrie der luftdichten und wärmegeprägten Gebäudehülle kann im Bereich des Kellerabgangs relativ komplex sein. Zum Erreichen einer optimalen Lösung ist hier in der Planung eine sorgfältige Betrachtung mit Hilfe mehrerer Schnittzeichnungen oder einem 3-dimensionalen Modell erforderlich.

5.4.5.6 Kellerfeuchte

Durch die nachträgliche Wärmedämmung der Kellerdecke wird das erwünschte Ziel erreicht, den Wärmestrom aus dem beheizten Gebäudevolumen in den unbeheizten Keller deutlich zu reduzieren. Dies hat aber auch zur Folge, dass die mittlere Kellertemperatur absinkt. Bei gleicher absoluter Feuchte steigt dann die relative Luftfeuchte im Keller, was im schlimmsten Fall zu Feuchte- und Schimmelschäden führen kann. Eine wirksame Gegenmaßnahme ist die Anhebung der Temperatur der Innenoberfläche der Kelleraußenwände durch eine Verlängerung der Außenwanddämmung bis mindestens OK-Erdreich. Eine Belüftung des Kellers hat nur einen positiven Einfluss, wenn sie feuchteabhängig erfolgt, d.h. gelüftet wird nur, wenn die Kellerluft einen höheren absoluten Feuchtegehalt hat, als die Außenluft. Dies kann mit einer Abluftanlage mit Feuchtesensor realisiert werden. Die Studie "Einfluss von Kellerdeckendämmung auf die Feuchtebelastung von Kellerräumen" (vgl. [Schnieders 2009]) stellt die Zusammenhänge umfassend dar. Sie kann unter www.passiv.de kostenlos heruntergeladen werden.

5.5 Bodenplattendämmung

Bildungsgebäude haben häufig keinen unbeheizten Keller oder sind nur teilunterkellert. Dann grenzt der beheizte Bereich über die Bodenplatte direkt an das Erdreich an. Die erforderliche Wärmedämmung kann entweder oberhalb oder unterhalb der Bodenplatte bzw. in Kombination angeordnet werden. Insbesondere bei Gebäuden mit großer Grundfläche können die Wärmeverluste durch die zusätzliche Anbringung einer Dämmschürze im Perimeterbereich noch weiter verringert werden.

Der Abminderungsfaktor für die Wärmeverluste zum Erdreich kann im [PHPP] im Blatt "Erdreich" ermittelt werden (siehe Abschnitt 5.4.1).

5.5.1 Dämmung auf der Bodenplatte

Die Dämmung auf der Bodenplatte lässt sich kostengünstig ausführen, da keine hohen Anforderungen hinsichtlich Druckfestigkeit und Feuchtebeständigkeit an den Dämmstoff gestellt werden. Es können daher preiswerte Standard-Dämmstoffe wie z.B. EPS verwendet werden.

Nachteilig ist, dass Innen- und Außenwände die Dämmebene durchdringen und daher Wärmebrücken bilden. Bei Mauerwerkswänden können diese Wärmeverluste ähnlich wie bei der Kellerdeckendämmung (vgl. Abschnitt 5.4.2.1) durch Kimmsteine mit geringer Wärmeleitfähigkeit reduziert werden. Da dies bei Stahlbetonwänden und -stützen nicht möglich ist, empfiehlt sich hier zumindest die Kombination mit einer einlagigen Wärmedämmung unter der Bodenplatte.

Eine Wärmedämmung nur oberhalb der Bodenplatte stellt prinzipiell eine Innendämmung dar. Es ist daher zu prüfen, ob die Temperaturen auf der Oberseite der Bodenplatte soweit absinken können, dass eine unzulässige Auffeuchtung nicht ausgeschlossen werden kann. Eine Erhöhung der Oberflächentemperatur im am meisten gefährdeten Randbereich kann durch die Anbringung einer kurzen Dämmschürze (ca. 50 cm) im Perimeterbereich erreicht werden. Außerdem sollte die Dämmstärke auf der Bodenplatte auf maximal 250 mm begrenzt werden. Abweichend von den Empfehlungen bei der Innendämmung von Außenwänden darf oberhalb der Wärmedämmung keine Dampfbremse angeordnet werden, da sich sonst Feuchtigkeit, die aus dem Erdreich durch die Horizontalsperre auf der Bodenplatte diffundiert, in der Wärmedämmung anreichern kann. Das Thema wird ausführlich in [AkkP27] behandelt.

5.5.2 Dämmung unter der Bodenplatte

Die Anordnung der Wärmedämmung unter der Bodenplatte hat Vorteile hinsichtlich der Vermeidung von Wärmebrücken. Die Dämmebene wird nicht von Wänden unterbrochen und kann nahtlos an die thermische Hülle im Außenwandbereich anschließen. Besonderes Augenmerk muss aber auf eine durchgehende Dämmebene im Fundamentbereich gelegt werden.

5.5.2.1 Flächengründung

Lastabtragende Bodenplatten ohne weitere Fundamente (Gründungsplatte) stellen bauphysikalisch die beste Lösung dar, da sie vollständig wärmebrückenfrei ausgeführt werden können. Die Lasten werden über den Dämmstoff unter der Bodenplatte auf das Erdreich übertragen. Dieser sollte für diese Anwendung über eine bauaufsichtliche Zulassung verfügen. Inzwischen liegen solche Zulassungen auch für passivhausgeeignete Dämmstärken vor (bis 30 cm).

5.5.2.2 Streifenfundamente

Bei gutem Baugrund sind Einzel- und Streifenfundamente eine kostengünstige Alternative zu Gründungsplatten. Wichtig ist, dass die Dämmebene auch unterhalb der Fundamente nicht unterbrochen wird, da sonst die Wärmeverluste sehr stark ansteigen. Sehr hohe Dauerdruckbelastungen bis 1 MN/m^2 kann Porenleichtmörtel aufnehmen ($\lambda = 0,11 \text{ W/(mK)}$). Bei etwas geringeren Belastungen können Schaumglasplatten ($0,38 \text{ MN/m}^2$; $\lambda = 0,055 \text{ W/(mK)}$) oder XPS ($0,25 \text{ MN/m}^2$; $\lambda = 0,040 \text{ W/(mK)}$) zum Einsatz kommen [AkkP35]. Unter der Bodenplatte kann ggf. kostengünstigere für die Anwendung im Erdreich geeignete Wärmedämmung verwendet werden.

Fundamente müssen aus Gründen der Lastabtragung oftmals verbreitert werden, wenn sie unterseitig gedämmt werden. Ab einer bestimmten Tiefe des Fundamentes im Erdreich muss abgewogen werden, ob eine unterseitige Dämmung sinnvoll ist. Bei flankierender Dämmung von Differenzwänden kann je nach Tiefe eine Dämmung um und unter den eigentlichen Fundamenten vernachlässigt werden.

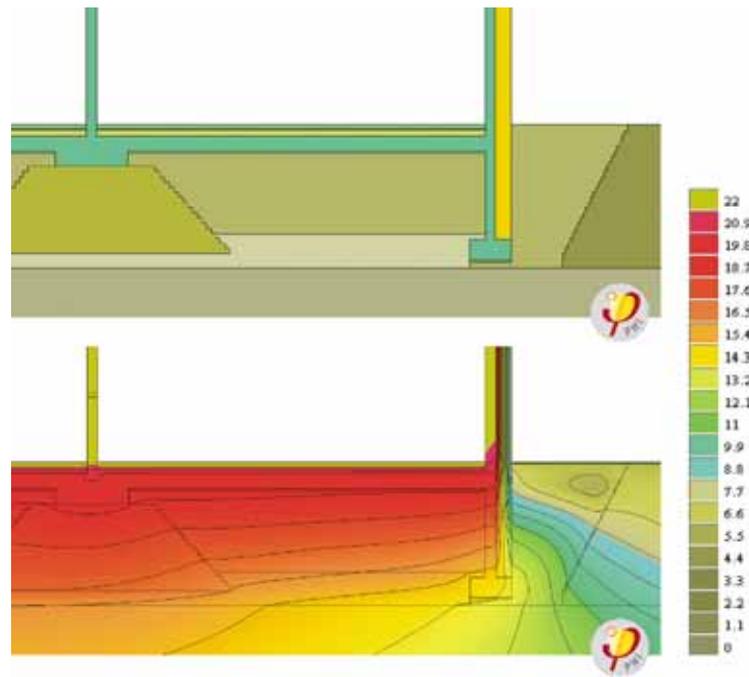


Abbildung 48: Dämmschürze als Verlängerung der Außenwanddämmung ins Erdreich bis zu den Fundamenten (hier in Kombination mit 12 cm Dämmung auf der Bodenplatte). Das Ergebnis der dynamischen Simulation (Bild unten) zeigt den Zustand am 1. Januar des 6. Jahres (eingeschwungener Zustand). Gut erkennbar ist, dass sich das Erdreich unter der Bodenplatte deutlich erwärmt hat, so dass sich die Wärmeverluste über die Bodenplatte stark verringern.
(Quelle: PHI)

5.5.3 Besonderheiten bei der Modernisierung

Bei der Altbaumodernisierung ist eine Wärmedämmung unterhalb der Bodenplatte naturgemäß nicht möglich. Aber auch auf der Bodenplatte sind die nachträglich aufbringbaren Dämmdicken ähnlich wie bei der Dämmung auf der Kellerdecke (vgl. Abschnitt 5.4.5.1) häufig begrenzt.

Als Lösung bleibt dann die zusätzliche Anbringung einer Dämmschürze am Perimeter des Gebäudes. Die Maßnahme bietet sich insbesondere dann an, wenn der Sockelbereich auf Grund von Abdichtungs- oder Drainagemaßnahmen ohnehin aufgedrungen werden muss. Vertikale Dämmschürzen sind grundsätzlich wirksamer als horizontale Dämmschürzen. Insbesondere bei Gebäuden mit einer großen Grundfläche und einfachem Umriss können damit nach einer gewissen Einschwingzeit recht hohe Temperaturen im Erdreich unter der Bodenplatte erzielt werden, so dass die Wärmeverluste deutlich reduziert werden. Trotzdem sollte, wenn immer möglich, auch eine Wärmedämmung in der Fläche der Bodenplatte aufgebracht werden, auch wenn diese nur evtl. nur wenige Zentimeter dick sein kann.

Der Effekt der Dämmschürze kann mit dem PHPP-Blatt „Erdreich“ abgeschätzt werden. Noch genauere Ergebnisse liefert eine, allerdings deutliche aufwändigere, dynamische Simulation. Leider liegt bei Altbauten häufig kein Bodengutachten vor,

so dass wichtige Eingabewerte für die Simulation nur nährungsweise angenommen werden können.

5.6 Hocheffiziente Gebäudehülle in Kürze

Eine luftdichte und hochwärmegedämmte Gebäudehülle ist wesentlich für energieeffiziente Gebäude. Investitionen in einen verbesserten Wärmeschutz sind zudem besonders rentabel und stellen bauschadensfreie Konstruktionen sicher. Im Folgenden werden die zentralen Aspekte der hocheffizienten Gebäudehülle zusammengefasst.

- Die Gebäudehülle muss rundum sehr gut gedämmt sein. Anschlüsse zwischen den Bauteilen müssen hinsichtlich Wärmebrücken und Luftdichtheit sorgfältig geplant werden
- Es werden Fassaden U-Werte zwischen 0,10 bis 0,15 W/(m²K) empfohlen (20 bis 30 cm Wärmedämmung; WLZ 035).
- Hochwärmegedämmte Außenwände können in allen gebräuchlichen Bauweisen hergestellt werden (WDVS, Vorhangfassade, zweischaliges Mauerwerk, monolithische Bauweise). Bei Vorhangfassaden und Fassaden mit zweischaligem Mauerwerk müssen wärmebrückenarme Unterkonstruktionen bzw. Anker verwendet werden.
- Im Prinzip sind alle Dämmstoffe möglich. Die Entscheidung welches Dämmmaterial zum Einsatz kommt wird u.a. durch Kosten oder Brandschutzfragen bestimmt.
- Im stoßgefährdeten Bereich sollte die Fassadendämmung vor Vandalismus geschützt werden (speziell ertüchtigtes WDVS, harte Fassaden).
- Aufgrund von nutzungsbedingt zeitweise hohen inneren Lasten ist ausreichend thermische Speichermasse der Gebäudekonstruktion empfehlenswert. Mischbauten mit massiven Innenbauteilen sind in der Regel unproblematisch.
- Die Gebäudehülle muss luftdicht sein. Bei massiver Bauweise muss der Innenputz durchgängig hergestellt werden (auch hinter Vorwandinstallationen). Stöße und Anschlüsse müssen bei Holzleichtbauweisen sorgfältig abgeklebt werden.
- Hochwärmegedämmte Dachkonstruktionen können in allen gebräuchlichen Bauweisen hergestellt werden (Stahlbeton-, Holz- oder Metalltragwerke). Die Bauteil-U-Werte sollten ebenfalls im Bereich von 0,10 bis 0,15 W/(m²K) liegen.
- Konstruktionsbedingt ist bei Warmdächern besondere Sorgfalt bei der Planung und Ausführung der Luftdichtheit geboten. Die hohen Anforderungen an die Luftdichtheit im Passivhausstandard erhöhen die Sicherheit gegenüber Bauschäden.

- Die Ausdämmung hoher Holztragelemente von weit gespannten Dächern hat sich als kostengünstige Variante erwiesen.
- Im Rahmen einer Sanierung müssen bei den Überlegungen zur Lage der Dämmung im Dachbereich alle Anschlüsse betrachtet werden um unakzeptable Wärmebrücken zu vermeiden. Vorhandene Auskragungen und Gesimse müssen auf jeden Fall umdämmt werden.
- Bei nicht genutzten Dachräumen kann die Dämmebene auf der obersten Geschossdecke verlaufen. Dies ist eine sehr wirtschaftliche Variante. Zur Vermeidung inakzeptabler Wärmebrücken müssen alle aufgehenden Bauteile mit einer Begleitdämmung versehen werden
- Die Wärmedämmung muss auch im Bereich der Gründung lückenlos durchgeführt werden. Die Dämmung kann auf oder unter der Bodenplatte liegen, bei Dämmung auf der Bodenplatte sind besondere Regeln zu beachten (vgl. Abschnitt 5.5.1)
- Bei außenliegender Dämmung sind Streifenfundamente auf jeden Fall zu umdämmen.
- Liegt die Dämmung auf der Bodenplatte oder im Bereich der Kellerdecke sind tragende oder aussteifende Bauteile (Stützen oder Stahlbetonwände), die die Wärmedämmung durchdringen auf das Nötigste zu begrenzen und mit einer Begleitdämmung zu versehen. Es gilt Stützen sind Wänden vorzuziehen.
- Nichttragende Wände sind thermisch zu trennen. Hierfür sind eine Reihe von wärmedämmenden aber druckfesten Mauersteinen oder Dämmstoffen verfügbar
- Bei Gebäuden mit kalten Kellern ist der im Gebäude liegende Abgang kritisch. Es ist zu entscheiden ob er innerhalb oder außerhalb der thermischen Hülle liegen soll. Entsprechend ist die Lage der Wärmedämmung und der luftdichten Ebene zu planen. Bei Bestandsgebäuden entstehen bei beiden Varianten Wärmebrücken, die sorgfältig zu entschärfen sind.
- Bei Altbausanierungen sind Wärmebrücken im Bereich des Kellers bzw. unteren Gebäudeabschlusses unvermeidbar. Häufig können Dämmschürzen die Verhältnisse verbessern. Wärmebrücken müssen zumindest soweit entschärft werden, dass keine bauphysikalischen Schäden zu erwarten sind.
- Passivhaus geeignete Fenster bestehen aus einer Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und wärmegeprägten Rahmen. Der U-Wert des gesamten Fensters U_w bei Standardabmessungen sollte $0,80 \text{ W}/(\text{m}^2\text{k})$ nicht überschreiten (thermisch getrennter Randverbund). Der Energiedurchlassgrad der Verglasung sollte bei mindestens 50% liegen.
- Die Fenster sind zur Reduzierung der Wärmebrücken in der Dämmebene zu montieren.

-
- Bei thermisch hochwertigen (passivhausgeeigneten) Fenstern sind keine Heizflächen vor oder unter dem Fenster erforderlich (vgl. Abschnitt 7.1)
 - Zur Sommerlüftung am Tag sind ausreichend öffnbare Fenster vorzusehen. Aufdrehbare Fenster sind wirksamer als Kippflügel und durchaus mit den Unfallverhütungsvorschriften vereinbar!
 - Sonderverglasungen sollten auch aus Kostengründen z.B. durch Fensterbrüstungen soweit als möglich vermieden werden. Bei Anforderungen an die Bruchsicherheit der Verglasungen ist ESG zu bevorzugen. Die VSG-Scheibe sollte bevorzugt innen liegen.
 - Die Luftdichtheit der Gebäudehülle sollte immer durch einen Drucktest inkl. Leckagesuche überprüft werden. Großvolumige Gebäude erreichen regelmäßig n_{50} Werte deutlich unter dem Passivhaus-Anforderungswert von $0,6 \text{ h}^{-1}$.
 - Die Sanierung von Bildungsgebäuden kann auch schrittweise erfolgen. Voraussetzung ist hier bei jedem Schritt die zukünftigen Maßnahmen zu berücksichtigen.

6 Lüftung

Zahlreiche Untersuchungen belegen mangelnde Luftqualität in Schulen (vgl. [ILAT 2002], [Grams et al. 2002], [Bischof 2005], [Fromme et al. 2006], [Heudorf 2006]). Aufgrund der hohen Belegungsdichten ist häufig ein ausreichendes Lüften über Fenster kaum zu realisieren. Hinzu kommt, dass es bei den erforderlichen hohen Luftmengen schnell zu Zugerscheinungen kommt. Entsprechend weist die Literatur vor allem auf mangelndes Lüften im Winter hin (vgl. [Fromme et al. 2006]). Dabei sollte uns die Luftqualität in Schulen besonders wichtig sein. Kinder sind nachweislich empfindlicher gegenüber Innenraumluftbelastungen, da sie im Verhältnis zu ihrem Gewicht höhere Luftmengen einatmen und ihre Organe sich noch im Wachstum befinden (vgl. [Faustman et al. 2000], [Landrigan 1998]). Weiterhin verbringen Schulkinder, abgesehen von ihrem Zuhause, die meiste Zeit in Schulen. Aus diesen Erfahrungen wurde die Erkenntnis gewonnen, dass eine gute Luftqualität in Schulen und Kindertagesstätten praktikabel nur über eine kontrollierte Lüftung gesichert werden kann (vgl. [Pfluger 2006], [Kah 2006], [Kah 2006a]).

Ein Grund für das mangelnde Fensterlüftungsverhalten sind die damit verbundenen Zugerscheinungen im Winter. Unterschiedliche Konzepte versuchen dem entgegenzuwirken. [Zeiler et al. 2009] untersucht z.B. das möglichst großflächige Einbringen der Außenluft. Weitere Untersuchungen befassen sich mit einer ausreichenden Vorerwärmung der Außenluft über Heizflächen und mit einer luftqualitätsgeführten Regelung von Öffnungsklappen zur natürlichen Lüftung und ggf. zusätzlicher Zwangslüftung.

Dabei scheint eine kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung die ideale Lösung zu sein. Belastete Luft wird in ausreichendem Maße kontinuierlich erneuert. Im Winter wird die Außenluft mittels der Wärmerückgewinnung vorkonditioniert in Klassen und Gruppenräume eingebracht und nebenbei wird auch noch Energie gespart.

Wie hoch sind nun die Antriebsenergien? Entscheidend ist hier die Qualität der Systeme. Feldmessungen belegen, dass eine kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung im Vergleich zur Antriebsenergie ein Vielfaches an Wärme aus der Abluft zurückgewinnt. Messungen belegen Leistungszahlen (Verhältnis von zurückgewonnener Wärme zu Antriebsenergie) von 10 und mehr (vgl. [Peper et al. 2007]). Natürlich erfordert eine kontrollierte Lüftungsanlage zusätzliche Investitionsmittel. Die Mehrinvestitionen bleiben aber bei zweckmäßiger Planung im Rahmen und sind, verbunden mit der Energieeinsparung, im Gesamtkonzept wirtschaftlich darstellbar (vgl. [Bretzke 2009], [Baumgärtner 2009]).

Der folgende Abschnitt befasst sich mit der Frage der Luftqualität in Bildungsgebäuden und anschließend mit konkreten Planungsempfehlungen zur Auslegung und Integration von Lüftungsanlagen.

6.1 Luftqualität

Eine bewährte Leitgröße zur Beurteilung der Luftqualität in Innenräumen ist die Kohlendioxid-(CO₂-)Konzentration, denn sie ist ein guter Indikator für die Emission organischer Ausdünstungen durch Menschen und stellt unmittelbar einen Bezug zur Nutzungsintensität des Raumes her. Zudem korreliert die vom Menschen abgegebene CO₂-Menge gut mit der Menge an flüchtigen organischen Verbindungen (VOC), die für die Geruchsbelastung der Raumluft verantwortlich gemacht werden (vgl. [Kundi 2006]). Es gilt als gesichert, dass gut gelüftete Räume Beschwerden über Befindlichkeitsstörungen, wie z.B. Müdigkeit, Konzentrationsschwäche etc. verringern (vgl. [ECA 1992], [Myhrvold et al. 1996], [Wargocki 2000]).

In der folgenden Untersuchung wird die Raumluftqualität gemäß [EN 13779] anhand der gemessenen CO₂-Konzentrationen bewertet. Eine niedrige Raumluftqualität besteht hier ab 1400 ppm. Die heute bereits ersetzte [DIN 1946-2] forderte einen Richtwert von 1000 ppm und einen Grenzwert von 1500 ppm.

Tabelle 2: Klassierung der Raumluftqualität gemäß [EN 13779] (Annahme zum CO₂-Gehalt der städtischen Außenluft: 400 ppm)

Typischer CO ₂ -Gehalt [ppm]	≤ 800	800...1000	1000...1400	>1400
Klassierung der Raumluftqualität	Hoch	Mittel	Mäßig	niedrig

Darüber hinaus gibt es eine ganze Reihe weiterer Raumluftbelastungen, z.B. abiotische Schadstoffe aus Baumaterialien und Möbeln (VOC, Formaldehyd, Weichmacher etc.). Mit Hilfe der CO₂-Konzentration in der Raumluft kann auch angenähert hier eine Aussage über die Abfuhr von Innenraumschadstoffen getroffen werden.

Eine weitere Innenraumluftbelastung, welche in jüngerer Zeit vermehrt in der Diskussion steht, ist Feinstaub. Mit der Umsetzung der EU-Richtlinie 96/62/EG wurden Grenzwerte der Feinstaub-Massenkonzentration in der Außenluft erlassen, wodurch auch die Innenraumluftbelastung verstärkt in das öffentliche Interesse geriet.

Für Innenräume gibt es bisher lediglich Empfehlungen zu maximalen Partikelkonzentrationen, aber keine Grenzwerte. Bei der Bewertung muss insbesondere auch die Zusammensetzung berücksichtigt werden, so dass eine einfache Übertragung des Gefährdungspotentials von Staubmassen-Konzentrationen

in der Außenluft auf die Innenraumluft nicht zulässig erscheint. Das tatsächliche Gefährdungspotential von Partikeln in der Raumluft ist noch in der Diskussion (vgl. [Gabrio/Volland]). Die Innenraumlufthygiene-Kommission stellt jedoch fest, „dass erhöhte Feinstaubkonzentrationen in Innenräumen hygienisch unerwünscht sind (...).“ Unabhängig von der tatsächlichen Gefährdung durch verschiedenartige Stäube gilt, dass grundsätzlich geringe Partikel-Konzentrationen anzustreben sind.

Zur Reduzierung der Feinstaubbelastung in Klassenräumen wurde z.B. in Frankfurter Schulen die feuchte Reinigung der Klassenräume in den Wintermonaten auf fünfmal wöchentlich erhöht (vgl. www.Frankfurt.de).

Auch hier kann eine Lüftungsanlage, vor allem durch regelmäßiges und ausreichendes Lüften und durch das vorgeschaltete Außenluftfilter, die Innenbelastung signifikant reduzieren (vgl. Abschnitt 6.2.2).

6.2 Messungen zur Raumluftqualität

Im Rahmen dieses Leitfadens wurden Messungen zur Raumluftbelastungen in zwei Klassenräumen einer Grundschule durchgeführt. Mit dem Ziel unterschiedliche Lüftungsstrategien zu untersuchen, wurde jeweils in einem Klassenraum manuell und in dem anderen mittels Lüftungsanlage gelüftet. Hierzu wurde eine Schule gewählt, die über eine kontrollierte Lüftung verfügt und ein Klassenraum wurde durch Abkleben der Lüftungsventile präpariert.

Die Lehrer wurden in diesem Zeitraum von drei Wochen gebeten, konventionell über Fenster zu lüften. Im zweiten Klassenraum blieb die Lüftungsanlage in Betrieb. Lediglich der Außenvolumenstrom wurde gezielt variiert. In beiden Räumen wurden die maßgeblichen Randbedingungen mit erfasst (Öffnungszustand von Türen und Fenstern, Belegung) und der erzielte Außenluftwechsel dokumentiert. Die kontrollierte Lüftung wurde am Tag durchgängig betrieben.

6.2.1 CO₂-Konzentration

Für eine weitere Auswertung wurden die Messdaten nach der Lüftungsart (Fensterlüftung / kontrollierte Lüftung) und der spezifischen Höhe des maschinellen Außenvolumenstroms unterschieden. Hierfür wurde der Außenvolumenstrom auf die durchschnittliche Klassenstärke zzgl. Lehrpersonal bezogen. Anschließend wurde die Häufigkeit für das Auftreten der oben beschriebenen Luftqualitätsklassen während der Unterrichtszeit bestimmt. Als Unterrichtszeit wurde der Zeitraum jeweils von der ersten Schulstunde bis zur letzten Schulstunde ausgewertet. Pausenzeiten und Zeiten in Fachräumen wurden nicht unterschieden.

CO₂-Werte bis 1000 ppm korrespondieren mit einer mittleren und bis 1400 ppm mit einer mäßigen Raumluftqualität. Selbst bei einem geringen Außenvolumenstrom der

mechanischen Lüftung von $13,3 \text{ m}^3/(\text{Person h})$, lag demnach die Luftqualität in den Grundschulklassen während 94 % der Unterrichtszeit bei mittlerer bis mäßiger Luftqualität (vgl. Abbildung 50). Mit zunehmenden personenbezogenen Volumenströmen werden weitere Verbesserungen der Luftqualität erreicht. Bei Fensterlüftung hingegen war in den untersuchten Klassen während rund 30 % der Unterrichtszeit die Raumluftqualität gering (vgl. Abbildung 50). Wobei die in Schulen auftretenden CO_2 -Konzentrationen bei Fensterlüftung in der Regel eher kritischer sind, als die hier beobachteten Werte (vgl. Abbildung 52). Wie die spätere Auswertung zeigte, stellte sich vermutlich durch leichte Leckagen an den abgedichteten Lüftungsventilen und durch den Luftaustausch mit den gut belüfteten Verkehrsbereichen ein gewisser Grundluftwechsel ein. Die Auswertung führte auf einen personenbezogenen Grundluftaustausch um $3 \text{ m}^3/(\text{Schüler h})$.

Zur Übertragung der Ergebnisse auf andere Schulformen wurde eine CO_2 -Bilanz des untersuchten Unterrichtsraums mit den Personen als Quelle und dem Außenluftwechsel als Senke erstellt. Das Modell konnte anschließend anhand des CO_2 -Anstiegs zu Unterrichtsbeginn und der gemessenen Außenvolumenströme validiert werden. Die beste Übereinstimmung (während der ersten 45 min) ergab sich für eine durchschnittliche Quellstärke von $14 \text{ (Liter CO}_2\text{)/(h Schüler)}$; dieser Wert erscheint auch im Vergleich mit Literaturangaben plausibel (vgl. [Bischof 2005], [Hehl/Grams 2003]). Bei älteren Schülern in weiterführenden Schulen nimmt die Quellstärke je Schüler etwa um 30% auf $18 \text{ (Liter CO}_2\text{)/(h Schüler)}$ zu. Die unter der Annahme eines typischen Stundenplans berechneten CO_2 -Konzentrationen sind ebenfalls in Abbildung 50 dargestellt.

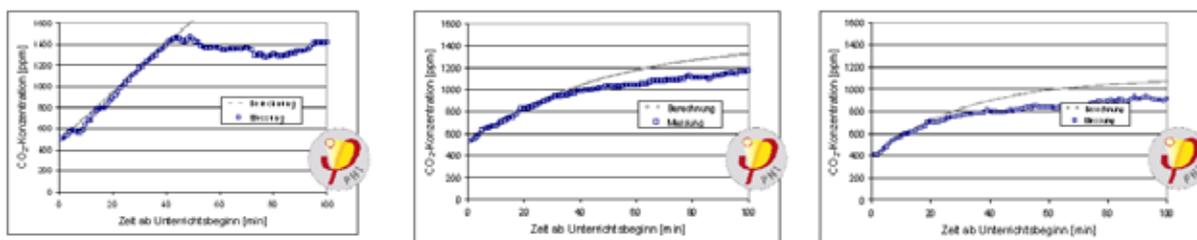


Abbildung 49: Validierung des CO_2 -Modells anhand der Messdaten. Außenvolumenstrom 0, 13,3 und $20,4 \text{ m}^3/(\text{h Schüler})$. (Quelle: PHI)

Die Ergebnisse zeigen, dass sich mit einer ausreichend dimensionierten kontrollierten Lüftung eine gute Luftqualität auch in dicht belegten Klassenräumen erzielen lässt. Die Messungen bestätigen hierbei Auslegungsempfehlungen aus früheren Veröffentlichungen (vgl. [Kah 2006a], [Pfluger 2006]) zum personenbezogenen Luftaustausch bei schultypischen Nutzungen. Luftmengen von $15 \text{ bis } 20 \text{ m}^3/(\text{Schüler h})$ führen auf mäßige bis mittlere Luftqualität während der Unterrichtszeit. Bei weiterführenden Schulen sollten es mindestens $17 \text{ m}^3/\text{h}$ je Schüler sein.

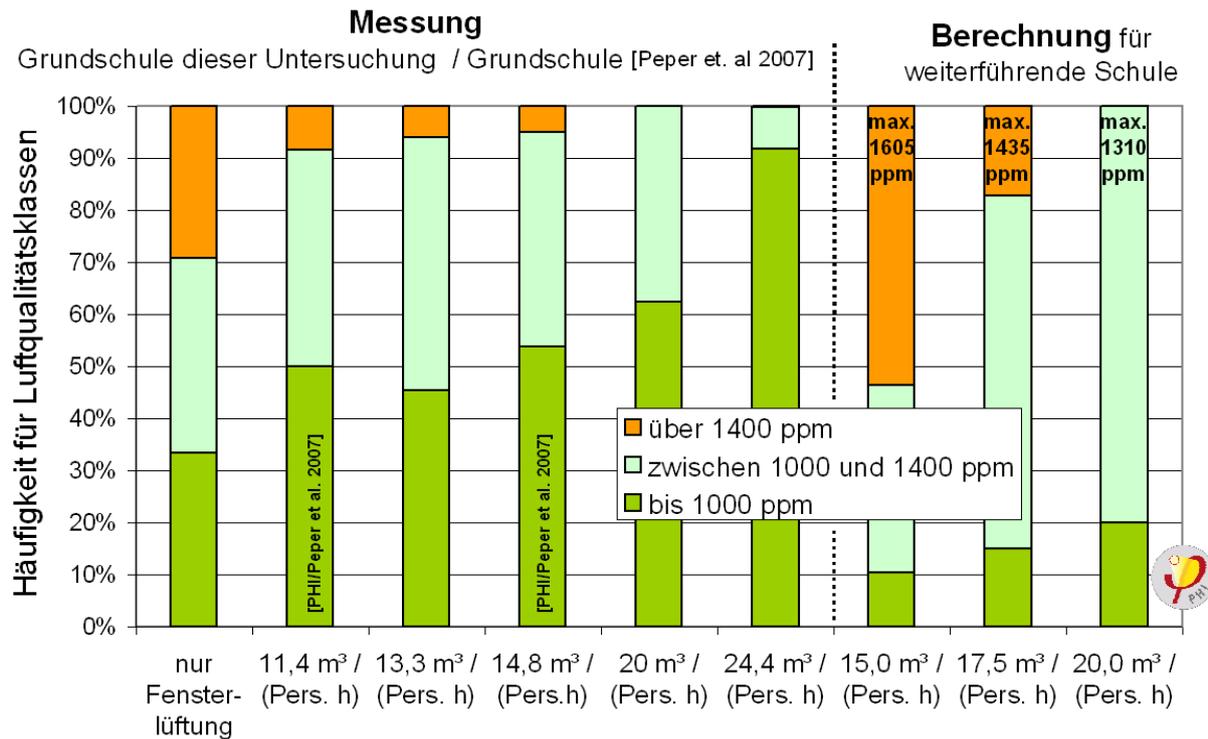
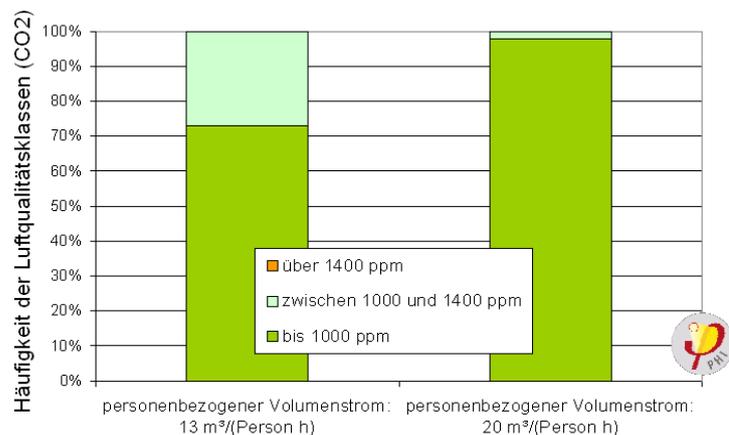


Abbildung 50: Häufigkeit von Luftqualitätsklassen bei kontrollierter Lüftung und Fensterlüftung in Schulklassen im Vergleich. Die Messergebnisse wurden ergänzt um Daten aus [Peper et al 2007]. Selbst mit 13,3 m³/(Person h), lag demnach die Luftqualität in der Grundschulklasse während 94 % der Unterrichtszeit bei mäßiger bis mittlerer Luftqualität. (Quelle: PHI)

Abbildung 51: Feldmessung in zwei Gruppenräumen einer Kindertagesstätte über 14 Tage in der Heizzeit. Häufigkeit von Luftqualitätsklassen bei kontrollierter Lüftung. Ausgewertet wurde die Betreuungszeit von 9:00 bis 16:00 bzw. 16:30 Uhr. (Quelle: PHI)



Mit der kontrollierten Lüftung konnte eine maßgebliche Verbesserung der Luftqualität gegenüber konventioneller Fensterlüftung erzielt werden, wie ein Vergleich mit Literaturangaben zeigt. [Bischof 2005] stellt Messungen vor, wonach im Kernwinter ohne kontrollierte Lüftung bis zu 70 % der Unterrichtszeit geringe Raumluftqualität vorliegt. Die in Schulklassen beobachteten Spitzenwerte erreichten dabei sogar annähernd die MAK-Grenzwerte für Arbeitsstätten (vgl. [Fromme et al. 2006], [ILAG2002]).

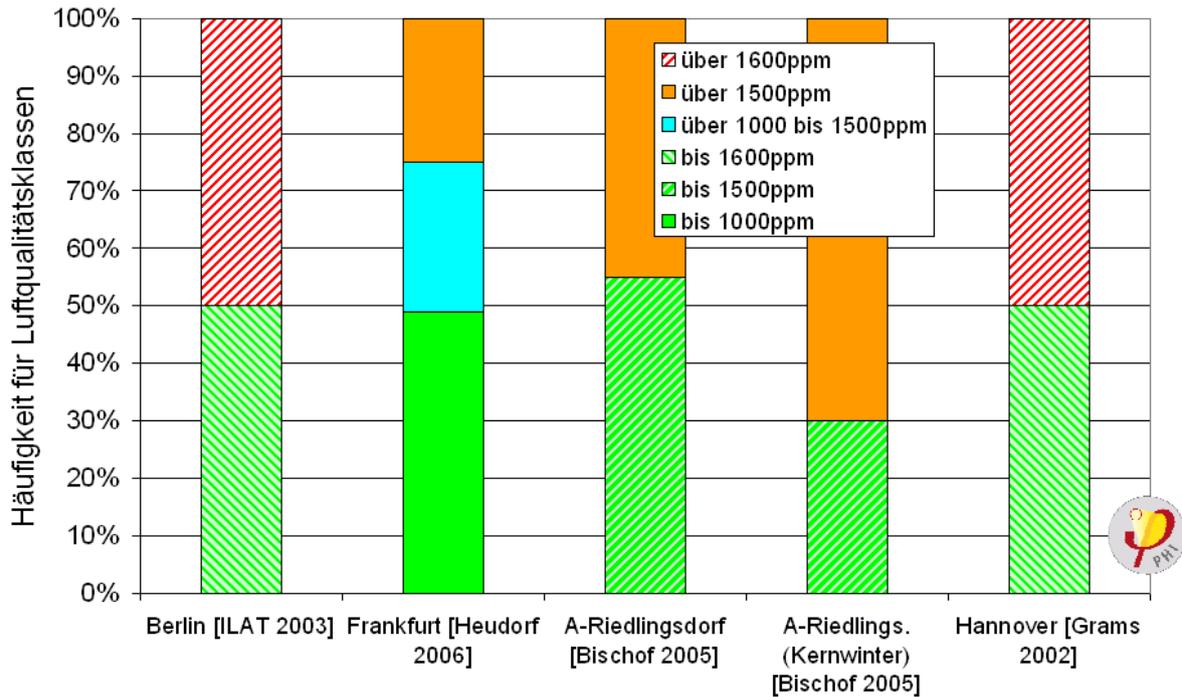


Abbildung 52: Literaturangaben zur Luftqualität in Schulen bei Fensterlüftung. Niedrige Raumlufqualität besteht bei CO₂-Werten oberhalb von 1400 ppm. (Quelle: PHI)

6.2.2 Feinstaub

In den letzten Jahren gelangt die Feinstaubbelastung in Schulen und Kindertagesstätten verstärkt in den Fokus. Zahlreiche Messungen belegten z.T. hohe Feinstaubbelastungen in Schulen (vgl. [Fromme et al. 2006], [ILAG2002], [Heudorf 2006]). Aufgrund von hohen Feinstaubbelastungen in Frankfurter Schulen wurde, wie weiter oben bereits erwähnt, das Reinigungsintervall in den städtischen Schulen erhöht mit spürbaren Auswirkungen für den städtischen Etat.

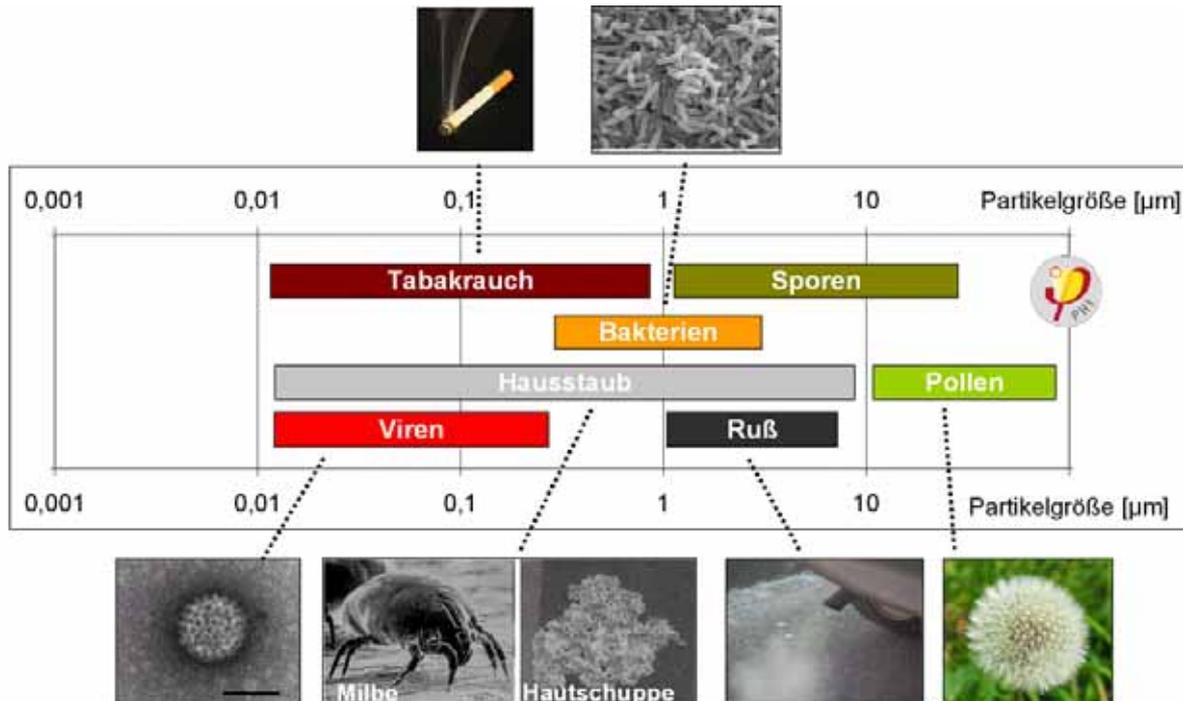


Abbildung 53: Überblick zu Feinstäuben im Innenraum (ohne Anspruch auf Vollständigkeit). (Quelle: PHI / Fotos: Wikipedia)

Feinstaub ist ein Sammelbegriff für luftgetragene Partikel aus unterschiedlichsten Quellen. Das konkrete Gefährdungspotential ergibt sich dabei aus der Beschaffenheit, aber auch aus der Größe der Partikel. Feine Partikel werden von den Schleimhäuten im Nasen/Rachenraum nur bedingt zurückgehalten und gelangen so in die Atemwege, feinste Partikel bis in die Lungenbläschen.

Im Zentrum dieser Feinstaub-Untersuchung stand vor allem der Einfluss der kontrollierten Lüftung auf die resultierenden Partikelkonzentrationen. Untersuchungen in Wohngebäuden deuten darauf hin, dass sich der Einsatz von Lüftungsanlagen positiv auswirkt. Grundsätzlich beeinflussen zwei Mechanismen die Partikelkonzentrationen im Innenraum.

- Einerseits werden in der Außenluft enthaltene Feinstaubpartikel mit der ausgetauschten Luft in den Raum eingetragen. Dies gilt vor allem für feinere Partikelfractionen ($PM_{2,5}$), da deren Quellen überwiegend im Außenbereich liegen. Bei der mechanischen Lüftung verringert das vorgeschaltete Außenluftfilter den Staubeintrag von außen. Dies ist ein klarer Vorteil gegenüber der Fensterlüftung. [Riley et al. 2002] zeigte für Wohnräume, dass lediglich bei Verwendung von Lüftungsanlagen mit einem sehr geringen Anteil an Außenpartikeln an der Innenraumluftbelastung gerechnet werden kann.
- Andererseits kann durch Lüften eine hohe Feinstaub-Innenkonzentration durch Außenluft verdünnt werden, sofern die Außenkonzentrationen geringer sind.

Dies ist bei den eher größeren Partikelfractionen der Fall. [Gabrio/Volland] stellt fest, dass ausreichendes Lüften einen deutlichen Einfluss auf die Feinstaubbelastung in Klassenzimmern hat. Da der Außenluftwechsel bei mechanischer Lüftung in der Praxis immer höher ist als bei Fensterlüftung, war zu erwarten, dass auch hier die Lüftungsanlage vorteilhaft ist.

Die 6 Wochen andauernde Messung wurde in einer Grundschule in Innenstadtlage durchgeführt. Die Feinstaubkonzentration wurde hierfür kontinuierlich in den zwei Klassen und in der Außenluft ermittelt. Die eingesetzten Feinstaubmonitore messen auf Basis eines Streulichtverfahrens (vgl. Abschnitt 11.1.2) die Partikelanzahl. Die Umrechnung auf Massenkonzentration erfolgte nach den Vorgaben des Herstellers der Monitore.

Die Messung zum Einfluss der Lüftungsstrategie ergab die folgenden wesentlichen Ergebnisse. Die Untersuchung ist in ausführlicherer Form im Anhang (vgl. Abschnitt 11.1) dokumentiert.

Massenfraktion PM₁₀:

(vereinfachend: Teilchen, die kleiner als 10 µm im Durchmesser sind)

- Die Messungen deuten darauf hin, dass die Höhe der Feinstaub-Massenfraktion PM₁₀ maßgeblich durch die Aktivität der Schüler bestimmt wird. Hierbei spielt vermutlich das Aufwirbeln sedimentierten Feinstaubes eine untergeordnete Rolle.
- Wie auch bei [Gabrio/Volland] und [Fromme et al. 2006] weisen die Messergebnisse auf einen signifikanten Einfluss der Lüftungsstrategie bzw. der Intensität der Lüftung auf die Massenfraktion PM₁₀ in den Klassen hin. Im Rahmen dieser Studie konnte darüber hinaus der Einfluss unterschiedlicher Lüftungsstrategien untersucht werden. Die mittleren Feinstaubgehalte (PM₁₀-Medianwerte) in den Zeitabschnitten mit kontrollierter Lüftung liegen zwischen 30 und 50 % unter den Werten mit Fensterlüftung (vgl. Abbildung 54, Abbildung 55).

Wie eine Auswertung der Abklingkurven der Massenfraktion PM₁₀ nach Schulschluss zeigt, nimmt die Feinstaub-Konzentration bei Lüftungsanlagenbetrieb deutlich schneller ab. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Lüftung für die Massenfraktion PM₁₀ in den untersuchten Klassen der wesentliche Senkenprozess ist.

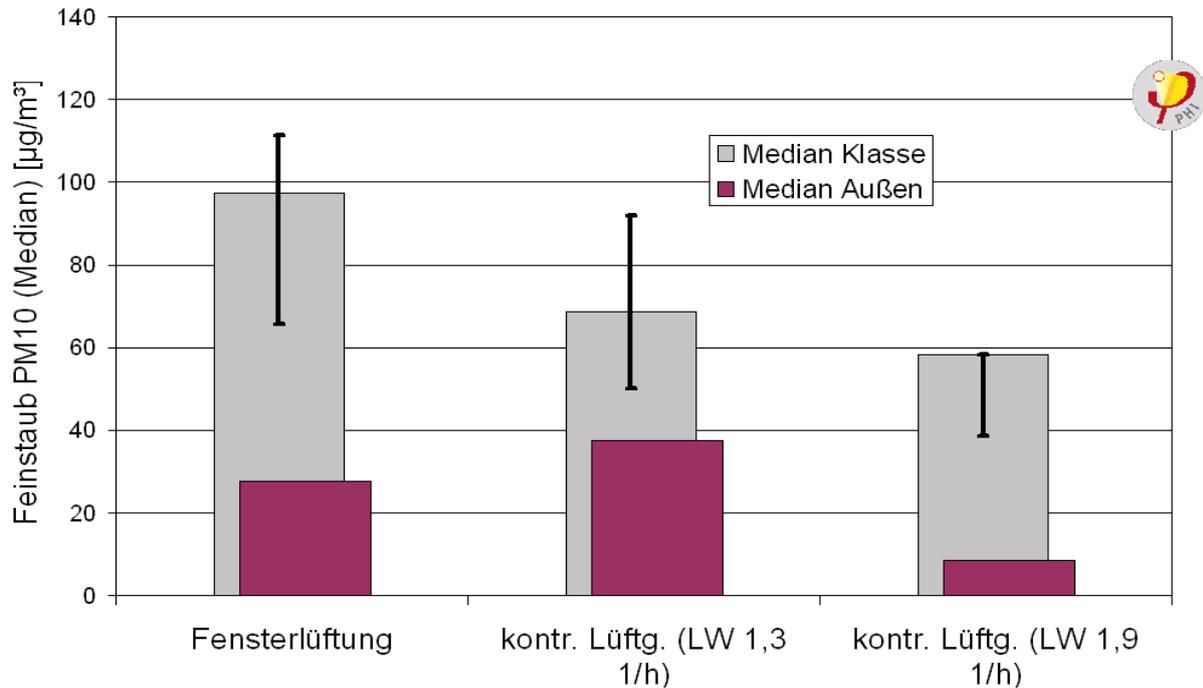


Abbildung 54: Tagesmediane der Feinstaubbelastung deuten auf einen deutlichen Einfluss der Lüftungsstrategie auf die Feinstaubbelastung hin. Die mittleren Tagesmediane in Klasse A liegen bei kontrollierter Lüftung um 30 % (Luftwechsel ca. $1,3 \text{ h}^{-1}$) bzw. 40 % (Luftwechsel ca. $1,9 \text{ h}^{-1}$) unter dem mittleren Tagesmedian bei Fensterlüftung. (Quelle: PHI)

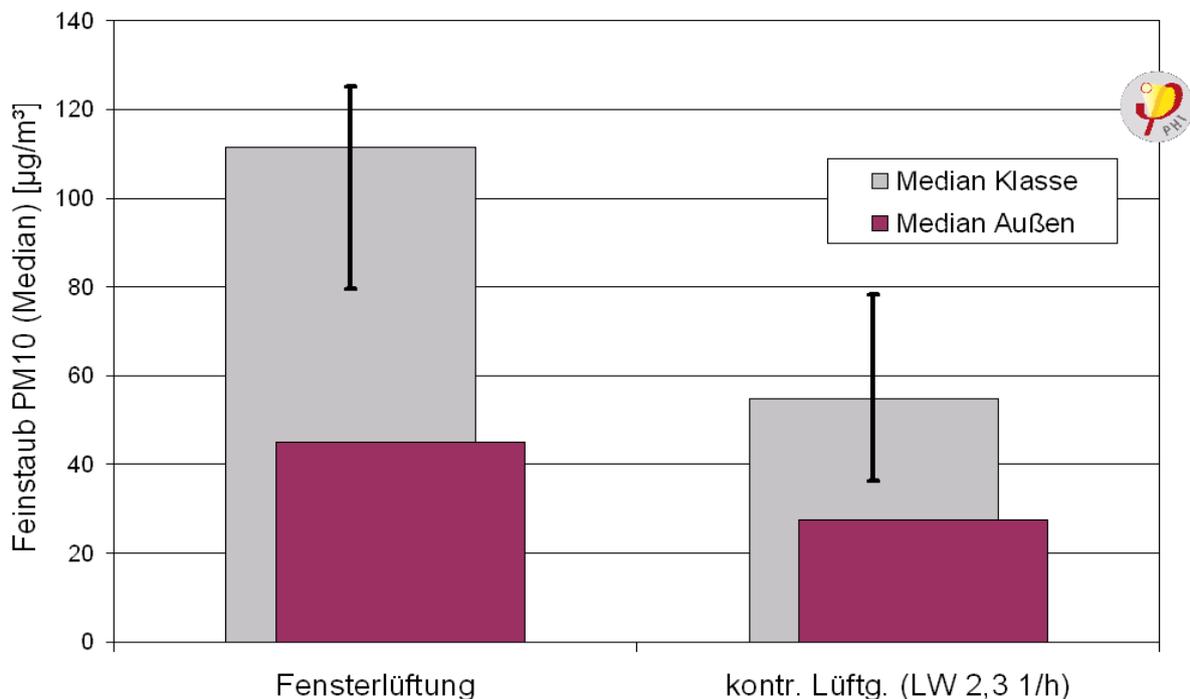


Abbildung 55: Tagesmediane der Feinstaubbelastung. Auch in Klasse B ergeben sich im Mittel signifikant verringerte Feinstaubbelastungen bei kontrollierter Lüftung. Gegenüber dem Zeitraum mit Fensterlüftung sind die mittleren Tagesmediane bei kontrollierter Lüftung (Luftwechsel ca. $2,3 \text{ h}^{-1}$) sogar um 50 % verringert. (Quelle: PHI)

Massenfraktion PM_{2,5}:

(vereinfachend: Teilchen, die kleiner als 2,5 µm im Durchmesser sind)

- Der angenommene Einfluss der kontrollierten im Vergleich zur Fenster-Lüftung auf die Feinstaubgehalte (PM_{2,5}) konnte anhand der gemessenen Innenkonzentrationen nicht eindeutig geklärt werden. In der Lüftungsanlage erfolgt durch das Filtersystem eine Verringerung der feinen Partikel, allerdings wurde in den Zeiten mit Fensterlüftung deutlich weniger Außenluft ausgetauscht. Eine Abschätzung zum Luftaustausch bei Fensterlüftung auf Grundlage der Fensteröffnungsdauern und -konfiguration führt auf Außenluftvolumenströme, welche um über 70 % geringer sind als bei kontrollierter Lüftung.
- Zur Überprüfung der Vermutung, dass der Eintrag von feinen Partikeln durch eine kontrollierte Lüftung verringert wird, wurde während einer Zusatzmessung die Feinstaub-Konzentration direkt in der Zuluft und in der Außenluft gemessen.

Die Messergebnisse stützen die Vermutung, dass das Lüftungssystem auch eine merkliche Filterwirkung hinsichtlich der Außen-Feinstaub-Konzentration aufweist. Bei Partikeln mit Durchmessern kleiner 2 µm wurde bei der untersuchten Anlage eine Verringerung der Partikelkonzentration in der Zuluft gegenüber der Außenluft von rund 50 % beobachtet.

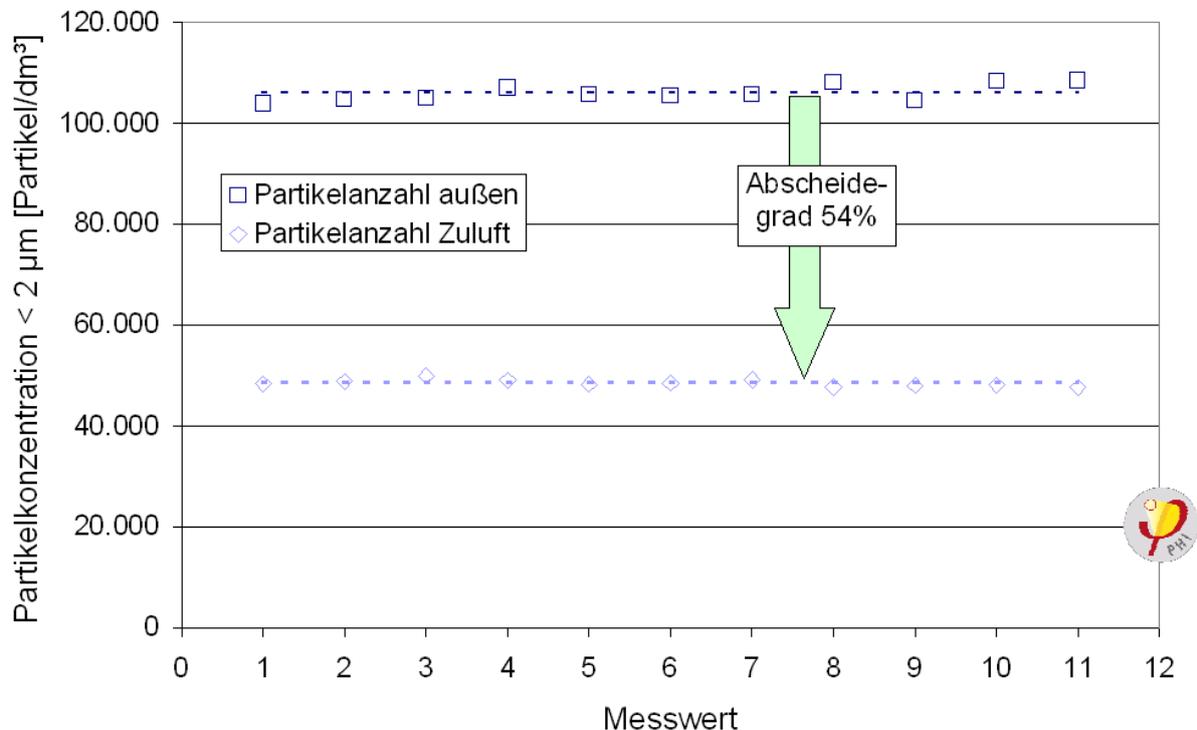


Abbildung 56: Untersuchung der Filterwirkung des Lüftungssystems. Die verringerte Partikelkonzentration in der Zuluft im Vergleich zur Außenluft deutet auf einen Abscheidegrad von rund 50 % hin. (Quelle: PHI)

6.3 Dimensionierung der Lüftung

Für Schulen und Kindergärten wurden im Abschnitt 6.2 Empfehlungen zur Auslegung der Luftmengen aus Messungen abgeleitet. Gute bis mittlere Raumluftqualität konnte demnach mit Auslegungen zwischen 15 bis 20 m³/(Person h) erzielt werden. Diese Auslegungswerte weichen von den empfohlenen Mindestwerten der Normung z.T. deutlich ab. Dabei muss berücksichtigt werden, dass bei den betrachteten Nutzungen die Unterrichträume und Gruppenräume nicht dauerhaft belegt sind. Während Pausenzeiten, Fachstunden in anderen Räumen oder Zeiten in Zusatzräumen (Bewegungsräume, etc.) und auf dem Außengelände, wird die Raumluft durch die Lüftung für die nächste Nutzung erneuert. Die Normung empfiehlt unabhängig von der Nutzungsintensität und dem Alter der Nutzer einheitliche Ansätze für den personenbezogenen Zuluftbedarf. Die abweichenden Empfehlungen erscheinen vor diesem Hintergrund plausibel.

Für eine mäßige bis mittlere Luftqualität werden in der Normung Luftmengen von 28,8 m³/(h Person) bis 45 m³/(h Person) empfohlen, die in der Konsequenz zu sehr geringen Raumluftfeuchten führen, sofern im Winter nicht zusätzlich eine Befeuchtung vorgesehen wird – diese würde aber den apparativen Aufwand erhöhen und regelmäßige Inspektionen bzgl. der Hygiene erforderlich machen.

Tabelle 3: Empfohlene personenbezogene Luftmengen und Literaturangaben im Vergleich.

	Luftmenge [m ³ /(h Person)]
Empfehlung für Schulen und Kindertagesstätten (dieser Leitfaden, [Kah 2006a], [Pfluger 2006])	15 ... 20
Empfehlung für weiterführende Schulen (dieser Leitfaden, [Kah 2006a], [Pfluger 2006])	17 bis 20
Empfehlung für Sporthallen (Auslegung nach der Personenanzahl gemäß [DIN 18032-1])	60
Weitere Angaben aus der Literatur	
SIA, Energiegerechte Schulbauten [SIA D 090] (Angabe für Schulen)	15
Baurichtlinie Dänemark [BR 1995] (Angabe für Schulen)	18
Baurichtlinie Finnland [NBC 2003] (Angabe für Schulen)	21.6
Geringe Luftqualität (Kategorie RAL 4) gemäß [EN 13779]	bis 22

Im Interesse eines noch vertretbaren investiven und betriebstechnischen Aufwandes sollten die Luftmengen sich jedoch nicht an den Obergrenzen der Komfortanforderungen, sondern an den hygienischen Erfordernissen orientieren.

In Sporthallen werden personenbezogene Luftmengen gemäß der Sportstätten Normung (vgl. [DIN 18032-1]) von $60 \text{ m}^3/(\text{h Person})$ empfohlen. Bei Einfachsporthallen entspricht bei dieser Auslegung der Zuluftbedarf der Sportler etwa dem Abluftbedarf in den Nebenräumen.

6.4 Konzepte zur kontrollierten Lüftung mit Wärmerückgewinnung

Speziell bei Bildungsgebäuden scheint eine kontrollierte Lüftung eine hervorragende Lösung zu sein. Im Unterschied zur gebräuchlichen Fensterlüftung erfolgt eine ausreichende Frischluftzufuhr automatisch und kann auch bei kalten Außentemperaturen zugfrei eingebracht werden. Die Wärmerückgewinnung aus der Abluft spart zudem auch noch Energie. Da das Lüftungskonzept wesentlichen Einfluss auf die Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten hat, sollte es schon möglichst früh im Planungsprozess eingebunden werden. Ebenfalls früh sollte eine Abstimmung mit dem Brandschutzkonzept erfolgen. Viele Brandabschnitte vergrößern durch zusätzliche Brandschutz-Maßnahmen den Installationsaufwand.

Alle Räume müssen in das Lüftungskonzept eingebunden werden, auch Verkehrsflächen und Sanitärbereiche müssen be- und entlüftet werden. Neben moderaten Investitions- und Wartungskosten sollten insbesondere geringe Betriebskosten durch kleine Druckverluste des Kanalnetzes angestrebt werden.

In Schulsporthallen ist der Schritt zur kontrollierten Lüftung kleiner, da zumindest eine Be- und Entlüftung der Nebenräume heute schon der Baupraxis entspricht. Die Besonderheiten der Sporthallen-Lüftung werden in eigenen Abschnitten jeweils ergänzt.

Auch der Sommerbetrieb sollte im Lüftungskonzept berücksichtigt werden. Im Sommer ist in der Regel eine Entlüftung der Sanitärbereiche während der Nutzung ausreichend; in den Aufenthaltsräumen kann über die Fenster gelüftet werden. Für eine natürliche Lüftung sind ausreichend offenbare Fenster vorzusehen (vgl. Abschnitt 5.2 und Abschnitt 8.1). In der Nacht kann die mechanische Lüftung eine Nachtauskühlung in warmen Perioden unterstützen.

6.4.1 Zentrale oder dezentrale Konzepte

Zunächst muss geklärt werden, ob ein zentrales oder ein dezentrales Lüftungskonzept realisiert werden soll. Zu Vor- und Nachteilen geben die folgenden Fortluftöffnungen erforderlich.

Tabelle 4 und Tabelle 5 in Anlehnung an [Pfluger 2004] einen Überblick (ohne Anspruch auf Vollständigkeit). Bei zentralen Lösungen werden die Innenräume von einem oder wenigen Lüftungsgeräten versorgt. Dezentrale Lösungen belüften mit einem Gerät einen oder nur wenige Räume. Im Neubau werden häufig zentrale Konzepte realisiert, da Haustechnikräume und die Erschließung in der Planung noch berücksichtigt werden können. Vor allem bei kompakten Entwürfen bietet sich ein zentrales Konzept an, da dort in der Regel mit einfachen, kompakten Kanalnetzen die Räume erschlossen werden können. Dezentrale Konzepte hingegen sind in Bestandsgebäuden meist leichter zu integrieren, da für das Kanalnetz weniger Platzbedarf besteht. Weiterhin ist kein zusätzlicher zentraler Haustechnikraum für das größere Zentralgerät erforderlich. Die kleineren dezentralen Geräte können häufig im Aufenthaltsraum selbst, ggf. in Schrankelementen, deckenhängend oder hinter einer Vorwandinstallation aufgestellt werden. Dabei sollten vor allem die Schallemissionen des Geräts kritisch geprüft werden. Weiterhin sollte der Brandschutz möglichst frühzeitig mit dem Lüftungskonzept abgestimmt werden, um den Aufwand für Brandschutz-Maßnahmen im Lüftungssystem zu minimieren. Dezentrale Konzepte können z.B. auf die Brandabschnitte abgestimmt werden. Fertig konfektionierte dezentrale Lüftungssysteme haben in der Regel sehr geringen Installationsaufwand. Neben den Geräteanschlüssen sind lediglich Kernbohrungen für Außen- und Fortluftöffnungen erforderlich.

Tabelle 4: Argumente bei zentralen Lüftungskonzepten (Quelle: [Kah 2006a])

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - Reduzierung der Anzahl von Außen- und Fortluftführungen (Wanddurchbrüche, Wetterschutzgitter etc.) - Kein Platzbedarf für Wärmerückgewinnungsgerät außerhalb des Haustechnikraums / der Haustechnikräume - Schalltechnisch unkritischere Lösung, da das Lüftungsgerät in eigenem Raum untergebracht ist - Wartung und Filterwechsel konzentrieren sich auf Haustechnikraum / Haustechnikräume - Abhängig vom Gebäudeentwurf ergibt sich ein Kostenvorteil, weil weniger Einzelkomponenten erforderlich sind (Lüftungsgeräte, Frostschutz, Kondensatablauf etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> - Relativ hoher Planungsaufwand - Eigener Raum für Lüftungszentrale notwendig - Relativ hoher Platzbedarf - Einbau von zusätzlichen Brandschutzkomponenten im Lüftungssystem erforderlich, aufgrund von Kreuzung von Brandabschnitten etc.

Tabelle 5: Argumente bei dezentralen Lüftungskonzepten (Quelle: [Kah 2006a])

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - Individuellere Regelbarkeit - Kein zusätzlicher Technikraum notwendig, da Geräte z. B. in Unterrichtsräumen aufgestellt werden können - Geringer Planungsaufwand, standardisierte Lösungen 	<ul style="list-style-type: none"> - Außenwanddurchbrüche in jedem Raum mit Lüftungsgerät erforderlich - Geräteschallabgabe der dezentralen Geräte im Aufstellraum (z. B. Unterrichtsraum) - Platzbedarf für Einzelgeräte z. B. im Unterrichtsraum, Vorbereitungsraum etc. - Filter, Frostschutz und Kondensatablauf an jedem Einzelgerät sowie zugehöriger Wartungsaufwand

Als Beispiel zeigt Abbildung 57 die Integration der dezentralen Lüftungsgeräte bei der Sanierung der Grundschule in Baiersdorf. Bei diesen gelungenen Lösungen sind die Zentralgeräte samt Schalldämpfer für zwei angrenzende Klassenräume im Bereich einer Vorwandinstallation eines der beiden Klassenräume angeordnet. Der Aufwand für Anschlüsse, sowie Außen- und Fortluftöffnungen konnte so gegenüber einer raumweisen Anordnung reduziert werden. Mit der außenwandnahen Anordnung sind so gleichzeitig die Längen der „kalten“ Kanäle minimiert (im Prinzip nur die Länge des Schalldämpfers).

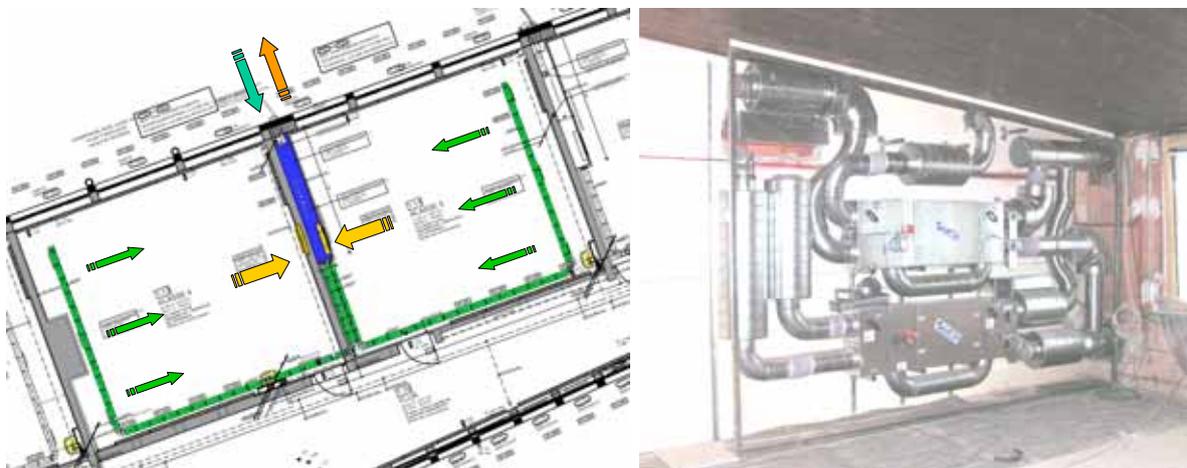


Abbildung 57: Dezentrales Lüftungskonzept bei einer Generalsanierung einer Grundschule in Baiersdorf. Hinter einer Vorwandinstallation sind zwei Lüftungsgeräte für jeweils zwei aneinander grenzende Unterrichtsräume installiert.
Architektur: Architekturbüro Haase, Karlstadt / **Haustechnik:** Sebrantke, Heroldsbach. (Foto: Architekturbüro Haase)

Ein weiteres Beispiel: Bei der Schulmodernisierung in Stams (A) wurde in einem vorab-Versuch in einer Musterklasse das dezentrale Lüftungsgerät eingesetzt, um für Schüler und Lehrer einen direkten Luftqualitätsvergleich zu haben. Nach Aussagen des Architekten Raimund Rainer, war der Hausmeister schnell begeistert, weil die

Luft in der Musterklasse nicht mehr so abgestanden war. Im eingesetzten Lüftungsgerät sind bereits alle erforderlichen Komponenten (Lüftungsgerät inkl. Schalldämpfer, Zu- und Abluftventile, Luftfilter sowie Regelung) enthalten, so dass der Montageaufwand extrem gering ist. Der gemessene Schallpegel lag nach Angabe des Planers bei 30 dB(A) (Maße des Deckengeräts 462 mm x 831 mm x 1905 mm (H x B x L) / Lüftungsgerät X-Vent der Fa. Airmaster (DK)).



Abbildung 58: Dezentrales Lüftungskonzept bei einer Schul-Modernisierung und Erweiterung in Sams (A). Architekt: Raimund Rainer, Innsbruck (Fotos: Simon Rainer)

Eine fassadenintegrierte dezentrale Lüftungslösung bietet das System „LiLu“ (www.michaeltribus.com). Das Lüftungsgerät inkl. hocheffizienter Wärmerückgewinnung, Schalldämpfer und Filter ist als geschlossenes Element im Fenster angeordnet. Außenluft- und Fortluftführung sind mit der Integration in der Außenwand extrem kurz. Die Außenluft- und die Fortluftöffnung sind im Fensterelement integriert. Zu- und Abluftkanal gehen an der Oberseite der Lüftungsbox ab. Abbildung 59 zeigt die Integration des Lüftungsgeräts bei einer Schulerweiterung in San Vito di Cadore (Südtirol).



Abbildung 59: Fenster integriertes Lüftungssystem „LiLu“ (M. Tribus Architecture,(I) Lana). Das Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung inkl. Filter und Schalldämpfer ist im Fensterrahmen integriert. Die Außenluft- und Fortluftöffnung sind im Fensterrahmen angeordnet.
Schulerweiterung in San Vito di Cadore (I), Architekten R. Damian, C. Da Rin / Passivhaus-Architekt M. Tribus. (Fotos: M. Tribus)

Die zangenartige Erschließung der Unterrichtsräume beim zentralen Lüftungskonzept einer Passivhaus-Schule in Alsfeld (Albert-Schweitzer-Schule) zeigt Abbildung 60. Zu- und Abluftkanal werden in den Unterrichtsräumen weitgehend in jeweils einem Brandabschnitt geführt, um die Querungen von Brandabschnitten zu verringern.

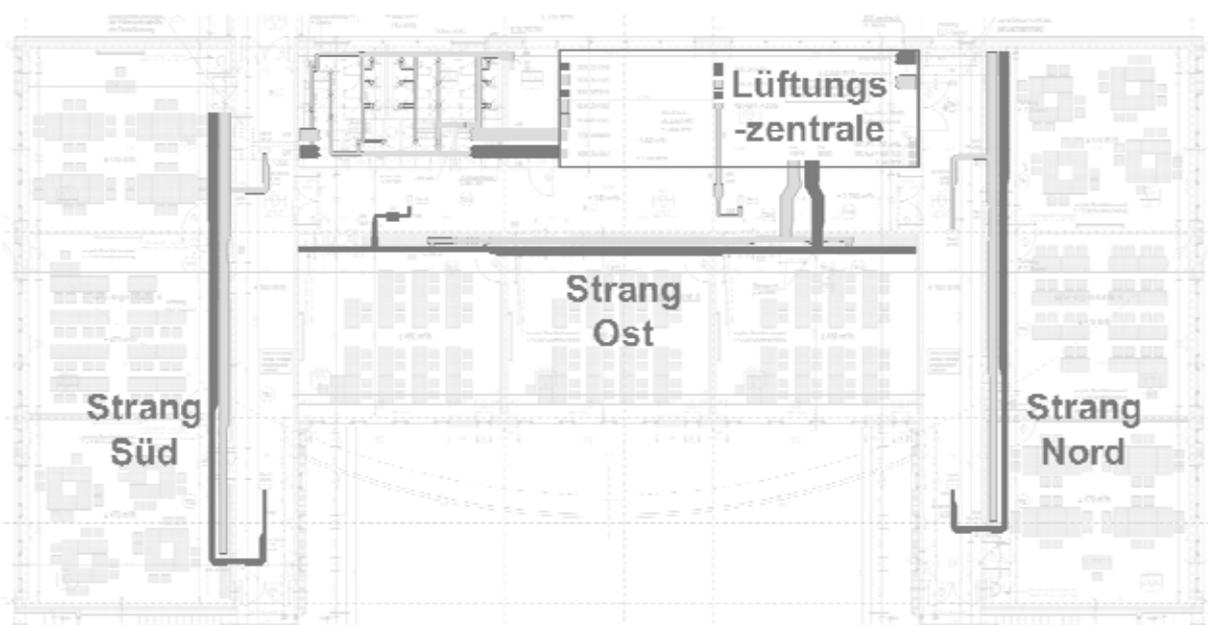


Abbildung 60: Grundriss des 2.OG der Albert-Schweitzer-Schule (Alsfeld) mit kurzen Zu- und Abluftkanalführungen. Architektur: BLFP, Friedberg / Haustechnik: Neuplan, Gießen (Quelle: [AkkP 33]).

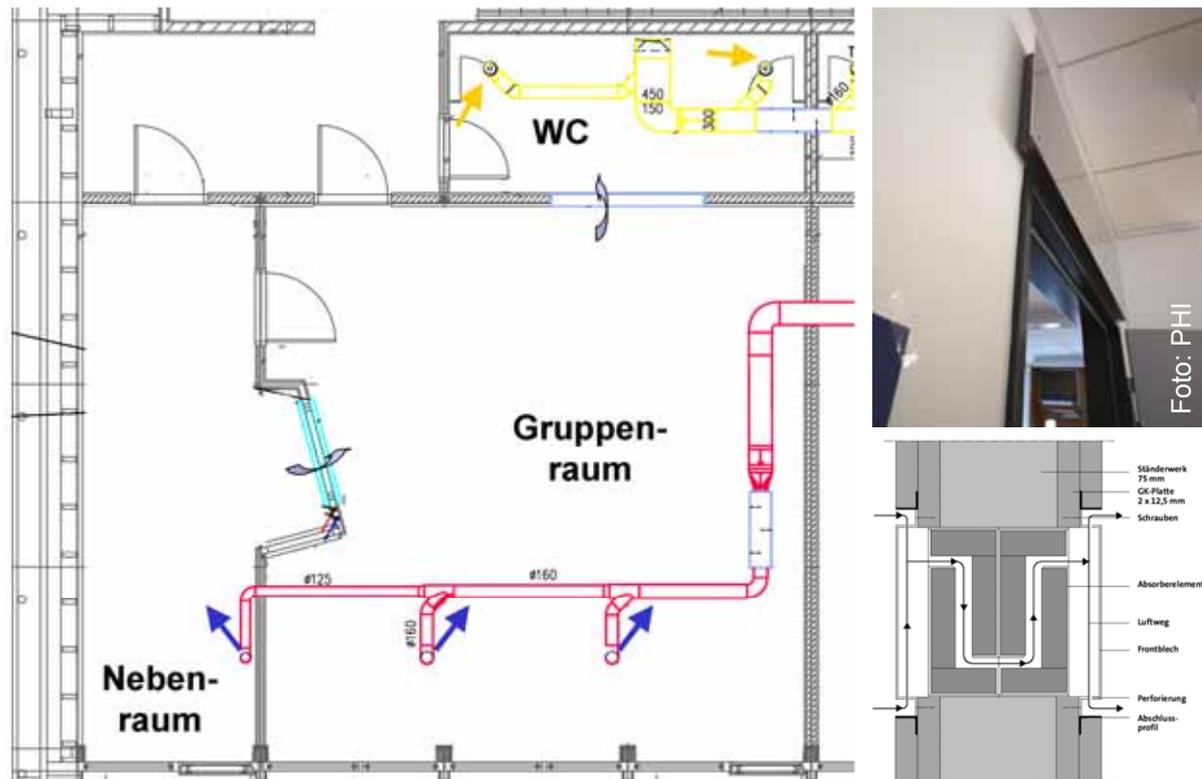


Abbildung 62: Lüftungskonzept in der Kindertagesstätte in Schwanheim. Das Foto rechts zeigt das Überströmelement / Zeichnung des eingesetzten Elements (Fa. Westaflex Typ 400). Architektur: sdks, Darmstadt / Haustechnik: IB Gernet, Oberursel

Bei der Auslegung der Überströmöffnungen (inkl. der erforderlichen Schallschutz- und ggf. Brandschutzmaßnahmen) ist darauf zu achten, dass diese ausreichende Querschnitte aufweisen. Der Druckabfall des gesamten Elements sollte nicht größer als 5 Pa sein, da andernfalls zusätzliche In- und Exfiltration induziert wird, welche die Lüftungswärmeverluste erhöhen.

Auch bei der Kindertagesstätte „Wiesenbacher Tal“ in Neckargemünd konnte umfassend das Konzept der gerichteten Durchströmung angewendet werden. Die Räume wurden in Zuluft- und Abluftbereiche zониert. Durch Türunterschnitte und Türgitter strömt die Luft über die Verkehrsflächen zu den Abluftbereichen. Aufgrund des Brandschutzkonzepts, die Räume können bei Gefahr direkt nach außen verlassen werden, bestanden keine Brandschutzanforderungen an die Überströmöffnungen.

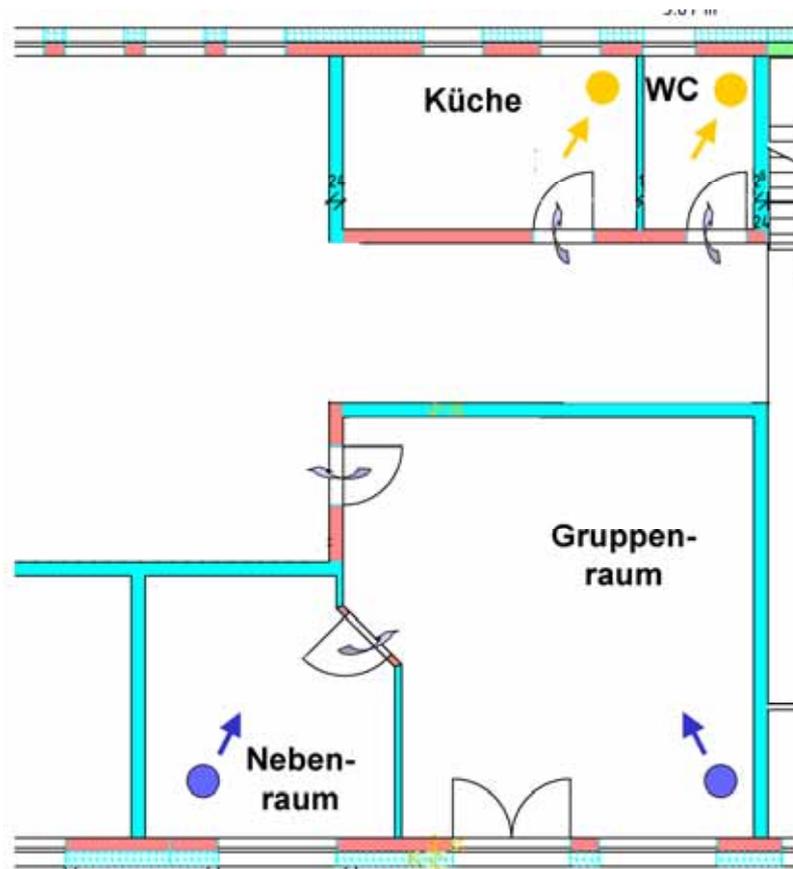


Abbildung 63: Lüftungskonzept bei der Kindertagesstätte in Neckargemünd (Wiesenbacher Tal). Die Räume wurden in Zuluft- und Abluftbereiche zониert. Architektur: Architekturbüro Merkel, Neckargemünd / Haustechnik: Planungsbüro Schmitt und Partner, Mauer



Abbildung 64: Überströmung vom Fachraum in den Vorbereitungsraum. Das schalldämpfende Überströmelement wurde aus Kanalstücken und Kanaleinbauteilen zusammengestellt. Schul-Pavillon Walldorf / Architektur: IB W. Herrmann, Walldorf / Haustechnik: Gadow + Graeske, Walldorf.

Häufig werden Zu- und Ablufträume durch einen Flur getrennt. Besteht zum Flur hin eine Brandschutzanforderung, kann auch eine Überströmung oberhalb einer

abgehängten Decke geprüft werden. Hierzu muss die abgehängte Decke feuerhemmend (z.B. aus Gipskarton) ausgeführt werden. Die Luft kann in diesem Fall vom Unterrichtsraum oder Gruppenraum und im Flurbereich oberhalb der abgehängten Decke in die Sanitärbereiche oder andere Ablufträume einströmen. Sollen Überström-Lösungen ausgeführt werden, dann müssen diese frühzeitig in der Planung berücksichtigt und mit dem Brandschutzkonzept abgestimmt werden.

Wie weiter oben bereits ausgeführt, wird dringend empfohlen, *alle* Räume in das Lüftungskonzept einzubinden. Durch die Bildung von Brandabschnitten entstehen z.T. viele kleine Flurbereiche, welche jeweils durch Türen mit Brandschutz-Anforderung getrennt sind. Die Be- und Entlüftung der Flurabschnitte ist durch die Brandschutz-Auflagen häufig aufwendig. Eine Vereinfachung kann erreicht werden, wenn die Flurabschnittstüren durch magnetische Türaufhalter normalerweise offen stehen und nur im Brandfall schließen (die Feststellung wird durch Unterbrechung der Stromzufuhr automatisch gelöst, z.B. durch einen Rauchmelder). Zusammenhängende Flurbereiche können mit dieser Lösung gemeinsam belüftet werden. Weiterhin werden die Brandabschnittstüren, da sie normalerweise offen stehen, weniger belastet, was die Haltbarkeit der Türen verbessert. Bei einer "Schule für praktisch Bildbare" in Frankfurt-Nied kann der komplette Flurbereich über die Sanitärbereiche entlüftet werden. Die Einbringung der Zuluft kann auf wenige Stellen im Flurbereich begrenzt werden.

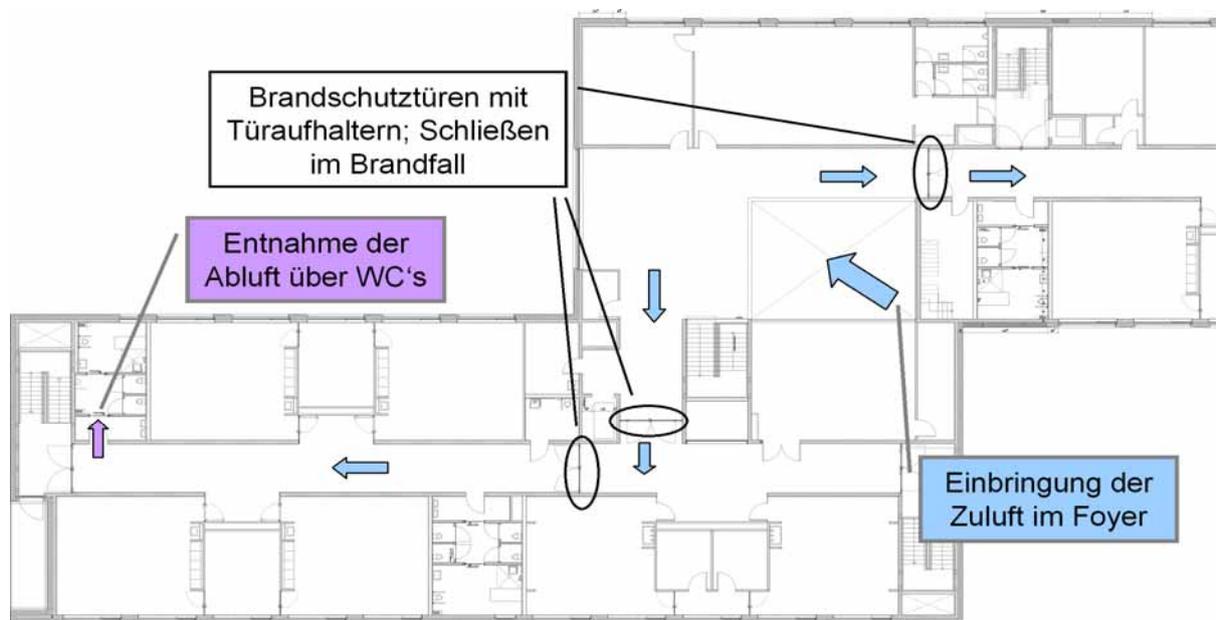


Abbildung 65: Türaufhalter an den Brandabschnittstüren vereinfachen die Be- und Entlüftung der Verkehrsflächen bei einer Passivhaus-Schule in Frankfurt (Schule für praktisch Bildbare in Frankfurt-Nied). Im Foyer wird Zuluft eingebracht und strömt über die Flurabschnitte in die WC's. Im Brandfall öffnet der Türaufhalter und die Brandschutztüren schließen sich.
Architektur: Hausmann Architekten, Aachen / Haustechnik: planungsgruppeDrei, Pfungstadt

6.4.3 Ansätze zur Verringerung der Gesamtvolumenströme

Ein Vorteil des Prinzips der gerichteten Durchströmung ist die zweite Nutzung der Luft in den Abluftbereichen, die Gesamtluftmengen können mit diesem Ansatz verringert werden. Wie weit dieser Vorteil reicht, hängt vom Verhältnis von Zuluft- zu Abluftbedarf ab. Für die Schulnutzung wurde dies im [AkkP 33] untersucht. Für 30 Schüler und einen Lehrer wurde der Zuluft- und Abluftbedarf bestimmt. Die Verhältnisse zeigt Abbildung 66. Wird Zu- und Abluftbedarf raumweise gedeckt, so ergibt sich ein Gesamtluftbedarf zwischen 700 und 850 m³/h (Bedarf im Unterrichtsraum, anteiliger Flur und im anteiligen Sanitärbereich). Mit der gerichteten Durchströmung wird der Abluftbedarf im Sanitärbereich durch überströmende Luft vollständig gedeckt und der Flur wird automatisch mit belüftet. Die Gesamtluftmenge kann mit der gerichteten Durchströmung bei Schulnutzung bis zu 35 % verringert werden. Die Verhältnisse sind vergleichbar in Kindertagesstätten. Bei Schulen und Kindertagesstätten bietet es sich an, das Konzept der gerichteten Durchströmung auf einzelne Abschnitte anzuwenden. Z.B. kann der Abluftbedarf des Sanitärbereichs durch eine Überströmung aus dem angrenzenden Gruppenraum gedeckt werden.

In Schulsporthallen hingegen ist der Abluftbedarf in den Nebenräumen und der Zuluftbedarf im Hallenbereich nahezu gleich groß (vgl. Abschnitt 6.4.4). Die Gesamtluftmenge kann bei dieser Nutzung durch die gerichtete Durchströmung nahezu halbiert werden.

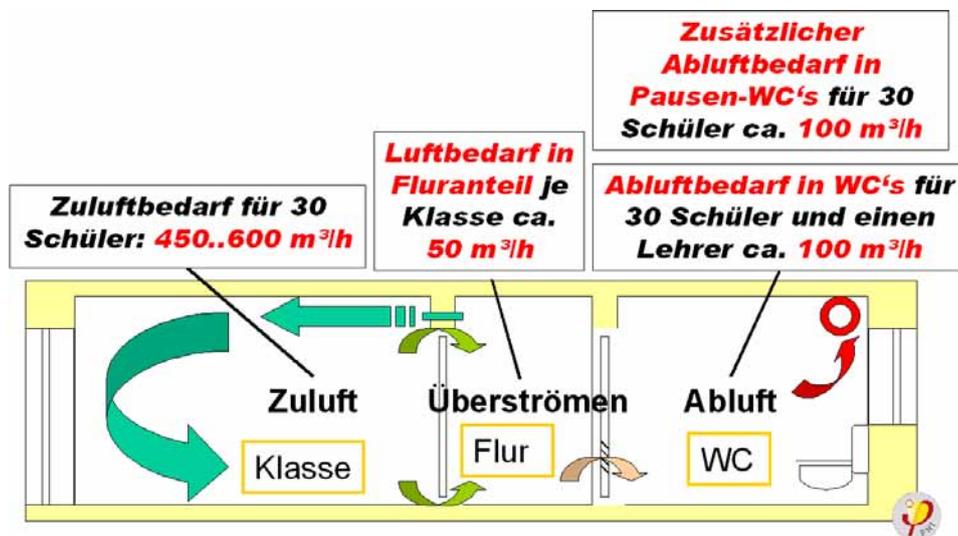


Abbildung 66: Zu- und Abluftbedarf in einer Schule bezogen auf eine Klasse (Quelle: [AkkP 33])

Eine weitere Möglichkeit die Gesamtluftmengen einer zentralen Lüftungsanlage zu verringern, liegt in der Berücksichtigung der Gleichzeitigkeit. In Schulen findet der Unterricht z.B. entweder in der Klasse oder im Fachraum statt. Sofern die Lüftung in den Räumen einzeln zuschaltbar ist, kann die Berücksichtigung der genauen Belegung zu einer Verringerung der Gesamtluftmenge von etwa 30 % führen. In Kindertagesstätten könnte eine Belegung von Gruppenraum oder Mehrzweckraum

unterschieden werden. Ein Speisesaal kann mit den freiwerdenden Luftmengen durch Wegschalten ungenutzter Aufenthaltsräume be- und entlüftet werden. Für eine Optimierung der Luftmengen müssen die betreffenden Räume mit motorischen Klappen ausgerüstet werden. Bei diesem Optimierungskonzept sollte bedacht werden, dass die Konzepte einfach und für den Nutzer nachvollziehbar bleiben.

Die im Abschnitt 6.3 empfohlenen Luftmengen in Schulen und Kindertagesstätten gehen in der Kernzeit von einem durchgängigen Betrieb der Lüftung in den Aufenthaltsräumen aus. Werden Klassen- und Gruppenräume nur bei Belegung be- und entlüftet, dann sollten die Luftmengen sich an der oberen Grenze des empfohlenen Volumenstrombereichs orientieren (Grundschule 17 m³/(h Schüler) und weiterführende Schule 20 m³/(h Schüler)).

6.4.4 Sporthallen

Die Investitionskosten für die Lüftungsanlage einer Passivhaus-Sporthalle können verringert werden, wenn der Zuluftbedarf im Hallenbereich und der Abluftbedarf in den Umkleiden / Duschen von einem Lüftungsgerät gedeckt wird. Der Abluftbedarf in den Nebenräumen und der Zuluftbedarf im Hallenbereich sind nahezu gleich groß, so dass mit einer Überströmung der Hallenzuluft in die Umkleiden / Duschen dieser Bereich gleich mitversorgt wird (vgl. Abbildung 67 links). Aufgrund der unterschiedlichen Temperaturanforderungen in der Halle und im Nebenraumbereich, muss die überströmende Luft vor dem Eintritt in Umkleiden / Duschen nacherwärmt werden. Beispielsweise kann hierfür die Luft über Heizkörper einströmen. Die Anforderungen des Brandschutzes sollten bei dieser Lösung frühzeitig geprüft werden.

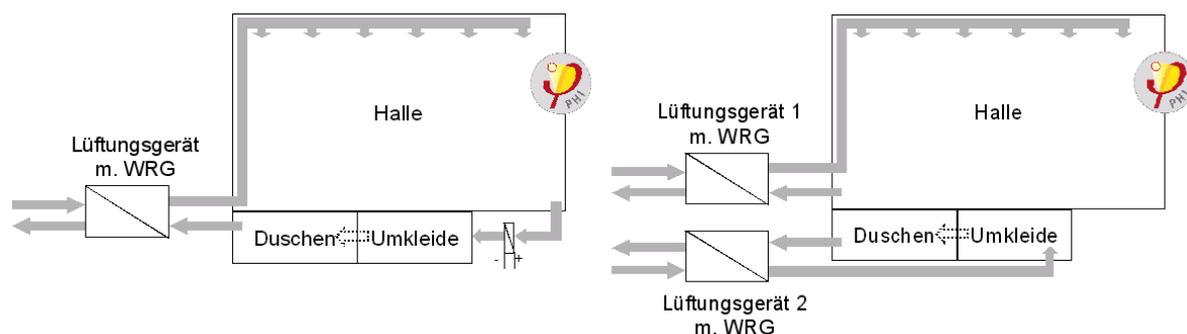


Abbildung 67: Prinzipschema zu Lüftungskonzept in Sporthallen. Links eine kombinierte Versorgung von Hallenbereich und Umkleide / Duschen. Die Hallenzuluft strömt in die Nebenräume über. Rechts ist eine getrennte lufttechnische Versorgung von Halle und Umkleiden- / Dusch-Bereich dargestellt. (Quelle: PHI)

Gegenüber einem Lüftungskonzept mit getrennten Lüftungsgeräten (vgl. Abbildung 67 rechts) kann die Lüftungsanlage kleiner dimensioniert bzw. vereinfacht werden. Werden die Bereiche Umkleide / Duschen und Sporthalle jeweils getrennt mit Zu- und Abluft versorgt (vgl. Abbildung 67, rechts), so sollten die Laufzeiten der Lüftung in den

Nebenräumen auf den tatsächlichen Bedarf beschränkt werden (z.B. Regelung nach der Feuchte oder mittels Präsenzmelder mit ausreichender Nachlaufzeit).



Abbildung 68: Umsetzung der Überströmung bei einer Passivhaus-Sporthalle in Reichelsheim. Die Hallenluft strömt im Bereich des Flurs durch einen brandschutztechnisch ertüchtigten Kanal in die Umkleiden. Ein Heizkörper erwärmt die überströmende Luft in den Umkleiden (Überströmöffnung befindet sich hinter dem Heizkörper).
 Architektur: Eigenbetrieb Gebäudewirtschaft Wetteraukreis & a5 Planung, Bad Nauheim / Haustechnik: DBH Bachmann, Bad Hersfeld.

6.4.5 Lufteinbringung

Die Anordnung und Wahl der Zu- und Abluftelemente müssen sicherstellen, dass Raumluftbelastungen abgeführt und der Raum vollständig durchspült wird. Darüber hinaus dürfen mit der Einbringung keine Beeinträchtigungen durch Zugscheinungen oder Schallentwicklungen an Luftein- und Auslässen entstehen.

Das Konzept der Lufteinbringung wirkt sich in der Folge auch auf die Kanalführung aus. Mit Weitwurfdüsen kann ggf. das Zuluftkanalnetz verkürzt werden. Weitwurfdüsen sollten mit moderaten Luftgeschwindigkeiten betrieben werden, so dass an der gegenüberliegenden Fassade die Strahlgeschwindigkeit vollständig abgebaut ist. Zur Vermeidung von Zugscheinungen sollte das Zugluftrisikos im Aufenthaltsbereich gemäß [EN ISO 7730] max. 10 % betragen. Damit ergeben sich max. Luftgeschwindigkeiten von kleiner gleich 0,1 m/s im Aufenthaltsbereich (Annahme: Turbulenzgrad 40 %, Raumtemperatur 20 °C).



Abbildung 69: Schlitzauslässe (Bild links) haben sich gut bewährt. Strahlauslässe (Bild rechts) sollten nicht mit zu hohen Luftgeschwindigkeiten betrieben werden (besser mehrere Auslässe setzen), damit keine Zegerscheinungen entstehen. Passivhaus-Schule Frankfurt (links): Architektur: 4a, Stuttgart / Haustechnik: ICRZ Ing. Cons. Ruth + Zimmermann, Neuenhagen
Passivhaus-Schule Alsfeld (rechts): Architektur: BLFP, Friedberg / Haustechnik: Neuplan, Gießen.



Abbildung 70: Luftauslässe mit hoher Induktion. Links Schlitzauslässe und rechts kanalintegrierte Auslassgitter. Die Luftgeschwindigkeiten am Auslass werden schnell abgebaut, Zegerscheinungen durch die Lufteinbringung können so verringert werden. Durch die räumliche Anordnung der Luftentnahme muss eine vollständige Durchspülung des Raums sichergestellt werden. Passivhaus-Schule Neckargemünd (links): Architektur: Donnig + Unterstab, Rastatt / Haustechnik: IWP GmbH, Stuttgart
Passivhaus-Schule-Pavillon Walldorf (rechts): Architektur: IB W. Herrmann, Walldorf / Haustechnik: Gadow + Graeske, Walldorf.

Lufteinbringung bei großen Hallen

Bei Sporthallen besteht häufig die Diskussion, wie die Zuluftmengen geeignet in den Hallenbereich eingebracht werden können, so dass der Raum vollständig durchspült und zugfrei mit Frischluft versorgt werden kann. Zur Klärung der Frage, welche Lösungen geeignet bzw. ob Lösungen ungeeignet sind, wurden im Rahmen dieses Projekts für eine Einfeldhalle CFD-Simulationen (vgl. [FLUENT]) durchgeführt. Unterschiedliche Anordnungen von Zu- und Abluftelementen wurden systematisch untersucht (vgl. Abbildung 71).

Exemplarisch zeigt Abbildung 72 die Luftgeschwindigkeiten im Hallenquerschnitt für eine eher ungünstige Variante (die Zuluft wird mit hohem Impuls eingebracht und an der gegenüberliegenden verglasten Fassade beschleunigt der Kaltluftabfall nochmals die Strömung). Im Aufenthaltsbereich der Sportler waren alle untersuchten Varianten hinsichtlich der Zuglufterscheinungen unkritisch. Im Unterschied zu Veranstaltungshallen sind die eingebrachten Luftmengen in Schulsporthallen deutlich geringer, so dass im Unterschied zu Veranstaltungshallen die zugfreie Einbringung der Zuluft deutlich unkritisch ist. Darüber hinaus sind bei Schulsporthallen die mit der Lufteinbringung verbundenen Zugerscheinungen in der Regel nur bei bewegungsarmen Nutzungen von Bedeutung.

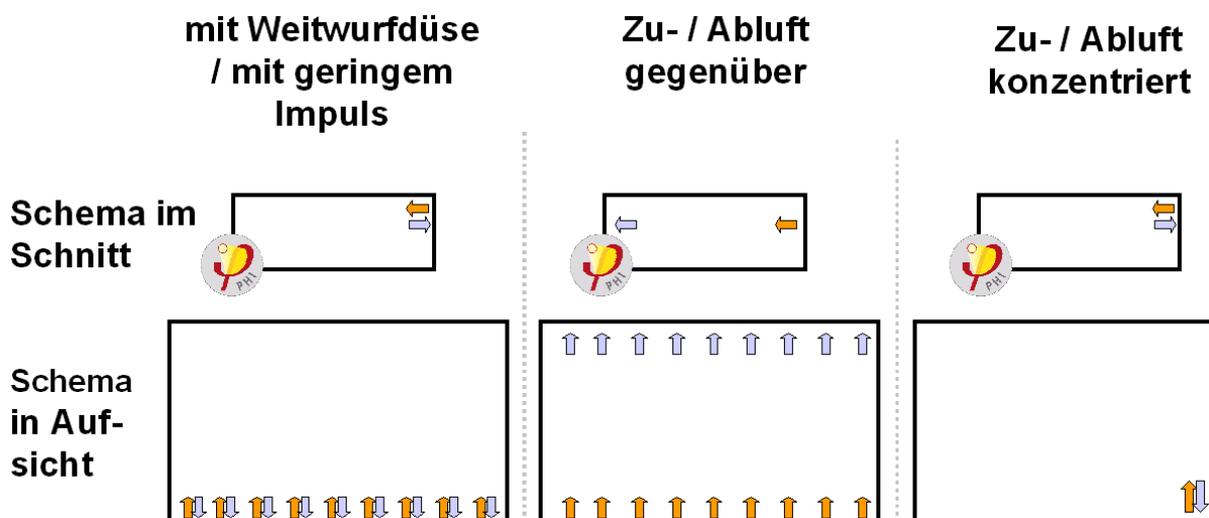


Abbildung 71: Lufteinbringung im Hallenbereich. Randbedingung: Einfachturnhalle mit Sportnutzung / Auslegung der Lüftung nach Bedarf / $60 \text{ m}^3/(\text{h Sportler})$ bzw. Luftwechsel ca. $0,7 \text{ h}^{-1}$. (Quelle: PHI)

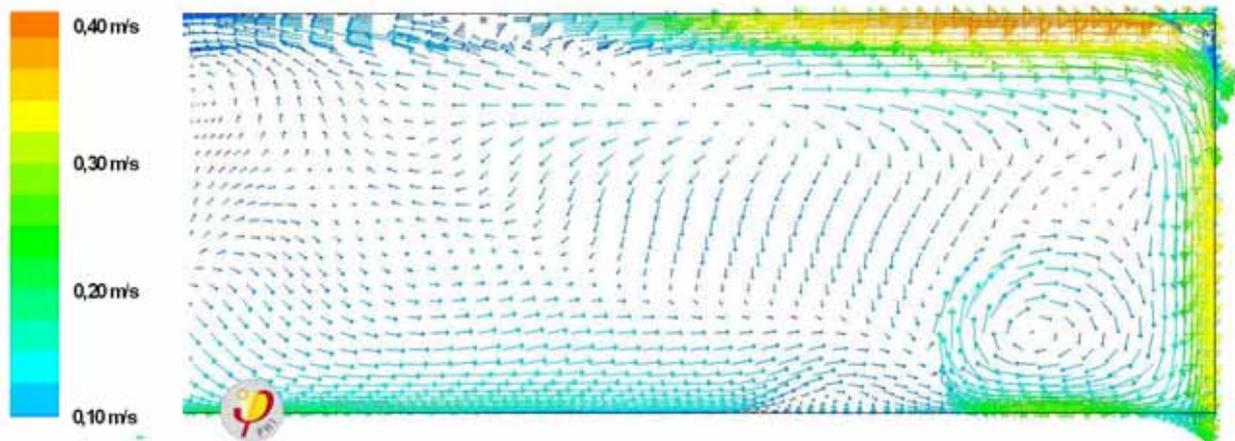
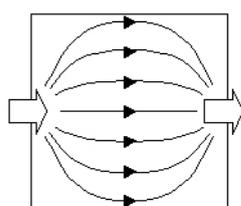
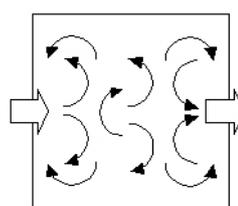


Abbildung 72: Strömungsgeschwindigkeiten im Hallenbereich exemplarisch bei Einbringung mit Weitwurfdüsen mit hohem Impuls (von links oben). Die Abbildung zeigt einen Vertikalschnitt zwischen den Düsen. Die Strömungspfeile sind entsprechend der Luftgeschwindigkeiten eingefärbt. Der Kaltluftabfall an der verglasten Fassade (rechts) erhöht die Luftgeschwindigkeiten (rechts). Auch bei diesem eher ungünstigen Fall sind die Luftgeschwindigkeiten im Aufenthaltsbereich der Sportler unkritisch. Eine Lufteinbringung mit geringerem Impuls verringert die auftretenden Geschwindigkeiten an der Fassade deutlich. (Quelle: PHI)

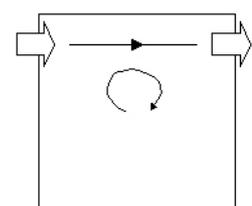
Weiterhin wurde anhand der CFD-Simulationen untersucht, wie wirksam Raumlufbelastungen für unterschiedliche Anordnungen von Zu- und Abluftöffnungen abgeführt werden. Die Lüftungseffektivität charakterisiert die Wirksamkeit eines Lüftungssystems. Die effektivste Strömungsform ist hierbei die Verdrängungslüftung (vgl. Abbildung 73) mit dem geringsten Durchschnittsalter der Raumluf einer Zone.



**Verdrängungs-
lüftung**



**Verdünnungs-
lüftung**



**Kurzschluss-
lüftung**

Abbildung 73: Strömungsmuster zur Veranschaulichung der Lüftungseffektivität. Mit der Verdrängungslüftung werden am wirksamsten Raumlufbelastungen abgeführt. Stellt sich eine Kurzschlussströmung ein, dann wird die Raumluf in einzelnen Raumbereichen seltener erneuert (Quelle: Wikipedia).

Zur Bestimmung der Lüftungseffektivität wird das durchschnittliche Alter der Luft bestimmt und im Anschluss mit dem kürzest möglichem Luftalter (bei Verdrängungslüftung) verglichen. Das Luftalter bezeichnet die Zeitspanne vom Eintritt eines

Luftmoleküls in den Raum bis zur Ankunft am zu untersuchenden Ort im Raum. Das lokale Luftalter wird durch die Lage des Messpunkts im Raum und die herrschenden Strömungsmuster bestimmt.

Die Simulationsrechnungen zeigen für die untersuchten Lüftungskonzepte sehr ähnliche Ergebnisse. Das Luftalter im gesamten Hallenbereich ist nahezu identisch, das bedeutet, es stellt sich überwiegend eine Mischlüftung ein. Selbst bei örtlich sehr konzentrierter Einbringung und Entnahme der Luftmengen (vgl. Abbildung 71, rechts) waren Kurzschlusseffekte vernachlässigbar. Die Ergebnisse deuten daraufhin, dass mit den eher geringen Luftwechsell (ca. $0,7 \text{ h}^{-1}$) keine wirksamere Strömungsform als die Mischlüftung erzielbar ist.

Abbildung 74 zeigt exemplarisch das mittels CFD-Simulationen bestimmte Luftalter für eine Variante mit Weitwurfdüsen (vgl. Abbildung 71, links). Die Untersuchungen zeigen weiterhin leichte Vorteile für eine Einbringung mit geringem Impuls (um 1 m/s) sogar für eine Luftentnahme auf der gleichen Seite. Die Wirksamkeit der Luftführung bleibt vergleichbar, aber Strömungsgeräusche und der Druckabfall am Zulufltelement werden verringert. Außerdem verringern sich die Luftgeschwindigkeiten im Raum nochmals.

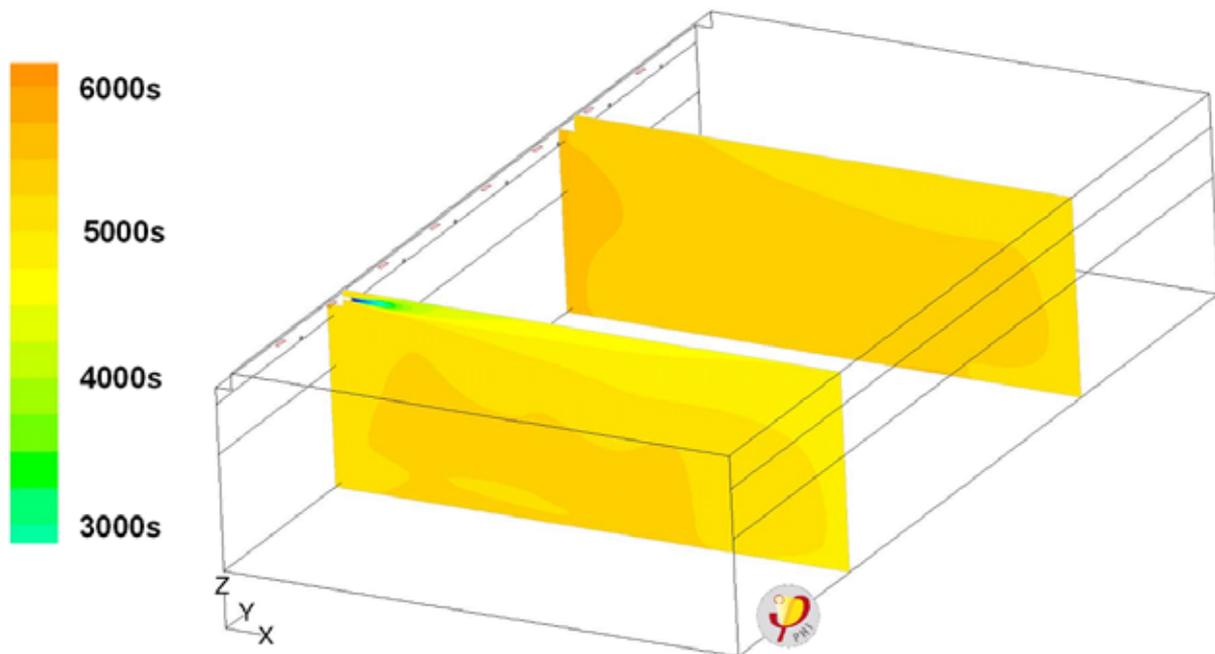


Abbildung 74: Die Abbildung zeigt für zwei Hallenquerschnitte exemplarisch die Ergebnisse zum Luftalter für eine Variante mit Weitwurfdüsen. Das Luftalter weist im Hallenquerschnitt sehr ähnliche Werte auf. Für die weiteren untersuchten Varianten waren die Ergebnisse vergleichbar. Das nahezu identische Luftalter in der gesamten Halle deutet daraufhin, dass sich eine Mischlüftung einstellt. (Quelle: PHI)

Im Unterschied zu Hallen für einen Veranstaltungsbetrieb, welcher hohe Luftmengen erfordert, ist die Lufteinbringung bei Schulsporthallen deutlich unkritischer. Für die untersuchte hochwärmegeämmte Einfachsporthalle zeigte sich, dass die Art der Lufteinbringung im Rahmen praxisrelevanter Lüftungskonzepte kaum Einfluss hat. Die Luftgeschwindigkeiten im Aufenthaltsbereich sind für die untersuchten Varianten unkritisch und auch bei eher kritischen Lüftungskonzepten treten keine relevanten Kurzschlusseffekte auf. Die Lüftungseffektivität liegt über der Bandbreite der untersuchten Konzepte immer im Bereich der Mischlüftung. Es zeigt sich ein leichter Vorteil für Konzepte mit Zuluftbringungen mit geringem Impuls.

6.4.6 Empfehlungen zu Lüftungskonzepten

Zentrale als auch dezentrale Lösungen haben jeweils spezifische Vorteile. In der Modernisierung sind dezentrale Konzepte häufig leichter zu integrieren, wobei zentrale Konzepte im Neubau in der Tendenz mit geringeren Investitionskosten realisierbar sind.

Zentrale Lüftungskonzepte können mit dem Prinzip der gerichteten Durchströmung hinsichtlich der Gesamtluftmengen und der Luftführung weiter optimiert werden. Die erforderlichen Luftmengen können damit verringert werden, es sind automatisch die betreffenden Räume im Lüftungskonzept eingebunden und die Gebäudestruktur kann als „Kanal“ genutzt werden. Mit der Verringerung der Gesamtluftmengen können ggf. kleinere Zentralgeräte eingesetzt werden. Besonders interessant ist das Prinzip bei Schulsporthallen.

Für den Betrieb der kontrollierten Lüftung sind immer auch Antriebsenergien erforderlich. Maßgeblich für eine stromeffiziente Lüftung ist der Druckverlust im Kanalnetz und im Lüftungsgerät. Möglichst früh in der Planung sollte die Lüftungsaufgabe mit berücksichtigt werden. Geringe Strömungsgeschwindigkeiten, kurze Kanäle, Vermeidung von Kanalkreuzungspunkten und ggf. eine abgestimmte Raumorganisation können helfen, die Druckverluste im Kanalnetz zu optimieren. Die Projekterfahrung zeigt, dass der Druckabfall im Kanalnetz eines Strangs (Außenluft bis Zuluft bzw. Abluft bis Fortluft, ohne Zentralgerät) möglichst 200 Pa nicht überschreiten sollte.

Weiterhin muss bei verzweigten Kanalnetzen vor allem der Strang mit dem höchsten Druckverlust optimiert werden, da dieser Strang den Druckverlust des gesamten Lüftungsnetzes bestimmt. Die Optimierung des Druckabfalls sollte dabei an den Hauptströmungswiderständen ansetzen, z.B. durch Kanalaufweitungen im Bereich von Wetterschutzgittern und Kanaleinbauten (Klappen, Filter, Heizregister etc.).

Im Haustechnikraum sollte ausreichend Platz für das Zentralgerät und die Kanalverbindungen vorgesehen werden. Sehr kompakte Lüftungsgeräte haben in der Regel höhere interne Druckverluste.

Fortluft- und Außenluftkanal sind kalt (nahezu Außentemperatur). Diese Kanäle sollten daher zunächst möglichst kurz sein und müssen fachgerecht gedämmt (in diffusionsdichter Ausführung, empfohlene Mindestdämmstärke 100 mm, WLZ 040) werden. Vor allem bei dezentralen Lüftungskonzepten ist auf kurze „kalte Kanäle“ zu achten (fassadennahe Anordnung der Geräte). Grundsätzlich sollten einfache Konzepte angestrebt werden.

6.4.7 Strategien zur Filtertrocknung von Zentralgeräten

Bei Nichtwohngebäuden wird die Lüftungsanlage üblicherweise intermittierend betrieben, d.h. die Anlage läuft im Wesentlichen während der Nutzungszeit, nicht aber nachts und am Wochenende oder in Ferienzeiten. Deshalb ist darauf zu achten, die Außenluftfilter auch in den Stillstandszeiten möglichst trocken zu halten. An Außenluftfiltern sollte die relative Luftfeuchte bei Temperaturen über 0 °C nicht dauerhaft höher als 80 % sein [VDI 6022]. Eine Taupunktsunterschreitung im Bereich der Luftfilter - insbesondere bei Stillstand der Anlage - ist auf jeden Fall zu verhindern.

Beim Betrieb des Lüftungsgeräts müssen geeignete Schutzstrategien vorgesehen werden, um eine dauerhafte Durchfeuchtung des Außenluftfilters auszuschließen. Die nachstehenden Strategien werden empfohlen und können entweder durch Zusatzkomponenten am Lüftungsgerät oder bauseits eingerichtet werden. Die Regelung muss ebenfalls für diese Zusatzfunktion vorbereitet werden.

Als Möglichkeit zur Filtertrocknung bei intermittierendem Betrieb bietet sich ein ca. 15 bis 30 Min dauernder Umluftbetrieb vor jeder Abschaltung der Anlage mittels Zu- bzw. Abluftrückführung an (vgl. Abbildung 75). Durch Schließen der Außenluftklappe wird der Außenluftfilter vor (konvektiv) einströmender Außenluft in den Stillstandszeiten geschützt, der Filter sollte immer innerhalb des warmen Gebäudebereichs angeordnet werden. Ansonsten ist eine Beheizung der Filterkammer notwendig. Die Zulufrückführung ist aus hygienischer Sicht zu bevorzugen (vgl. Abbildung 76).

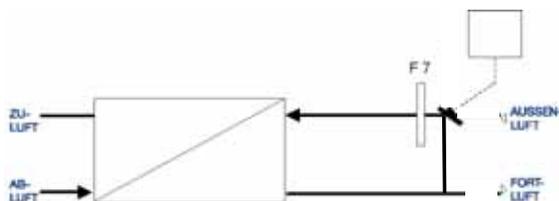


Abbildung 75: Strategien zur Filtertrocknung von Zentralgeräten. Umluftbetrieb mittels Zu- bzw. Abluftrückführung

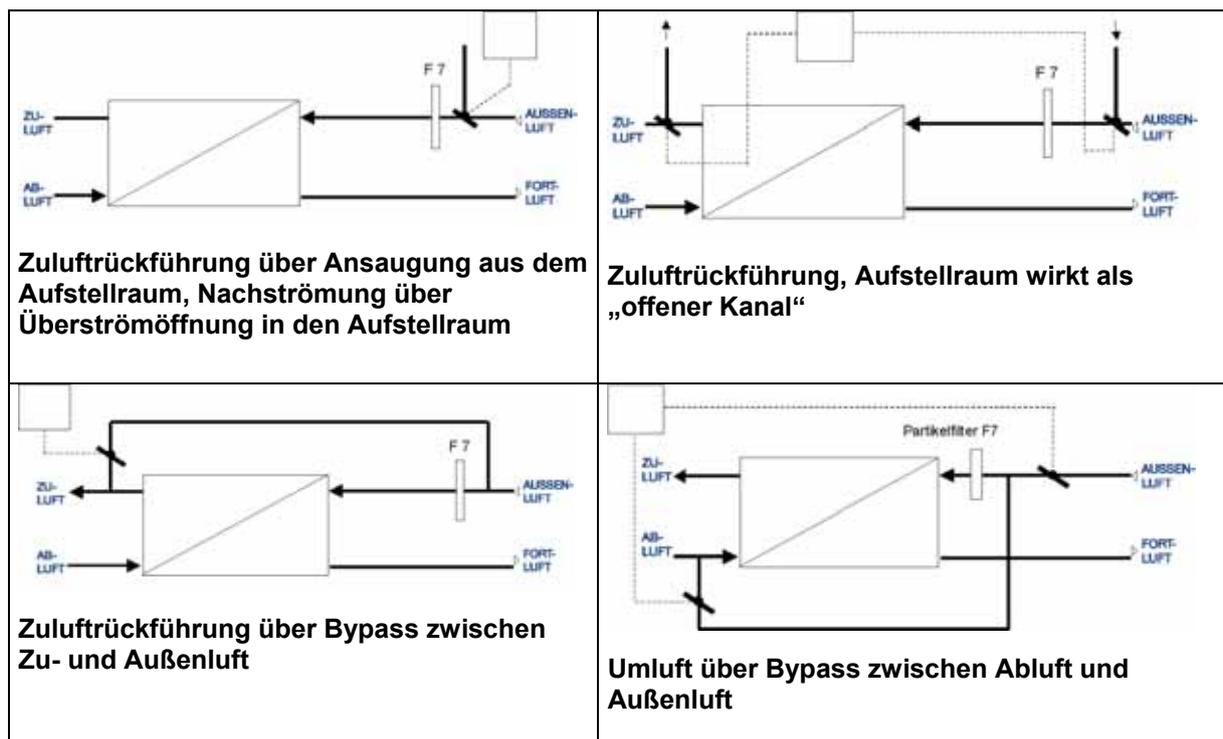


Abbildung 76: Strategien zur Filtertrocknung von Zentralgeräten (Quelle: [Pfluger 2006]). Die entsprechenden Trocknungsbetriebszustände werden jeweils ca. 15 bis 30 Min betrieben, bevor die Anlage abgeschaltet wird (z.B. Nacht- oder Wochenendausschaltung).

6.5 Betrieb der kontrollierten Lüftung

Bei den hier behandelten Nutzungen von Schule, Kindertagesstätte und Sporthalle muss die kontrollierte Lüftung bedarfsabhängig betrieben werden. Aufgrund der zeitlich eingeschränkten Nutzung würde ein durchgängiger Betrieb der Lüftungsanlage, wie im Wohnbau empfohlen, die mögliche Energieeinsparung zu Nichte machen. Trotz Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung kann der Primärenergiebedarf zur Deckung der Lüftungswärmeverluste und der Hilfsenergien, bei durchgängigem Betrieb sich gegenüber einer ausreichenden Fensterlüftung fast verdoppeln. Ein an die Nutzungszeiten angepasster Lüftungsbetrieb hingegen ermöglicht eine deutliche Primärenergieeinsparung gegenüber der Fensterlüftung (vgl. Abbildung 77).

Nach einer Betriebsunterbrechung müssen die Räume vor dem eigentlichen Nutzungsbeginn vorgespült werden, um in Stillstandzeiten angereicherte Raumluftbelastungen abzuführen. Gemäß [EN 15251] sollte das Raumvolumen vor Nutzungsbeginn etwa zweimal ausgetauscht werden. In Schulen und Kindertagesstätten ist eine einstündige Vorspülphase ausreichend.

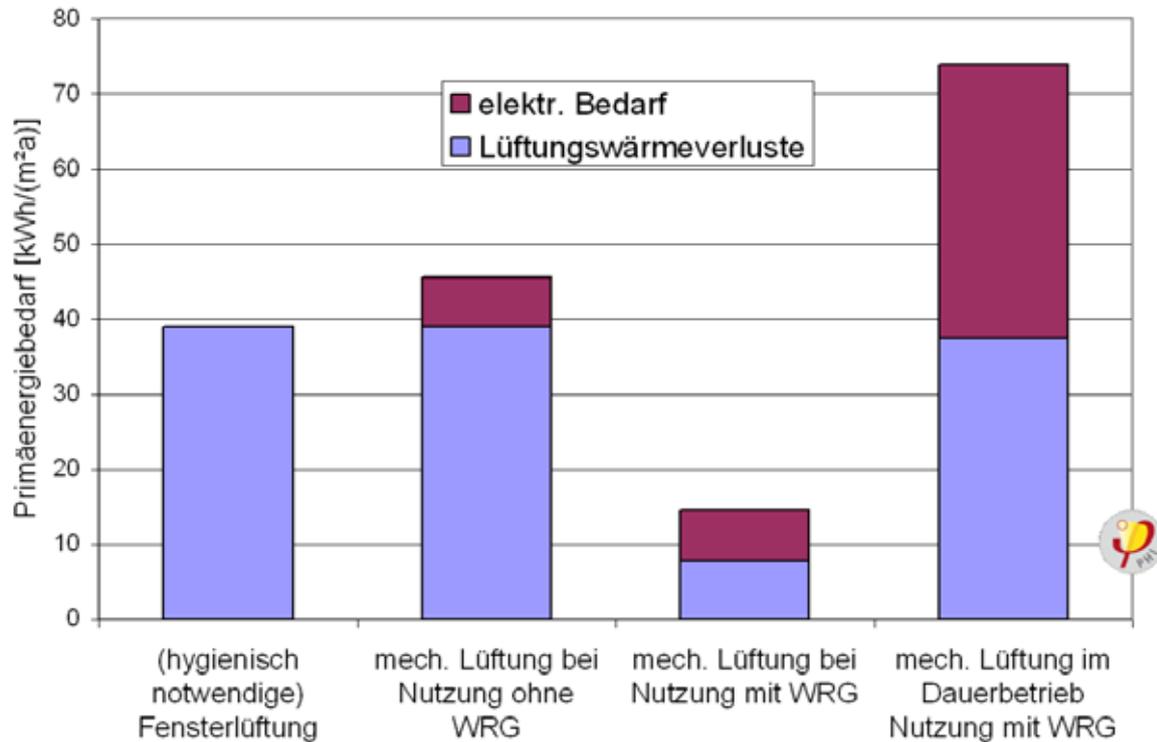


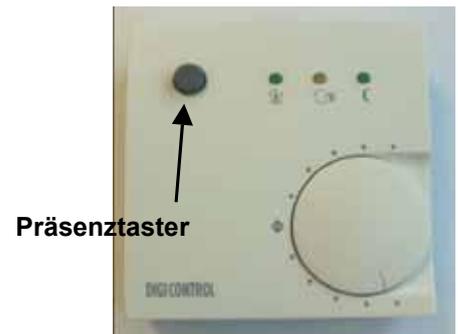
Abbildung 77: Flächengemittelter Primärenergiebedarf zur Deckung der Lüftungswärmeverluste zzgl. der erforderlichen Hilfsenergien in einer Schule. Der Lüftungsbetrieb muss an die Nutzungszeiten in Schulen und Kindertagesstätten angepasst werden. Ein Dauerbetrieb der Lüftung, wie im Wohnbau üblich, läuft bei diesen temporären Nutzungen den Anstrengungen zur Energieeinsparung zu wider (*Quelle: [AkkP 33]*).
 Annahmen: Außenvolumenstrom je Schüler 15 m³/h, Belegungsdichte 0.5 Personen / m² in Klassen, HNF / NGF = 75 %, Nutzung an Schultagen 7:00 bis 14:00 Uhr, Wärmebereitstellungsgrad 80 % der WRG.

Bei Schulsporthallen sollte zusätzlich ein Nachlauf vorgesehen werden, so dass die Feuchtelasten in den Duschen noch abgeführt werden können. Dies kann mit Zeitprogrammen oder einer feuchtegeführten Regelung gelöst werden.

In Schulen nimmt in der Regel die Belegung am Nachmittag ab. Ganztagsangebote werden z.B. nicht von allen Schülern gleichermaßen wahrgenommen. In diesen Fällen kann z.B. in der Kernschulzeit (z.B. von 8:00 bis 13:00 Uhr) die Lüftung in Betrieb sein. Am Nachmittag oder am Abend kann die Lüftung dann raumweise über Präsenztaster, ggf. in ausgewählten Räumen, aktiviert werden. Für diese Funktion müssen raumweise motorische Klappen in der Zu- und Abluft vorgesehen werden.

Abbildung 78: Außerhalb der eigentlichen Kernschulzeit kann die Laufzeit der Lüftung und die der Heizung durch einen Präsenztaster verlängert werden.

**Passivhaus-Schule Neckargemünd: Architektur: Donnig + Unterstab, Rastatt / Haustechnik: IWP GmbH, Stuttgart.
(Foto: IWP GmbH)**



Mit einer raumweise bedarfsabhängigen Regelung kann der Lüftungsbetrieb nochmals besser auf die Nutzung abgestimmt werden. Dies kann über genaue Zeitprogramme, Handschalter, Präsenzmelder, CO₂-Sensoren oder Feuchtfühler (in den Duschen von Sporthallen) erfolgen. In Schulen, Kindertagesstätten und Schulsporthallen sind in der Regel die Raumnutzungszeiten und die Personenanzahlen durch Stunden- und Belegungspläne hinreichend bekannt. Der Vorteil von Betriebsweisen nach der Luftqualität gegenüber Zeitprogrammen erscheint daher gering. Anders verhält es sich in größeren Räumen, mit unvorhersehbarer Belegung, wie z.B. Speisesäle, Aulen, Bibliotheken, Lehrerzimmern. Eine Regelung mit Hilfe von Luftqualitätsfühlern kann hier durchaus sinnvoll sein.

Im Sommer wird eine überwiegend natürliche Lüftung über öffentbare Fenster empfohlen. Die kontrollierte Lüftung kann im Sommer zur Nachtauskühlung des Gebäudes genutzt werden (vgl. Abschnitt 8.4).

Ein entscheidender Schritt ist die spätere Umsetzung des Regelungskonzepts. Die Festlegung der Betriebszeiten und anderer Parameter sollten nicht dem Servicetechniker überlassen werden, sondern sollten gemeinsam mit Hausverwalter und dem Servicetechniker abgestimmt werden.

Grundsätzlich sollten eher einfache Konzepte und eine einfache Bedienung angestrebt werden. Für die Nutzer sollte nachvollziehbar sein, zu welchen Tageszeiten und Jahreszeiten die kontrollierte Lüftung in Betrieb ist.

6.6 Küchen

Durch den Ausbau der Ganztagsbetreuung in Schulen und Kindertagesstätten steigt der Bedarf an Essensangeboten. Dabei ist die Bandbreite groß und reicht von der Catering-Lösung mit Anlieferung von warmem Essen bis zur vollwertigen Küche. Mit dem Umfang der Küchenausstattung nimmt schnell auch der haustechnische Aufwand zu, um potentielle Wärme- und Feuchtelasten abzuführen. In der Regel sind im Küchenbereich eigenständige Lüftungsanlagen erforderlich. Grundsätzlich sollte daher möglichst früh ein Küchenplaner in die Planung eingebunden werden. Wenn

die Art der Küche und das Speisenangebot bekannt sind, kann der Küchenplaner bedarfsgerecht Küchengeräte zusammenstellen. Das haustechnische Konzept kann anschließend auf diesen Bedarf abgestellt werden.

Leider ist dies nicht die gängige Praxis. Der spätere Betreiber steht häufig in der Planungsphase noch nicht fest. Die Lüftungstechnische Ausstattung wird entsprechend so geplant, dass spätere Nutzungen bis zur Vollküche möglich sind.

Bei der Zusammenstellung der Küchengeräte zahlt sich energiesparende Technik gleich mehrfach aus. Effiziente Küchengeräte sparen Energie und verringern in der Regel die internen Lasten und ggf. die Feuchtelasten, was zusätzlich zu kleiner dimensionierten Küchenlüftungen führen kann.

Eine Lüftungstechnische „Überdimensionierung“ sollte schon aus wirtschaftlichen Gründen vermieden werden. Darüber hinaus sind zu groß dimensionierte Küchenlüftungsanlagen durch die mit der Lüftung verbundenen erheblichen Lüftungswärmeverluste auch in energetischer Hinsicht kritisch.

Dabei ist es nicht so, dass die höheren Lüftungswärmeverluste durch die Küchengeräteabwärme ausgeglichen werden, denn die Zuluft muss bereits warm in die Küche eingebracht werden, um Zugerscheinungen bei dem Küchenpersonal zu vermeiden.

Im Folgenden werden exemplarisch drei Küchenlösungen vorgestellt. In der Küche einer Grundschule in Frankfurt-Riedberg (vgl. [Peper et al. 2007]) werden täglich ca. 450 Essen zubereitet. In der Küche werden komplette Mahlzeiten bereitet, wobei vorwiegend Gargeräte zum Einsatz kommen und eine mittlere Belastung durch Fettdünste auftritt.



Abbildung 79: Küche in einer Grundschule in Frankfurt (Riedberg). Küchenlüftung mit Wärmerückgewinnung.

Im Küchenbereich wird die Abluft über eine Kassettendecke abgeführt. Die Luftleistung liegt bei rund 6500 m³/h. Zur Vorerwärmung der Küchenzuluft wird die Abluft über eine Wärmerückgewinnung geführt. Filter und Fettkondensationsflächen schützen das Lüftungssystem vor Verunreinigung. Normalerweise ist es aber dennoch nicht möglich, mit Wärmetauschern zur Wärmerückgewinnung zu arbeiten, weil die Tauscherflächen rasch mit Fettablagerungen verunreinigt würden. Bei diesem Projekt wurde daher ein spezielles Zentralgerät mit Wärmerückgewinnungseinheit verwendet, welches die Tauscherfläche durch Abluft-/Fortluftseitiges Einsprühen mit Wasser und Tensiden selbsttätig regelmäßig reinigt. Im Betrieb kann mit der Wärmerückgewinnung der Heizbedarf für die Küchenzuluft um etwa 65 % verringert werden.

Tabelle 6: Überblick zu einer Küche einer Grundschule in Frankfurt (Riedberg)

Küchenart	Küche für Gemeinschaftsverpflegung
Anzahl der Mahlzeiten je Tag	ca. 450
Anschlussleistung der Küchengeräte	ca. 150 kW
Abluftbedarf	ca. 6500 m ³ /h
Verringerung des Heizbedarfs der Küchenzuluft gegenüber konventioneller Küchenlösung	ca. 65 %

In einer Kindertagesstätte in Frankfurt (Schwanheim) werden täglich etwa 84 Essen ausgegeben. Die Mahlzeiten werden in der Küche mit Gargeräten zubereitet, bei denen eher geringe Belastungen durch Fettdünste auftreten. Der Abluftbedarf im Kochbetrieb liegt bei 2000 m³/h. Bei der verwendeten Induktionsablufthaube wird der Großteil der Zuluft untemperiert direkt in den Haubenbereich eingebracht. Durch die Induktionswirkung der direkt eingeblasen Zuluft werden Raumluftbelastungen in den Haubenbereich hineingezogen und mit der Abluft abgeführt. Der Anteil der temperierten Küchenzuluft kann mit dem Küchenlüftungskonzept um 62 % verringert werden. Zu beachten ist bei dem Konzept, dass der Induktionshauben-Zuluftkanal kalt ist. Die Zuluftleitung muss daher fachgerecht wärmegeämmt sein (in diffusionsdichter Ausführung) und sollte möglichst kurz ausgelegt werden.


Abbildung 80: Küche einer Kindertagesstätte in Frankfurt (Schwanheim). Küchenlüftung mit Induktionshaube.

Tabelle 7: Überblick zu einer Küche einer Kindertagesstätte in Frankfurt (Schwanheim)

Küchenart	Küche für Gemeinschafts- verpflegung
Anzahl der Mahlzeiten je Tag	ca. 84
Anschlussleistung der Küchengeräte	ca. 33 kW
Abluftbedarf	ca. 2000 m ³ /h
Verringerung des Heizbedarfs der Küchenzuluft gegenüber konventioneller Küchenlösung	ca. 62 %

Zum Aufwärmen der Mahlzeiten ist die Küche einer Grund- und Hauptschule in Wiesbaden konzipiert. Die Mahlzeiten werden voraussichtlich gekühlt angeliefert und in der Küche aufgewärmt. Geplant ist die Bereitung von täglich ca. 80 Mahlzeiten. In kleinerem Umfang können auch komplette Mahlzeiten gekocht werden. Die Essen werden mit einem Dampfgarer erwärmt. Bei der Küchenplanung konnte durch Auswahl spezieller Geräte auf eine eigene Küchenlüftung verzichtet werden. Dabei werden im Wesentlichen die Feuchtelasten verringert. Der Heißluftdämpfer wird hierfür mit einer Kondensationshaube ausgerüstet (ein Abluftanschluss entfällt). Mittels einer Wärmerückgewinnung und einer Wärmepumpe im Geschirrspüler wird die Feuchtebelastung der Küche maßgeblich reduziert. Lediglich für die Bereitung von kleineren Mahlzeiten auf einem Kochfeld ist eine zusätzliche haushaltsübliche Dunstabzugshaube vorgesehen.

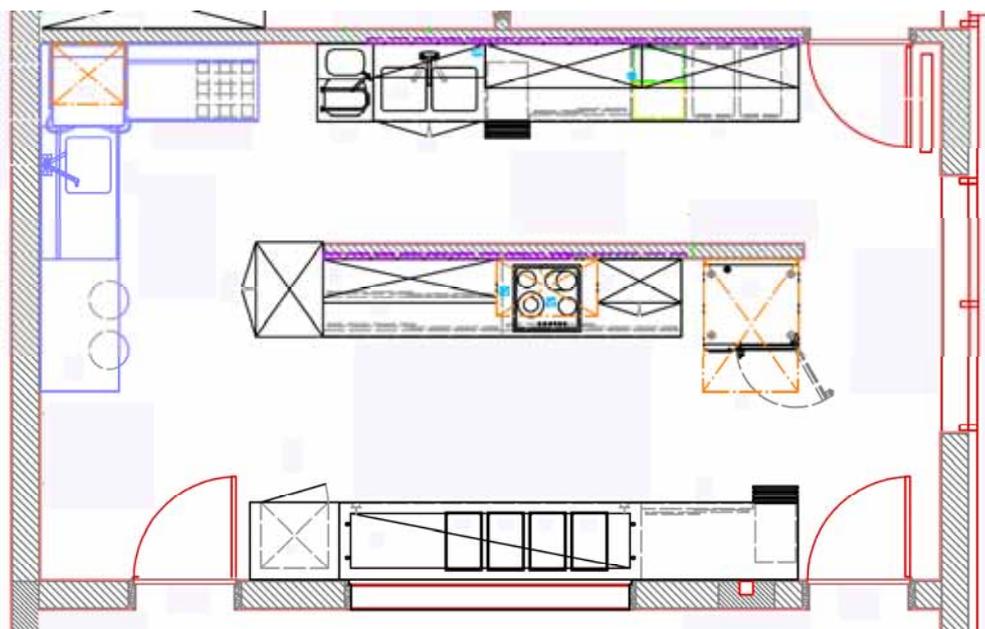


Abbildung 81: Küchenplan der Adalbert-Stifter-Schule (Wiesbaden). Küchenplaner: Lacher, Darmstadt, Architektur: Hügemeier + Thrun, Wiesbaden. Durch die Auswahl der Küchengeräte ist keine Küchenlüftung erforderlich

Tabelle 8: Überblick zu einer Schulküche in Wiesbaden. Durch eine spezielle Geräteauswahl kann auf eine eigene Küchenlüftung verzichtet werden.

Küchenart	Aufwärmküche
Anzahl der Mahlzeiten je Tag	ca. 80
Anschlussleistung der Küchengeräte	ca. 43 kW
Abluftbedarf	Keine Küchenlüftung / Haushalts-Dunstabzugshaube bei Nutzung von Kochfeld
Verringerung des Heizbedarfs der Küchenzuluft gegenüber konventioneller Küchenlösung	bis zu 100 %

6.7 Effiziente Lüftung in Kürze

Eine kontrollierte Lüftung sorgt in Bildungsgebäuden zuverlässig für eine gute Raumlufthqualität und verringert zudem bei Modernisierungen das Risiko für Schimmelpilzwachstum an bauphysikalisch kritischen Details (vgl. [AkkP 24]).

Für den Erfolg der kontrollierten Lüftung ist die energetische Qualität entscheidend. Das gelingt mit hocheffizienten Wärmeübertragern, strömungsoptimierten Kanalnetzen und effizienten Ventilatoren, so dass die zurückgewonnene Wärme das 10- bis 15-fache des Strombedarfs beträgt. Messungen belegen diese erzielbaren hohen Leistungszahlen (vgl. [Peper/Feist 2002], [Peper et al. 2007]).

Für die Akzeptanz der kontrollierten Lüftung bei den Nutzern ist eine leise Lüftung und eine zugfreie Einbringung der Zuluft in den Aufenthaltsbereich unentbehrlich. Eine Hocheffiziente Wärmerückgewinnung hebt die Zuluft auf Temperaturen nahe der Raumlufthtemperatur an und schafft damit eine wesentliche Voraussetzung für behagliche Bedingungen in dicht belegten Räumen.

Im Folgenden werden die Empfehlungen für eine energieeffiziente Komfortlüftung in Bildungsgebäuden nochmals in Kürze dargestellt.

Lüftungskonzept:

- Lüftungsanlage von Anfang an in der Planung mit berücksichtigen. Frühzeitige Abstimmung mit dem Raumprogramm und dem Brandschutzkonzept.
- Alle Räume in das Lüftungskonzept einbinden. Auch Verkehrsflächen, Nebenräume und Sanitäranlagen müssen in das Lüftungskonzept mit Wärmerückgewinnung eingebunden sein.
- Bei zentralen Lüftungskonzepten das Konzept der „gerichteten Durchströmung“ nutzen.

- Ausreichend Platz für das Lüftungsgerät vorsehen.
- Außen- und Fortluftkanäle sollten möglichst kurz und sehr gut gedämmt sein. Vor allem gilt dies bei dezentralen Lüftungskonzepten.
- Auslegung der Luftmengen nach der vorgesehenen Personenanzahl: Empfehlung für Schulen und Kindertagesstätten 15...20 m³/(h Person) und für Sporthallen 60 m³/(h Person).
- Kanalsystem auf geringen Druckverlust auslegen. Die Antriebsleistung des Ventilators ist proportional zur dritten Potenz des Druckverlusts. Der Druckverlust von Zuluft- bzw. Abluftstrang des Lüftungssystems sollte jeweils kleiner 200 Pa sein. Bei dezentralen Lüftungskonzepten sind deutlich geringere Druckverluste anzustreben.
- In den Aufenthaltsräumen von Schulen und Kindertagesstätten muss die Lüftung leise sein:
Der Schalldruckpegel sollte in den Aufenthaltsräumen ≤ 30 dB(A) sein, geringere Werte sind anzustreben (vor allem in Schlafräumen von Kindertagesstätten. Hier sind Schalldruckpegel vergleichbar dem Wohnbau unter 25 dB(A) empfehlenswert). Die schwedische Baurichtlinie BFS 2002 lässt in Unterrichtsräumen höchstens 30 dB(A) zu. Gemäß [EN 13779] sind 30 bis 40 dB(A) zulässig.
- Sommerbetrieb im Lüftungskonzept berücksichtigt: Im Sommer ist in der Regel eine Entlüftung der Sanitärbereiche während der Nutzung ausreichend; in den Aufenthaltsräumen kann über die Fenster gelüftet werden.
- Konzept zur sommerlichen Nachtlüftung. Möglichkeiten einer freien Nachtlüftung in warmen Sommerperioden sollten immer geprüft werden. Zumindest die mechanische Lüftung muss für eine Nachtlüftung ausgerüstet sein (Sommer-Bypass; vgl. Abschnitt 8.3).

Lüftungsgerät

- Effiziente Lüftungsgeräte einsetzen. Empfehlung für die elektrische Effizienz p_{el} (Leistungsaufnahme des Lüftungsgeräts inkl. Regelung bezogen auf den Zuluftvolumenstrom): 0,45 ... 0,30 (Zielwert) Wh/m³.
Zur Abschätzung dieses Werts kann die nach [EN 13779] definierte spezifische Ventilatorleistung herangezogen werden:
 $P_{SFP, Abluft} + P_{SFP, Zuluft}$
- Lüftungsgeräte mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung verwenden. Wärmebereitstellungsgrad $\eta_{WRG} \geq 75$ %. Zur Definition von η_{WRG} vgl. [AkkP 17]. Eine Liste von zertifizierten Zentralgeräten findet sich auf der Homepage des Passivhaus Instituts (www.passiv.de) unter dem Menüpunkt „Zertifizierung“.

- Geringe interne/externe Leckagen. Die Leckagen im Lüftungsgerät sollten $\leq 3\%$ sein.
- Wärmedämmung des Zentralgeräts (mindestens Klasse T2)
- Die Lüftung muss hygienisch sein: Das Lüftungsnetz ist immer trocken und daher bezüglich der Hygiene unproblematisch. Der Außenluftfilter kann allerdings kritisch sein, wenn die Lüftung in einem Zustand mit relativ hohem Feuchtegehalt im Außenluftfilter abgeschaltet wird. Maßnahmen gegen eine dauerhafte Durchfeuchtung vorsehen (vgl. Abschnitt 6.4.7).
- Außerhalb des Lüftungsbetriebs sollten Außen- und Fortluftkanäle durch geeignete Klappen verschlossen sein: Lüftungsklappen in diesen Kanälen sind für Filtertrocknungsstrategien ohnehin erforderlich. In der Regel sind die Klappen bereits im Zentralgerät integriert, energetisch besser ist eine Anordnung in der Dämmebene.
- Die Lüftungsanlage muss in Balance betrieben werden. Disbalance kann die Lüftungswärmeverluste erhöhen:
 - Vor Inbetriebnahme müssen die Zu- und Abluftvolumenströme von der ausführenden Firma eingeregelt werden.
 - Das Lüftungsgerät sollte über einen automatischen Balanceabgleich verfügen.

Betrieb / Regelung der Lüftung

- Der Lüftungsbetrieb muss auf die Nutzungszeiten begrenzt sein. Ein durchgängiger Lüftungsbetrieb ist aus energetischen Gründen ungeeignet (vgl. Abschnitt 6.5). In Grundschulen könnte das z.B. Montag bis Freitag von 8:00 bis 14:00 sein. Darüber hinaus kann der Betrieb durch eine bedarfsabhängige raumweise Regelung der Lüftung nochmals reduziert werden. Dies wird möglich durch:
 - genaue Zeitprogramme, Handschalter, Präsenzmelder oder CO₂-Sensoren
- Morgens vor Nutzungsbeginn sollte das Gebäude zunächst mittels der kontrollierten Lüftung vorgespült werden. Innenraumbelastungen, die sich über Nacht anreichern, werden auf diese Weise abgeführt. Luftvolumen ca. 2-fach austauschen (vgl. [EN 15251]). Im Interesse einer Reduzierung von Innenraumbelastungen, sollte besonderer Wert auf emissionsarme Baumaterialien und Produkte gelegt werden. Die Vorspülphase sollte bei Konzepten mit Zuluftheizung zum Aufheizen genutzt werden.
- Die Lüftungsanlage muss einfach zu bedienen sein. Im Falle von sonstigen Veranstaltungen und Elternabenden muss ein Eingriff durch das Schul- und Kindertagesstättenpersonal oder den Hausverwalter möglich sein.

7 Heizung

Auch in hocheffizienten Passivhaus-Bildungsgebäuden muss geheizt werden. Der Wärmebedarf zur Beheizung ist jedoch im Vergleich zu einem konventionellen Neubau um einen Faktor 4 bis 6 geringer und damit sehr niedrig. Im Vergleich zu Bestandsgebäuden ist der Heizwärmebedarf mit $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (typische Werte von Bestandsgebäuden liegen um $200 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) sogar verschwindend gering (vgl. Abbildung 4).

Im Unterschied zu Passivhaus-Wohnbauten ist bei den betrachteten Bildungsgebäuden ein Absenkbetrieb außerhalb der Nutzungszeiten geboten. Aufgrund des guten Wärmeschutzes sinkt die Raumtemperatur nur langsam ab. Im Passivhaus-Wohnbau stellen sich bei den gebräuchlichen kurzen Absenkezeiten nur geringe Heizwärmeeinsparungen ein. Der zusätzliche Aufwand für eine Nachtabsenkung bzw. –abschaltung wird daher als nicht sinnvoll angesehen (vgl. [Feist 2005]).

Da in Bildungsgebäuden hingegen längeren Absenkezeiten möglich sind, stellt sich hier eine relevante Heizwärmeeinsparung durch einen Absenkbetrieb ein. Die erforderlichen Heizleistungen sind durch die Wiederaufheizvorgänge zu Nutzungsbeginn im Vergleich zum Passivhaus-Wohnbau (ohne Absenkbetrieb) höher. Zur Auslegung der Heizleistung muss entsprechend auch eine dynamische Aufheizlast berücksichtigt werden.

In hocheffizienten Bildungsgebäuden können alle gebräuchlichen Wärmeübergabelösungen (wie z.B. Heizkörper) verwendet werden. Zusätzlich ist, mit Erfüllung der Passivhaus-Kriterien (vgl. Abschnitt 10), eine Beheizung durch eine Nacherwärmung der hygienisch erforderlichen Zuluftmengen möglich.

Mit dem hochwertigen Wärmeschutz kann das Heizungssystem in der Regel vereinfacht werden: Kleinere Heizkörper, eine freie Anordnung der Heizkörper oder sogar ein Verzicht auf Heizkörper und Verteilleitungen können zu Minderinvestitionen führen. Vergleichbares gilt für die Heizungsregelung. Es sollte kritisch geprüft werden, was tatsächlich noch erforderlich ist, kann z.B. auf eine Einzelraumregelung verzichtet werden? Eine Alternative bei Heizkörpern können Thermostatventile mit festem Einstellbereich sein (sogenannte Behördenmodelle).

7.1 Beheizung

Mit einem sehr guten Wärmeschutz nimmt die Vielfalt der möglichen Beheizungslösungen zu, die Bedeutung der Beheizungsart hingegen ab. Werden die Passivhaus-Anforderungen eingehalten, dann ist – wie oben erwähnt - auch eine Beheizung mit dem Lüftungssystem möglich. Bei Neubauten können sich mit einer

Beheizung durch eine Nacherwärmung der Zuluft Kostenvorteile ergeben. Bei Modernisierungen sollte zunächst geprüft werden, ob das vorhandene Wärmeverteilnetz noch verwendbar ist. Zudem ist bei Modernisierungen eine wärmebrückenarme Ausführung der Gebäudehülle im Gründungsbereich vielfach sehr aufwendig und baupraktisch kaum umsetzbar. Dies kann zu erhöhten Heizlasten in den angrenzenden Räumen führen, die nicht mehr über eine Zuluftheizung gedeckt werden können. Bei Modernisierungen sollte daher in der Regel eine Beheizung über statische Heizflächen gewählt werden, es sei denn, die Passivhaus-Anforderungen werden im modernisierten Zustand erfüllt und Wärmebrücken können weitestgehend entschärft werden.

Bedeutung der Fensterqualität

Erst mit thermisch hochwertigen „passivhaus-geeigneten“ Fenstern verliert die Anordnung von Heizflächen und die Art der Beheizung für den Komfort im Raum an Bedeutung. Abbildung 82 zeigt den Kaltluftabfall an den Fassaden in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangskoeffizienten des Fensters. Bei Fenster-Wärmedurchgangskoeffizienten unter $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und Fensterhöhen bis 2 m bleiben demnach die Luftgeschwindigkeiten an der Fassade im komfortablen Bereich. Heizkörper unter oder vor den Fenstern sind bei den empfohlenen Qualitäten nicht mehr erforderlich. Im Abschnitt 5.2 wurde das Thema Fenster im Detail behandelt.

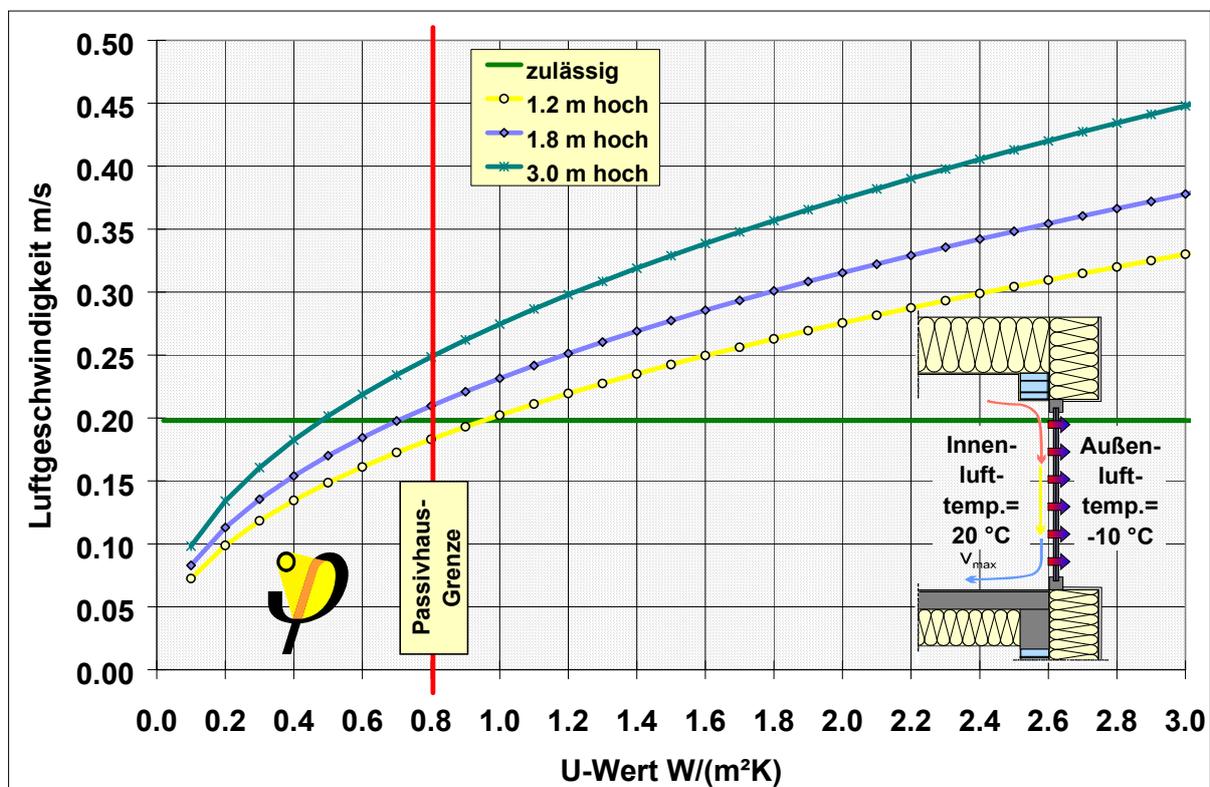


Abbildung 82: Mittlere Geschwindigkeit des am Fenster abfallenden Kaltluftstroms in Abhängigkeit von U_w . (Quelle: [AkkP 14])

Zuluftheizung

Die Grundidee der Zuluftheizung im Passivhaus-Wohnbau ist eine Verringerung der Investitionskosten durch ein angepasstes, vereinfachtes Heizungssystem. Bei Schulen und Kindertagesstätten stellt sich dieser Kostenvorteil in der Regel nur ein, wenn eine Raumgruppe gemeinsam durch ein Nachheizregister versorgt werden kann. Räume mit vergleichbaren Lastprofilen (gleiche Orientierung, vergleichbare Wärmeverluste und Nutzung) können dann zu einer Raumgruppe zusammengefasst werden. Bibliotheken, Aulen oder Lehrerzimmer unterscheiden sich hierin z.B. von Unterrichtsräumen.

Bei Schulen und Kindertagesstätten zeigt sich in der Praxis, dass regelmäßig mehrere Raumgruppen gebildet werden müssten und der Investitionskostenvorteil gegenüber einer Beheizung mit raumweisen statischen Heizflächen nicht mehr maßgeblich ist, solange auch bei der Heizflächenlösung Vereinfachungen genutzt werden.

Bei Schulsporthallen hingegen bietet sich aufgrund des einfachen und überschaubaren Raumprogramms eine Beheizung der Halle über die Zuluft an (vgl. Abschnitt 7.2). Z.B. konnten bei einer Passivhaus-Einfachsporthalle in Reichelsheim die Investitionsmehrkosten der kontrollierten Lüftung für die gesamte Sporthalle durch Minderkosten bei der Beheizung gedeckt werden. Anstatt einer zunächst kalkulierten Fußbodenheizung wird der Hallenbereich nun über eine Zuluftheizung beheizt. In den Nebenräumen wäre eine Lüftung ohnehin erforderlich gewesen (basierend auf Kostenangaben von IB Bachmann, Bad Hersfeld).

Die Zuluftheizung von beispielsweise mehreren Unterrichts- oder Gruppenräumen über ein gemeinsames Nachheizregister kann bei unterschiedlicher Belegung auf Solltemperaturabweichungen bis etwa 2 K führen. Thermisch zugängliche Masse in den Räumen und eine gute thermische Kopplung zwischen den Räumen verbessern die Regelungseigenschaften einer Raumgruppe. Die Beheizung aller Räume einer Raumgruppe sollte nach einer mittleren Raumtemperatur der Raumgruppe oder aber nach jeweils dem Raum mit der geringsten Raumtemperatur geregelt werden (vgl. [Kah 2006]).

Eine Beheizung über eine Zuluftnachheizung sollte nur dann gewählt werden, wenn sinnvolle Raumgruppen gebildet werden können und sich gegenüber einer Lösung mit Heizflächen auch tatsächlich ein Investitionskostenvorteil ergibt. Die zonenweise Beheizung muss mit dem Bauherrn abgestimmt werden.

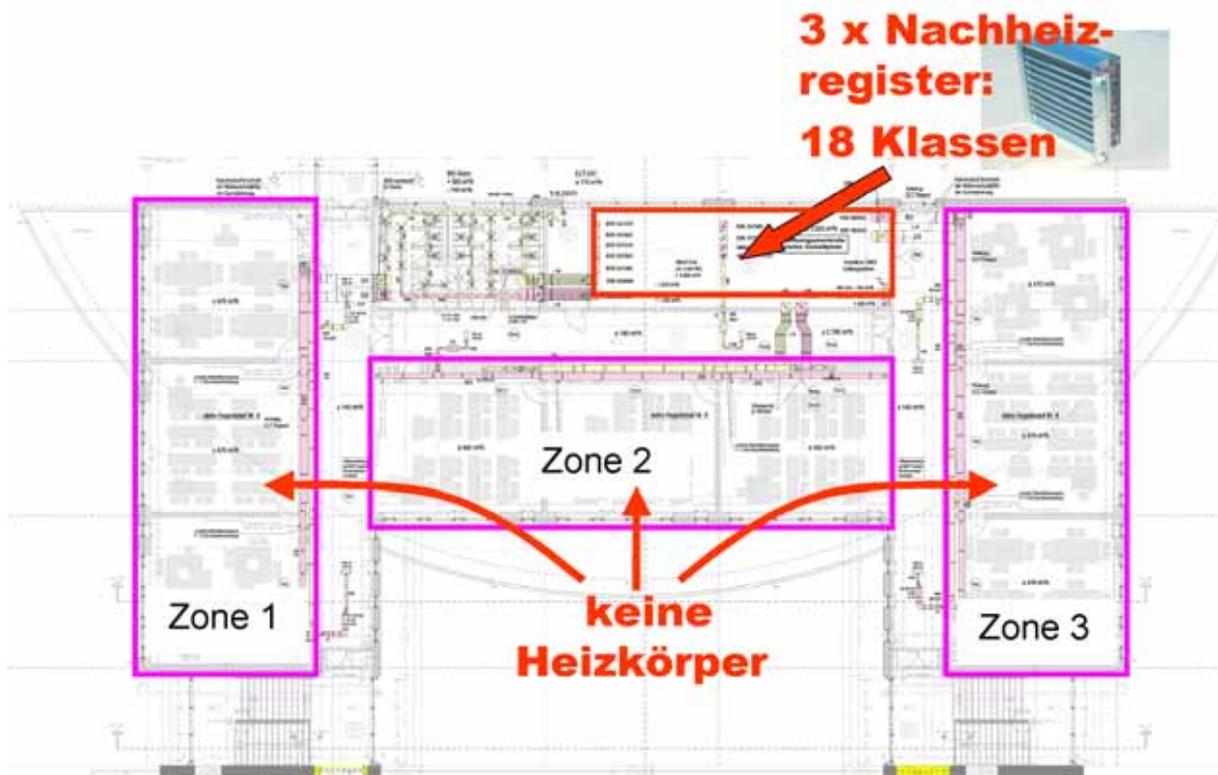


Abbildung 83: Passivhaus-Schule mit Zuluftnachheizung (Albert-Schweitzer-Schule, Alsfeld). Darstellung der Zonierung zur Beheizung. Der Restheizwärmebedarf der 18 Unterrichtsräume wird von drei in der Lüftungszentrale angeordneten Heizregistern gedeckt (*Quelle [AkkP 33]*).
Architektur: BLFP, Friedberg / Haustechnik: Neuplan, Gießen.

Wie oben erwähnt, wird im Unterschied zur Wohnnutzung bei Bildungsgebäuden ein Heizungsabsenkbetrieb empfohlen. Im Falle einer Beheizung über eine Nacherwärmung der Zuluft sollte die Wiederaufheizung im Rahmen der ohnehin erforderlichen Vorspülung der Innenräume vor Nutzungsbeginn erfolgen (im Rahmen einer Vorspülphase wird empfohlen die Raumluft ca. 2-fach auszutauschen; vgl. Abschnitt Lüftung 6.5). Zur Wiederaufheizung sollte die Zuluft maximal erwärmt werden (bis auf ca. 50 °C), um genügend Heizleistung in der kurzen Vorspülphase in die Räume zu transportieren. Lang ausgedehnte Aufheizphasen, welche den hygienisch erforderlichen Betrieb der Lüftungsanlagen übersteigen, würden den Gesamtprimärenergiebedarf aufgrund des zusätzlichen Bedarfs an Antriebsenergien empfindlich erhöhen.

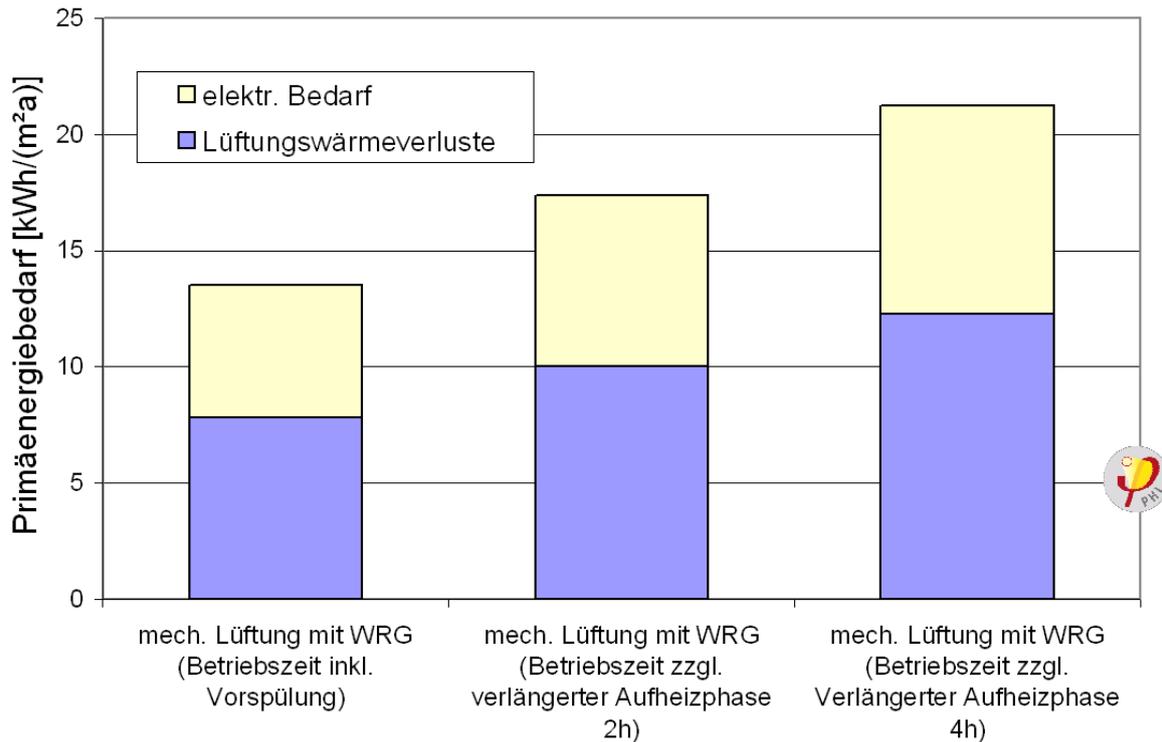


Abbildung 84: Flächengemittelter Primärenergiebedarf für die Belüftung einer Schule. Wird zur Aufheizung der Lüftungsbetrieb über die hygienisch erforderliche Betriebszeit (inkl. Vorspülung) ausgedehnt, kann sich der Primärenergiebedarf empfindlich erhöhen. Die Wiederaufheizung nach einer Nachtabsenkung sollte bei einer Zuluftheizung immer innerhalb der Vorspülphase möglich sein. (Quelle: PHI)

Annahmen: Außenvolumenstrom je Schüler 15 m³/h, Belegungsdichte 0.5 Personen / m² in Klassen, HNF / NGF = 75 %, Nutzung an Schultagen 7:00 bis 14:00 Uhr, Wärmebereitstellungsgrad der WRG 80 %.

Die Nachheizregister bei einer Zuluftheizung müssen daher mit ausreichend großer Leistung für diesen Temperaturhub dimensioniert werden. Je m³/h Volumenstrom muss das Nachheizregister ca. 10 W an Leistung übertragen können (bei 1000 m³/h also 10 kW).

Bei einer Beheizung über statische Heizflächen kann die Aufheizdauer auch länger andauern, da in diesem Fall Heizen und Lüften entkoppelt sind.

Beheizung über statische Heizflächen

Mit einem hocheffizienten Wärmeschutz ergeben sich auch bei Beheizung über statische Heizflächen mögliche Vereinfachungen. Zunächst können gegenüber konventionellen Gebäuden aufgrund der geringeren Heizlasten kleinere Heizflächen eingesetzt werden. Darüber hinaus spielt die Art der Heizfläche und die Anordnung keine große Rolle mehr. Durch die gute thermische Qualität sind vor und unter den Fenstern keinen Heizkörper mehr erforderlich.

Die Wahl der Heizfläche und deren Anordnung kann anderen Prinzipien folgen, z.B.:

- Das Wärmeverteilnetz kann durch gezielte Anordnung der Heizflächen möglichst kompakt und kostengünstig umgesetzt werden (auch Anordnung im Innenwandbereich möglich).
- Wo stört die Heizfläche möglichst wenig, bzw. wo kann diese gezielt genutzt werden? In Kindertagesstätten beispielsweise können Heizkörper außerhalb des Aufenthaltsbereichs der Kinder angeordnet werden, um die Verletzungsgefahr zu minimieren.



Abbildung 85: Anordnung der Heizkörper in einer Passivhaus-Kindertagesstätte (Goldstein) in Frankfurt. Die Anordnung der Heizfläche spielt keine große Rolle für deren Funktion. Weitere praktische Abwägungen können bei der Entscheidung in den Vordergrund treten.

Architektur: AS&P, Frankfurt / Haustechnik: IB Schlosser, Oberursel

In Sporthallen und Kindertagesstätten werden gerne Fußbodenheizungen eingesetzt. Mit den geringeren Laufzeiten der Fußbodenheizung bei sehr gutem Wärmeschutz verliert der Nebeneffekt „Bodenwarmhalten“ an Bedeutung (vgl. [SIA D090]). Mit fußwarmen Bodenbelägen und gut gedämmten Bodenplatten kann in der Regel eine vergleichbare Behaglichkeit erreicht werden. Die Heizung ist vor allem am Vormittag zum Aufheizen in Betrieb. Aufgrund der geringen Vorlauftemperaturen von Fußboden- oder Wandflächenheizung kann hingegen eine Kombination mit Wärmepumpen sinnvoll sein. Die Effizienz von Wärmepumpen hängt maßgeblich von der Vorlauftemperatur ab.



Abbildung 86: Beheizung über Heizkörper im Schul-Pavillon Walldorf (Foto links).
Architektur: IB W. Herrmann, Walldorf / **Haustechnik:** Gadow + Graeske, Walldorf.
Anordnung der Heizkörper an angrenzender Innenwand mit kompakten Verteilnetzen (Foto rechts) in einer Passivhaus Kindertagesstätte (Ginsterhöhe) in Frankfurt.
Architektur: ppplanung architekten, Wiesbaden / **Haustechnik:** Planungsbüro Donath, Neu-Isenburg

7.2 Beheizungs Sonderfall: Sporthalle

Erfahrungen bei früheren Sporthallen-Projekten mit geringem Wärmeschutz zeigten Probleme bei der Luftheizung in Hallen. Kritisch war bei diesen Projekten z.T. die bei der Beheizungsart beobachteten ausgeprägten Temperaturschichtungen in der Halle und der hohe Strombedarf der Lüftung. Bei Hallen mit konventionellem Wärmeschutz ist ein hoher Luftwechsel (mindestens 2-fach) zur Einbringung der erforderlichen Heizleistung notwendig. Ältere Sporthallen mit Luftheizung gelten daher häufig als ‚Stromfresser‘ und ‚Energieschleudern‘. Der zur Beheizung erforderliche Luftwechsel im Sportbetrieb liegt deutlich über den hygienisch erforderlichen Werten. Bei Sporthallen im Passivhaus-Standard hingegen kann bereits durch eine Nacherwärmung der hygienisch erforderlichen Luftmengen die Heizlast gedeckt werden.

Im Folgenden wird daher zunächst die Frage der Temperaturschichtung in Sporthallen bei sehr gutem Wärmeschutz untersucht.

Temperaturverteilung im Hallenbereich

Sporthallen haben in der Regel Raumhöhen von mindestens 5,5 m in Einfachsporthallen und 7 m in Dreifachturnhallen (vgl. [DIN 18032-1]). Dabei kann die Konvektion im Hallenbereich zu unerwünschten Temperaturschichtungen führen, wobei sich Wärmepolster unter der Decke bilden, während der eigentliche Aufenthaltsbereich nur mäßig temperiert ist. In konventionellen Hallen treten dabei Temperaturzunahmen um 1 K je Meter Höhe auf (vgl. [ea-nrw 2003]). Diese Wärmepolster führen in Sporthallen zu erhöhten Transmissionswärmeverlusten im Dachbereich. Daher werden in der Literatur für Hallen spezielle Maßnahmen empfohlen, welche der natürlichen Temperaturschichtung entgegenwirken: Deckenstrahlheizungen, Fußbodenheizungen oder Deckenventilatoren (vgl. [Radtke 1997], [Himmelsbach 2005], [ea-nrw 2003]).

Messungen in einer Passivhaus-Sporthalle mit Luftheizung (vgl. [Pfletscher/Kah 2004]) deuteten hingegen darauf hin, dass sich aufgrund des verbesserten Wärmeschutzes eine sehr gleichmäßige Temperaturverteilung einstellt. Dieses Ergebnis konnte mit CFD-Simulationen (vgl. [FLUENT]) bestätigt werden (vgl. Abbildung 87 und Abbildung 88). Bei einer Hallenhöhe von 6 m wurden max. Temperaturunterschiede von 2 K berechnet (d.h. Temperaturgradienten unter 0,33 K/m). Dabei erfolgte die Beheizung durch eine Nacherwärmung der hygienisch erforderlichen Luftmenge. Für eine Variante mit konventionellem Wärmeschutz hingegen ergaben sich mit 1 K/m deutlich höhere vertikale Temperaturgradienten.

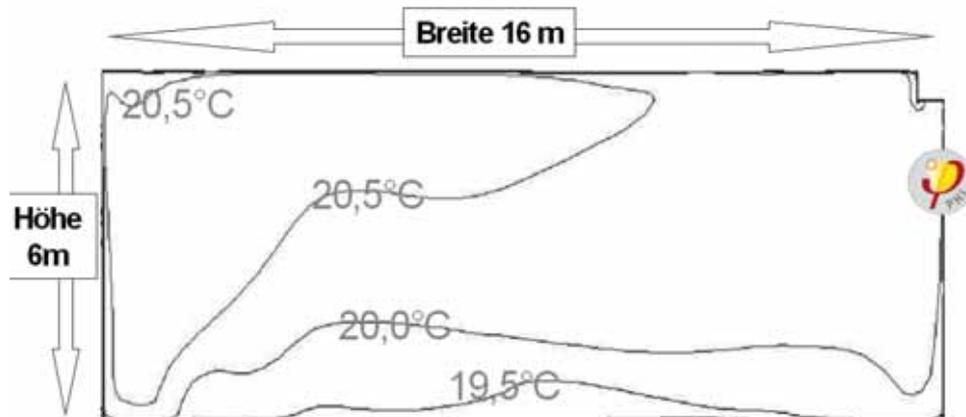


Abbildung 87: Vertikalschnitt durch eine Einfachsporthalle, welche über die Zuluft beheizt wird. Dargestellt sind die Linien gleicher Temperatur für eine Halle mit hochwärmegedämmter Gebäudehülle. In der Passivhaus-Sporthalle stellt sich eine sehr gleichmäßige Temperaturverteilung ein.
Annahme: Außentemperatur 0 °C, Beheizung über die Zuluft von links oben.
(Quelle: PHI)

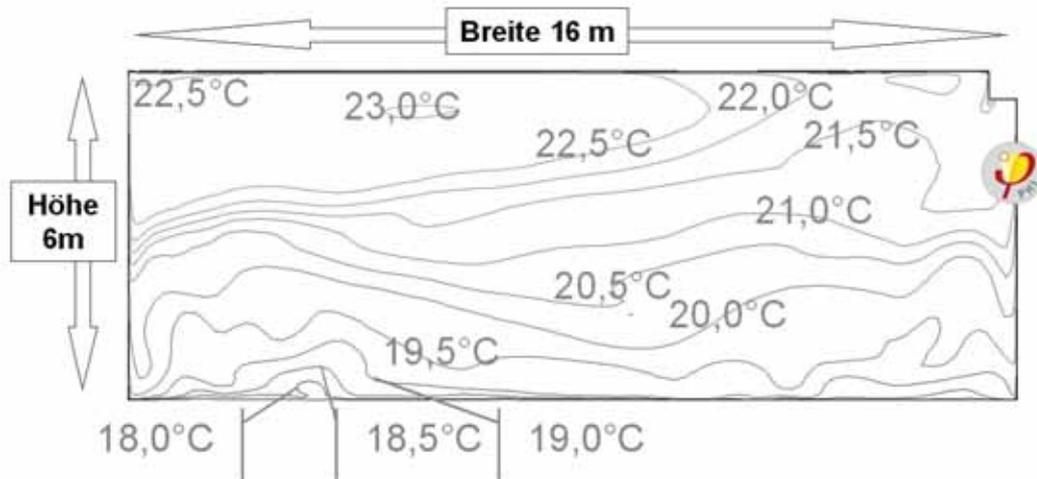


Abbildung 88: Vertikalschnitt durch eine Einfachsporthalle, welche über die Zuluft beheizt wird. Dargestellt sind die Linien gleicher Temperatur für eine konventionell gedämmte Gebäudehülle. Die Raumtemperatur steigt um nahezu ein 1 K/m von unten nach oben..
Annahme: Außentemperatur 0 °C, Beheizung über die Zuluft von links oben.
(Quelle: PHI)

Zur Absicherung der CFD-Berechnungen wurden zusätzlich Temperatur-Messungen in einer Passivhaus-Sporthalle durchgeführt. Neben der Messung mit Temperatursensoren konnte das Temperaturprofil außerdem mit Hilfe von IR-Aufnahmen von Papierstreifen visualisiert werden (vgl. Abbildung 89 und Abbildung 90). Auch die Messkampagne in der Passivhaus-Sporthalle zeigte nur geringste Temperaturunterschiede im Hallenbereich und bestätigt somit die CFD-Simulation.



Abbildung 89: Messaufbau in der Passivhaus-Sporthalle. Zur Visualisierung der Lufttemperatur im Hallenschnitt wurden Papierstreifen in der Halle aufgehängt und thermographiert. In der Ebene der Papierstreifen wurden zusätzlich Temperatursensoren aufgehängt.

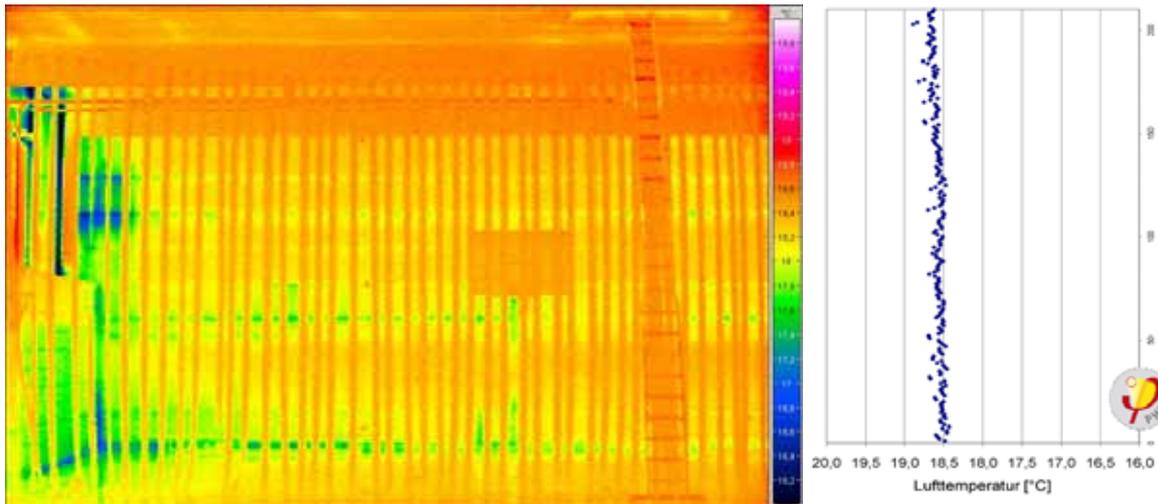


Abbildung 90: Temperaturverteilung im Hallenquerschnitt hier anhand der Temperaturen auf den WC-Papierstreifen (IR-Aufnahme). Im Hallenquerschnitt ist nahezu keine Temperaturschichtung erkennbar. Die Außentemperatur lag im Mittel, wie auch bei den CFD-Simulationen, bei 0 °C. (Quelle: PHI)

Die sehr gleichmäßige Temperaturverteilung besteht jedoch nur unter einer Einschränkung. Zum Aufheizen der Sporthalle nach einer Nachtabsenkung sind auch in hochwärmegedämmten Hallen höhere Heizleistungen erforderlich, welche in diesem Zeitraum zu einer größeren Temperaturschichtung führen (vgl. Abbildung 91). Nach dem Aufheizvorgang baut sich die Schichtung jedoch schnell wieder ab. Aufgrund der geringen Zeitspanne der Wiederaufheizung und der eher geringen Temperaturunterschiede können erhöhte Transmissionswärmeverluste im Dachbereich vernachlässigt werden.

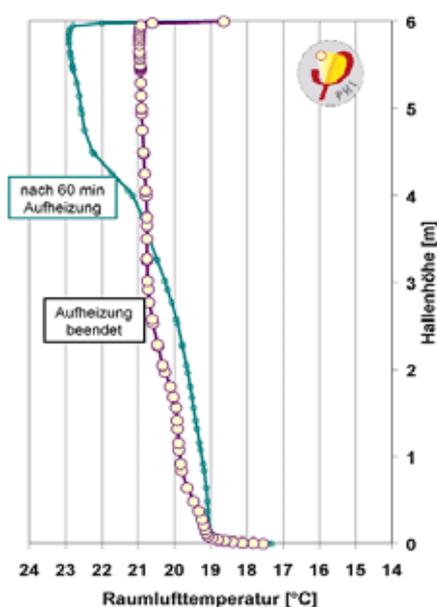


Abbildung 91: Temperaturschichtung in einer hochwärmegedämmten Sporthalle (Höhe 6 m, CFD-Berechnung) nach einer Stunde Aufheizung und nach Beendigung des Aufheizvorgangs. Mit dem Ende des Aufheizvorgangs baut sich die Schichtung rasch wieder ab. (Quelle: PHI)

Annahme: Außentemperatur 0 °C, Beheizung über die Zuluft

Beheizung in Sporthallen

Im Unterschied zu einer Ausführung mit konventionellem Wärmeschutz zeigt sich, dass die Art der Beheizung auch bei hochwärmegedämmten Sporthallen keine große Rolle spielt. Mit einer Nacherwärmung der hygienisch erforderlichen Luftmengen kann der Hallenbereich beheizt und wiederaufgeheizt werden. Die Temperaturschichtung bleibt auch mit dem Konzept der Zuluftheizung bei sehr gutem Wärmeschutz gering.

Tabelle 9: Annahmen zur Zuluftheizung im Hallenbereich

Vorspüldauer / Aufheizdauer	2-facher Luftaustausch / 2 h Vorspüldauer
Zuluftstrom in Einfachturnhalle (30 Sportler)	30 x 60 m ³ /h = 1.800 m ³ /h
max. Temperaturhub ΔT / max. Heizleistung	30 K / ca. 33 W/(m ² Hallenfläche)

Wie im Abschnitt 6.4.4 dargestellt, bietet sich bei Sporthallen eine kombinierte Be- und Entlüftung von Halle und Nebenräumen an. Bei diesem Konzept wird die Zuluft im Hallenbereich eingebracht und strömt anschließend in den Nebenraumbereich über. Aufgrund der höheren Temperaturanforderungen in den Duschen und Umkleiden muss die einströmende Luft in diesem Bereich zunächst erwärmt werden. Dies kann z.B. durch ein Heizregister in dem entsprechenden Kanalabschnitt oder durch eine geeignete Anordnung eines Heizkörpers vor der Einströmöffnung erfolgen (vgl.



Abbildung 68).

7.3 Trinkwarmwasser-Versorgung

Trinkwarmwasser in Bildungsgebäuden ist in der Regel nur für Küchen, Duschen, Waschräume und die Gebäudereinigung vorzuhalten. Wesentlich für eine effiziente Warmwasserversorgung in Schulen und Kindertagesstätten sind geringe Verluste der Wärmeverteilung. Bei zentraler Warmwasserbereitung sollte durch die Raumorganisation auf kompakte und gut gedämmte Verteilnetze (Dämmstärke

2 x DN) hingewirkt werden. Dies führt im Übrigen auch zu einer erhöhten Sicherheit gegenüber Legionellen-Befall. In Schulen kann z.B. die Warmwasserentnahme auf die tatsächlich erforderlichen Bereiche begrenzt werden (an Handwaschbecken in WC's und in den Unterrichtsräumen ist in der Regel kein warmes Wasser erforderlich). Liegen die Entnahmestellen über das gesamte Gebäude verteilt, sollte eine dezentrale Warmwasserversorgung geprüft werden. Kleinst-Durchlauferhitzer sind elektrischen Untertischgeräten vorzuziehen.

Im Unterschied zu Schulen wird in Kindertagesstätten häufig auch in den Sanitärbereichen warmes Wasser gewünscht. Selbstschlussarmaturen können hier den Warmwasserbedarf erheblich verringern.

In Sporthallen ist der Warmwasserbedarf im Vergleich zu Schulen und Kindertagesstätten dominanter. Auch hier können kompakte, gut gedämmte Verteilnetze die Verteilverluste verringern. Darüber hinaus bietet die Wasserentnahme ein großes Potential. In der Regel sind dies einfache und kostengünstige Maßnahmen, wie wassersparende Armaturen an Handwaschbecken und Duschen. Der konkrete Einsatz von Durchflussbegrenzern, Thermostatarmaturen und Selbstschlussarmaturen sollte anhand der Gegebenheiten entschieden werden.

Warmwasserspeicher verlieren trotz guter Dämmung permanent Wärme, die durch das Heizsystem nachgeführt werden muss. Je größer der Speicher, desto bedeutender die Verluste. Häufig werden die Warmwasserspeicher ungeachtet dieser Verluste überdimensioniert. Eine im Vorfeld durchgeführte Wasserverbrauchsmessung z.B. bei Modernisierungen oder Messwerte aus vergleichbaren Gebäuden kann für die Auslegung einer neuen Wasserversorgung herangezogen werden. Die Warmwasserspeicher sollten möglichst nah an den Entnahmestellen angeordnet werden um Verteilverluste zu minimieren. Bei langen Versorgungsleitungen zum Warmwasserspeicher sollte eine separate Beheizung bzw. eine eigenständige Wassererwärmungsanlage geprüft werden.

Mit sogenannten Frischwasserstationen kann die vorgehaltende Trinkwarmwassermenge stark verringert werden. Im Durchlaufprinzip wird Trinkwarmwasser im Falle einer Zapfung erwärmt. Dies kann insbesondere zur Legionellenprophylaxe genutzt werden. Bei Sporthallen sollte der Einsatz thermischer Solarkollektoren geprüft werden. Auch hier kann eine im Voraus durchgeführte Wasserverbrauchsmessung bei der bedarfsorientierten Auslegung der Solaranlage hilfreich sein, um auch hier eine Überdimensionierung zu vermeiden.

7.4 Wärmeversorgung

Der geringe Wärmebedarf von hocheffizienten Passivhaus-Bildungsgebäuden kann mit allen gängigen Wärmeversorgungs­lösungen gedeckt werden. Neben konventionellen Heizlösungen auf Basis von Gas oder Öl ist die Versorgung mit erneuerbaren Energien besonders interessant.

Eine Wärmeversorgung auf Basis von erneuerbaren Energien und eine effiziente Energienutzung sind keine sich gegenseitig ausschließenden Alternativen, sondern gewinnen in der Kombination. Auch erneuerbare Energien sind in der Regel nur begrenzt verfügbar (wie z.B. Biomasse). Sie werden erst dann eine bedeutende Rolle im Gebäudeenergiemix einnehmen können, wenn zunächst eine effiziente Energienutzung erfolgt. Dabei ergeben sich noch weitere Vorteile. Beispielsweise können Bevorratungsvolumina für Holz oder Holzpellets bei verbesserter Effizienz kleiner dimensioniert werden.

Weiterhin bietet der hochwertige Wärmeschutz gute Voraussetzungen für die Versorgung mit Umweltwärme. Die Effizienz von Wärmepumpen hängt maßgeblich von der Vorlauf­temperatur ab. Mit dem guten Wärmeschutz sind kleinere Flächenheizungen (ggf. nur Teilflächen) mit geringen Übertemperaturen ausreichend.

Im Unterschied zum Passivhaus-Wohnbau wird für die hier betrachteten Nutzungen eine Nachtabsenkung empfohlen. Bei der Dimensionierung der Wärmeversorgung muss daher die zusätzliche Aufheizlast berücksichtigt werden.

Häufig bietet die Heizanlage in einem Bestandsgebäude ausreichend Leistungsreserve, um noch ein neues hocheffizientes Erweiterungsgebäude am selben Standort mitzuversorgen. Bei den geringen Wärmeabnahmen – Gebäude mit Passivhaus-Standard verbrauchen nur noch rund ein Zehntel der Heizenergie von entsprechenden Bestandsgebäuden – kann der Wärmeverlust der Nahwärmeleitungen bezogen auf die Wärmeabnahme des Erweiterungsgebäude unverhältnismäßig hoch ausfallen. Bei konventionellen erdverlegten Nahwärmeleitungen kann der anteilige Wärmeverlust leicht 30 % der Nutzwärmeabnahme erreichen (Annahme: 50 m Anbindelänge, Versorgung einer Passivhaus-Sporthalle, nur Winterbetrieb). Neben der Optimierung des Erweiterungsgebäudes darf in diesen Fällen die Nahwärmeversorgungsleitung nicht vergessen werden. Es sollten daher kompakte, gut gedämmte Versorgungsleitungen angestrebt werden und die Wärmeleitungen sollten nach Möglichkeit innerhalb von Gebäuden geführt werden. Anfallende Verteilverluste sind bei Verlegung im beheizten Gebäude noch teilweise nutzbar. Weiterhin können die Wärmeverluste von erdverlegten Versorgungsleitungen durch spezielle Sandbettungen im Versorgungsgraben verringert werden (z.B. Produkt Thermosand, Fa. Ke Kelit). Eine Versorgung im Sommer über längere erdverlegte Nahwärmeleitungen sollte vermieden werden.

Abbildung 92: Passivhaus-Einfachsporthalle in Heidelberg. Der geringe Heizwärmebedarf der Halle konnte hier über die Leistungsreserven der Heizzentrale in der Bestandschule gedeckt werden, wodurch beträchtliche Kosteneinsparungen realisiert werden konnten.

Architekt: ap88, Heidelberg / Haustechnik: Planungsbüro Schmitt & Partner, Mauer



Ist eine schrittweise Durchführung von Modernisierungsmaßnahmen geplant (vgl. [AkkP 39]), sinkt die Heizlast mit jeder Wärmeschutzmaßnahme. Bei der Erneuerung der Wärmeversorgung sollte daher bereits der abschließende Zustand, nach Durchführung aller Maßnahmen, mit betrachtet werden. Der Wärmeversorger muss dann auch das komplett modernisierte Gebäude effizient beheizen können. Während Bestandsgebäude Heizlasten von 100 bis 180 W/m² aufweisen, können die Lasten bei Modernisierungen mit Passivhaus-Komponenten in den Bereich von 10 bis 30 W/m² sinken.

7.5 Verteilverluste sowie Heizungs- und Zirkulationspumpen

Grundsätzlich sollten Wärmeverteilungen in Neubauten nicht in unbeheizten Räumen verlegt werden. Wenn dies unvermeidbar ist (wie z.B. im Bestand), sollten die Leitungen dort so kurz wie möglich sein. Wirtschaftliche Dämmstärken von Verteilleitungen, die nicht im beheizten Bereich verlaufen, liegen bei mindestens 2 DN (vgl. [Kah et al. 2008]). Es ist wichtig, dass die Rohrhalterungen nicht auf dem Rohr selbst, sondern auf der Dämmschale angebracht werden und dass Armaturen, Abzweigungen etc. ebenfalls mitgedämmt werden.

Warmes Trinkwasser führende Leitungen und Zirkulationsleitungen sollten auch in beheizten Räumen mit mindestens 2 DN gedämmt werden. Im Sommer verringern gut gedämmte Zirkulationsleitungen zudem die internen Lasten.

Die Dämmung mit größerer Dämmstärke ist in einigen Fällen einfach und kostengünstig zu verwirklichen. Rohrleitungen unter der Kellerdecke können z.B. in einer Wärmedämmung der Kellerdecke verlegt werden. Verlaufen die Leitungen in einem Steigschacht, so kann dieser oft relativ leicht z. B. mit Glaswolle ausgedämmt oder mit Zellulose ausgeflockt werden.

Im Neubau sollten immer Hocheffizienzpumpen (Effizienzklasse A) eingesetzt werden. Bei Bestandsgebäuden ist in der Regel der Austausch von ungeregelten Heizungspumpen gegen Hocheffizienzpumpen (Effizienzklasse A) wirtschaftlich interessant. Nach dem Kopplungsprinzip bei Sanierungsmaßnahmen sollte der

Austausch mit ohnehin erforderliche Wartungs- oder Reparaturarbeiten an der Heizungsanlage verbunden werden.

7.6 Betrieb / Regelung

Festlegung der Heizzeit

In der Praxis hat sich eine Festlegung der Heizzeit über ein festes Start- und Enddatum bewährt (z.B. 15.10. bis 15.4.). Damit ist auch für den Nutzer nachvollziehbar, dass in diesem Zeitraum die Heizung in Betrieb ist. Weitere Empfehlungen, die im Zusammenhang mit der Betriebsart stehen, sind bei festen Zeiten auch leichter kommunizierbar. Z.B. muss während der Heizzeit nicht über Fenster gelüftet werden. Die kontrollierte Lüftung sorgt in der Regel für ausreichend Frischluft. Außerhalb der Heizzeit („Sommerbetrieb“) hingegen sollte über Fenster gelüftet werden.

Temperaturabsenkbetrieb

Bei Schulen, Kindertagesstätten und Sporthallen mit Passivhaus-Standard erweist sich ein Temperaturabsenkbetrieb außerhalb der Nutzungszeiten als sinnvoll. Auch in sehr kalten Nächten fällt die Raumtemperatur in der Regel nicht mehr als 3 K ab. Bei Schulen mit Vormittagsnutzung z.B. beträgt die Heizenergieeinsparung bei Temperaturabsenkbetrieb gegenüber dem durchgängigen Heizbetrieb über 30 %.

Die Umsetzung des Temperaturabsenkbetriebs mit Heizflächen entspricht der gängigen Praxis. Wird der Wärmebedarf durch eine Nacherwärmung der Zuluft gedeckt, sind Beheizung und Lüftung gekoppelt. Die Betriebszeiten der Lüftung und damit der Beheizung sollten sich in diesem Fall strikt an dem hygienisch Erforderlichen orientieren. Ein ausgedehnter oder gar durchgängiger Betrieb der Lüftung zur Deckung der Heizlast sollte dringend vermieden werden (vgl. Abbildung 93).

Die Betriebsunterbrechungen an Wochenenden oder in den Ferienzeiten dauern länger an. Für diese Fälle sollte auch bei Wahl einer Zuluftheizung ein Temperaturstützbetrieb vorgesehen werden, so dass Mindestraumtemperaturen nicht unterschritten werden und die anschließenden Aufheizphasen zeitlich im Rahmen bleiben. Es wird eine Stütztemperatur von 17 °C empfohlen. Im Stützbetrieb bieten die Antriebsenergien der Lüftung noch Optimierungspotential. Mit verringertem Volumenstrom nimmt der Druckverlust gemäß der Kennlinie des Kanalnetzes ab. Bei Vernachlässigung der Wirkungsgradkennlinie des Ventilators sinkt die Leistungsaufnahme mit der dritten Potenz des Förderstroms. Ein Stützbetrieb an Wochenenden und in den Weihnachtsferien bei reduziertem Volumenstrom sollte geprüft werden. Die Zulufttemperaturen sind wieder möglichst hoch zu wählen (bis zu 52 °C).

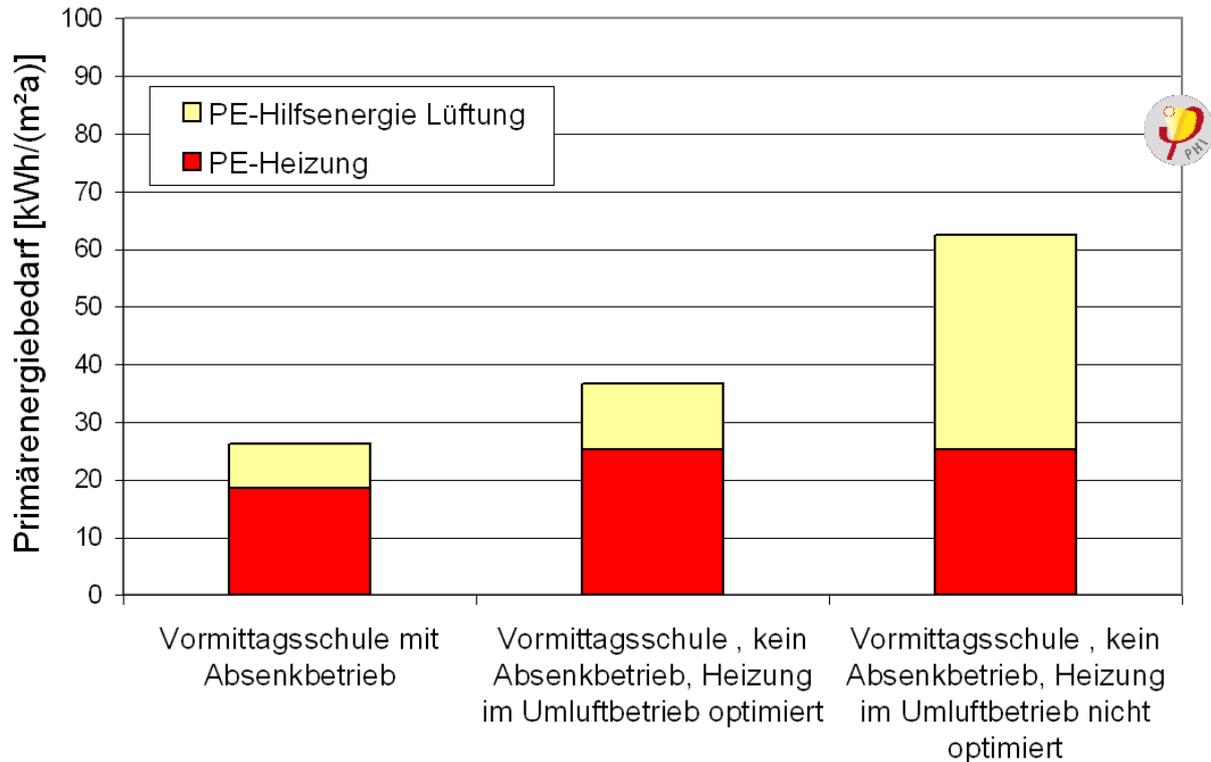


Abbildung 93: Einfluss der Betriebsweise im Falle einer Zuluft-Heizung auf den Primärenergiebedarf am Beispiel einer Schule. Ein ausgedehnter oder durchgängiger Betrieb der Lüftung zur Beheizung kann den Primärenergiebedarf wesentlich erhöhen. (Quelle: PHI)
Annahmen: 30 Schulstunden / Woche, Beheizung über die Zuluft

Regelung des Wärmeerzeugers

Mit verbessertem Wärmeschutz wird die Heizlast stärker durch die anfallende freie Wärme bestimmt, wohingegen der Einfluss der Außentemperatur abnimmt. Bei Schulen, Kindertagesstätten und Sporthallen muss vor allem am Morgen aufgeheizt werden. Sind die Solltemperaturen erreicht, sind in der Regel die Personenabwärme und ggf. solare Gewinne ausreichend, um das Gebäude auf Solltemperatur zu halten.

Um die Verluste der Wärmeverteilung zu minimieren, sollte die Vorlauftemperatur geeignet geregelt werden. Am Morgen kann z.B. eine max. Vorlauftemperatur für den Aufheizbetrieb bereitgestellt werden, welche im Tagesverlauf kontinuierlich absinkt. Eine außentemperaturgeführte Vorlauftemperatur-Regelung erscheint nicht zweckmäßig. Eine geeignete Führungsgröße wäre die Wärmeabnahme des Heizkreises.

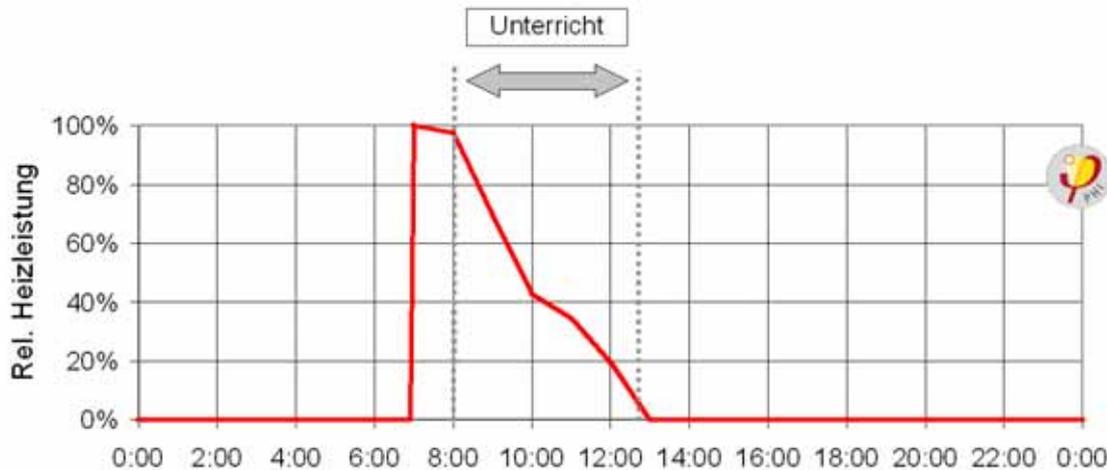


Abbildung 94: Typischer Gang der Heizleistung an einem kalten Tag, am Beispiel einer Passivhaus-Schule mit Vormittagsnutzung. Der Heizungsbetrieb startet eine Stunde vor Schulbeginn (mit der Vorspülphase). (Quelle: PHI)

7.7 Heizung für energieeffiziente Bildungsgebäude in Kürze

Auch in Passivhaus-Bildungsgebäuden muss noch geheizt werden, im Vergleich zu konventionellen Neubauten aber bedeutend weniger. Der Heizenergiebedarf ist etwa 70% geringer. Die Energieeinsparpotentiale bei energetischen Modernisierungen mit hocheffizienten Komponenten reichen bis zu 90%. Der Heizwärmebedarf bei hocheffizienten Passivhaus-Bildungsgebäuden liegt bei etwa 15 kWh/(m²a). Der geringe Energiebedarf ist die Grundlage für einen nachhaltigen Einsatz von erneuerbaren Energien.

Die Empfehlungen zur Heizung bei energieeffizienten Bildungsgebäuden werden im Folgenden nochmals zusammengefasst.

Beheizung

- Alle gebräuchlichen Wärmeübergabe-Lösungen (wie z.B. Heizkörper) können verwendet werden. Bei Erfüllung der Passivhaus-Kriterien ist zusätzlich eine Beheizung durch eine Nacherwärmung der hygienisch erforderlichen Zuluftmengen möglich.
- Mit dem hochwertigen Wärmeschutz kann das Heizungssystem vereinfacht werden. Keine Heizkörper vor oder unter den Fenstern, kleinere Heizkörper, eine freie Anordnung der Heizkörper oder sogar ein Verzicht auf Heizkörper und Verteilleitungen können zu Minderinvestitionen führen. Bei Passivhaus-Sporthallen erscheint eine Beheizung der Halle über die Zuluft besonders zweckmäßig.
- Eine Beheizung über eine Zuluftnachheizung sollte nur dann gewählt werden, wenn sinnvolle Raumgruppen gebildet werden können und sich gegenüber

einer Lösung mit Heizflächen auch tatsächlich ein Investitionskostenvorteil ergibt.

- Auch bei großvolumigen, hochwärmegeprägten Sporthallen spielt die Art der Beheizung keine große Rolle. Die Temperaturschichtung bleibt auch mit dem Konzept der Zuluftheizung bei sehr gutem Wärmeschutz sehr gering.

Trinkwarmwasserbereitung

- Verringerung der Verluste: Bei zentraler Warmwasserbereitung kompakte und gut gedämmte Verteilnetze (Dämmstärke 2 x DN) anstreben. Warmwasserspeicher nach dem tatsächlichen Bedarf auslegen; unnötige Überdimensionierung vermeiden.
- Warmwasserzapfstellen auf die tatsächlich erforderlichen Bereiche begrenzen (z.B. in Schulen auf warmes Wasser in WC's und Unterrichtsräumen verzichten).
- Trinkwarmwasserbedarf reduzieren: Wassersparende Armaturen, wie Selbstschlussarmaturen, Durchflussbegrenzer und Thermostatarmaturen, an häufig genutzten Zapfstellen vorsehen.
- Einsatz von Sonnenkollektoren bei Sporthallen prüfen. Auslegung der Kollektoren möglichst anhand des tatsächlichen Bedarfs.

Wärmeversorgung

- Der Wärmebedarf kann mit allen gängigen Wärmeversorgungslösungen gedeckt werden.
- Durch den geringen Wärmebedarf bestehen besonders gute Voraussetzungen für eine Nutzung von erneuerbaren Energien.
- Energieeffiziente Bildungsgebäude sollten mit Heizungsabsenkung bzw. –abschaltung betrieben werden. Die Heizleistung muss zur Wiederaufheizung ausreichend dimensioniert sein.
- Wärmeverteilungen möglichst nicht in unbeheizten Räumen verlegen. Verteilungen im unbeheizten Bereich mit mindestens 2 x DN dämmen.

8 Sommerbetrieb

8.1 Temperaturverhalten im Sommer

Wie verhält es sich nun mit den energieeffizienten Schulen, Kindertagesstätten und Sporthallen im Sommer? Führt der gute Wärmeschutz hier nicht zu Problemen, insbesondere in Verbindung mit den hohen internen Gewinnen in Schulen und Kindertagesstätten? Um diese Frage genauer zu untersuchen, wurden systematische Simulationsrechnungen durchgeführt. Auch gibt es inzwischen zahlreiche Erfahrungen aus der Praxis.

Nehmen wir an, ein Modellgebäude wäre sehr gut gedämmt und es würden nur extrem geringe interne und solare Lasten auftreten. Die Temperaturen im Gebäude lägen dann nahe an der mehrtägigen Tagesmitteltemperatur der Außenluft; in Deutschland wären dies im Sommer ca. 18 °C. Wäre das Gebäude jedoch nur so gering wie möglich gedämmt, dann würde die Raumtemperatur, bei den gleichen Annahmen zu internen und solaren Lasten in etwa der Außenlufttemperatur folgen. Durch die solaren Einträge über die opaken Dachflächen, geringe Speichermassen vorausgesetzt, stiege die Raumtemperatur sogar noch deutlich über die Außentemperatur an. Ein guter Wärmeschutz ist offensichtlich auch im Sommer von Vorteil.

Solare und interne Lasten lassen die Raumtemperaturen im Sommer in der Regel auf Werte deutlich oberhalb von 18 °C ansteigen. Ein wesentliches Prinzip für angenehme Sommertemperaturen ist daher die internen und solaren Lasten zu minimieren.

In Schulen und Kindertagesstätten sind hohe Belegungsdichten verbunden mit hohen internen Wärmegewinnen während der Nutzung unvermeidlich. Gleichzeitig müssen die Aufenthaltsräume ausreichend große Fensterflächen (vor allem hohe Fenster) zur Tageslichtversorgung aufweisen (vgl. Abschnitt 4.4). Die solaren Lasten können durch geeignete Sonnenschutz-Maßnahmen stark verringert werden. Sinnvolle Konzepte zum effizienten Einsatz von Kunstlicht und zu EDV-Geräten helfen zudem, die internen Lasten durch Stromwendungen auf ein Mindestmaß zu senken.

Ein weiterer Schlüssel zur sommerlichen Behaglichkeit ist die thermische Speichermasse des Gebäudes. Ein Teil der Wärmelasten kann in die Gebäudestruktur eingespeichert werden, mit dem Erfolg, dass der Anstieg der Raumtemperatur deutlich geringer ausfällt.

Was tun mit den verbleibenden Wärmelasten? Während der meisten Stunden im Sommer bietet die Außenluft ausreichendes Kühlpotential. In einem typischen

Sommer treten nur etwa während 30 bis 120 der Nutzungsstunden in Schulen und Kindertagesstätten (unter Berücksichtigung einer 6-wöchigen Sommerpause) Außentemperaturen oberhalb von 25 °C auf (vgl. auch Abbildung 95). In den übrigen Sommernutzungsstunden kann daher die Raumtemperatur durch ausreichendes Lüften nahezu auf Außentemperaturniveau gehalten werden. Als weiteres Prinzip gilt im Sommer also: lüften, lüften, lüften. Darüber hinaus ist allein aus hygienischen Gründen an Nutzungstagen ein ausreichender Luftwechsel erforderlich.

Im Unterschied zu den kalten Wintermonaten kann und sollte im Sommer in der Regel über Fenster gelüftet werden. Einerseits zeigt die Projekterfahrung, dass die Nutzer im Sommer über Fenster lüften möchten und andererseits sind selbst bei effizienten Lüftungssystemen die Antriebsenergien immer noch merklich (vgl. Abschnitt 8.1).

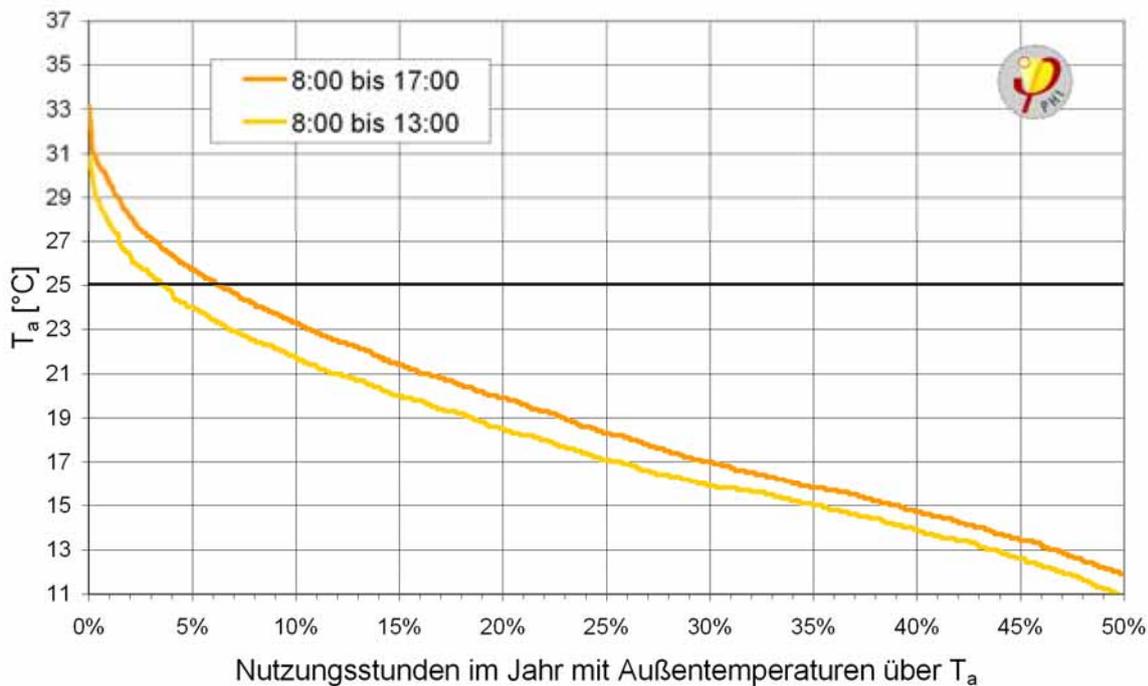


Abbildung 95: Summenhäufigkeit der Außenlufttemperatur für Frankfurt / M. Wetterdatensatz eines durchschnittlichen Sommers (Datensatz von DWD). Dargestellt ist der Anteil an Nutzungsstunden im Jahr mit Außentemperaturen oberhalb des auf der Ordinate angegebenen Wertes T_a . Während der meisten Stunden im Jahr bietet die Außenluft in Deutschland ein erhebliches Kühlpotential. Etwaige Sommerferien sind im Diagramm nicht berücksichtigt (Quelle: PHI).

Abbildung 96 zeigt für die betrachteten Nutzungen typische Tagessummen der eingetragenen Wärmeleistung. Aufgrund der nutzungsbedingt hohen Fensterflächenanteile ist ein guter Sonnenschutz bei den betrachteten Nutzungen für den sommerlichen Komfort maßgeblich. Ist nur ein innenliegender Sonnenschutz

vorhanden, so kann die Tagessumme aus solaren und internen Gewinnen im Sommer auf das Dreifache zunehmen.

In Sporthallen und in Grundschulen sind in der Regel die internen und solaren Lasten deutlich unkritischer als in Klassenräumen von weiterführenden Schulen oder in Gruppenräumen von Kindertagesstätten. Um kleineren Kindern den Ausblick nach außen zu gewähren, sind die Fensterflächen in Kindertagesstätten häufig nahezu raumhoch. Eine gute Lösung für den Sonnenschutz ist dementsprechend gerade bei dieser Nutzung entscheidend.

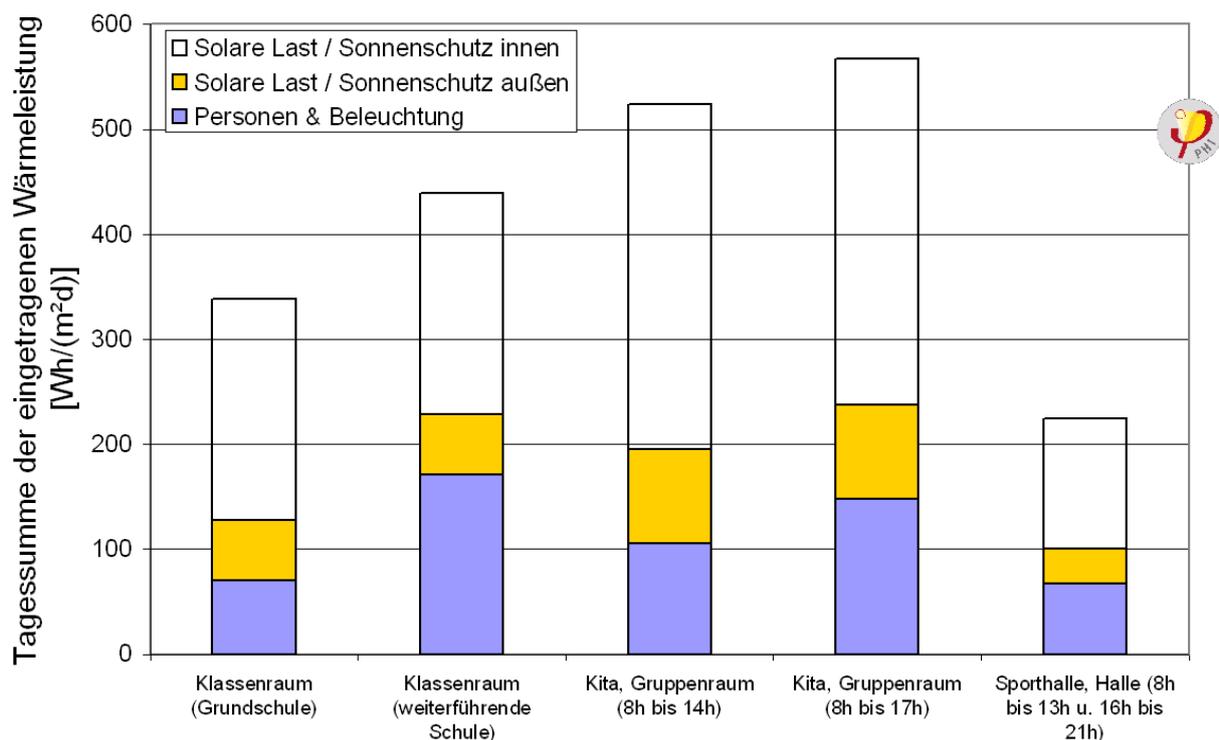


Abbildung 96: Dargestellt ist die Tagessumme der eingetragenen Wärmeleistung für die betrachteten Nutzungen im Sommer. Für alle Nutzungen gilt, dass ein guter Sonnenschutz entscheidend ist. (Quelle: PHI)

Annahmen:

Fensteranteil (Bezug auf Grundfläche): Klasse 19 %, Kindertagesstätte 30 %, Sporthalle 11 % (+ 11 % nach Norden) / **Belegung:** Grundschule 22 Pers., weiterführende Schule 30 Pers., Kindertagesstätte 22 Pers., Sporthalle 30 Pers. / **Nutzungszeit in Schule gemäß Stundentafel Hessen (25 bzw. 34 Wochenstunden),** in den Kindertagesstätten wurde ein überwiegender Aufenthalt im Gruppenraum angesetzt. Vermutlich sind im Sommer durch Aktivitäten auf dem Außengelände die tatsächlichen inneren Lasten geringer.

Um die Frage zu klären, welchen Einfluss der sehr gute Wärmeschutz auf die sommerliche Behaglichkeit hat, wurden im Rahmen des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser zum Thema „Passivhaus-Schulen“ (vgl. [AkkP 33]) systematische Simulationsrechnungen am Beispiel einer weiterführenden Schule durchgeführt (vgl. [Kah 2006]). Es zeigt sich, dass ein Schulbau mit konventionellem

(gemäß EnEV 2004) und mit hochwärmegedämmtem Wärmeschutz sich nahezu gleich verhalten, solange ein guter Sonnenschutz und eine Nachtlüftungsstrategie vorgesehen sind. Bei beiden Varianten wurde dabei eine mechanische Nachtlüftung in Hitzeperioden angesetzt, welche in konventionellen Schulbauten in der Regel nicht zum haustechnischen Konzept gehört.

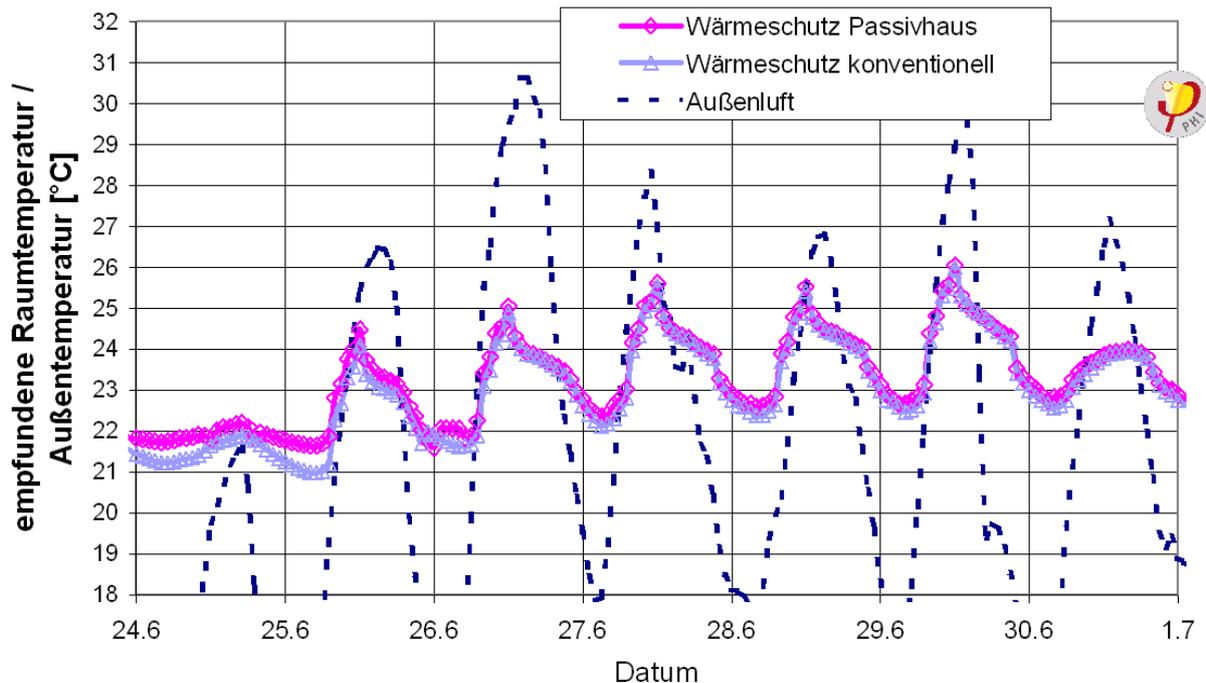


Abbildung 97: Verlauf der Raumtemperatur während einer heißen Woche. Die Temperaturentwicklung für beide Wärmeschutz-Standards ist nahezu identisch. Die Raumtemperaturen steigen in beiden Varianten nicht über 26 °C (Quelle: [Kah 2006] in [AkkP 33]).

Den Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf das sommerliche Raumtemperaturverhalten zeigt Abbildung 98. Eine ausreichende Wärmekapazität des Baukörpers ist eine Voraussetzung für die Strategie der Nachtauskühlung des Gebäudes. Gleichzeitig puffert ausreichend zugängliche thermische Speichermasse die Tagestemperaturspitzen. Die maximalen Tagestemperaturen liegen in der reinen Leichtbau-Variante am Ende der Hitzeperiode um rund 2 K höher als in der Massiv- bzw. Mischbau-Variante.

Die gesamte wirksame flächenspezifische Wärmespeicherfähigkeit der Raumumfassungsbauweise sollte $c_{\text{wirk}} > 150 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$ (bezogen auf die Klassenraumgrundfläche) sein. Die Empfehlung wird z.B. durch die Verwendung von massiven Bauteilen bei den inneren Strukturen des Baukörpers erfüllt.

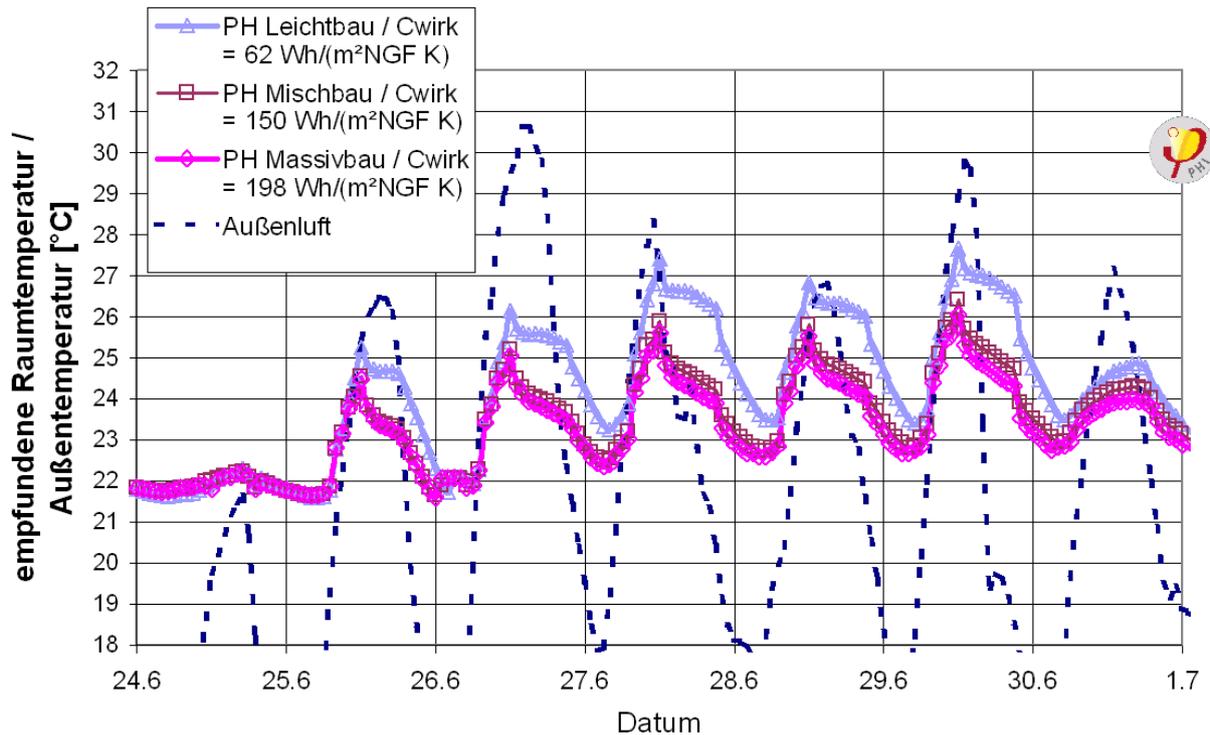


Abbildung 98: Variation der Bauweise des Passivhaus-Schulbaus. Im Leichtbau sind die täglichen Temperaturamplituden größer. Die täglichen Temperaturspitzen liegen in der leichten Ausführung während der untersuchten Woche um 1 bis 2 K höher (Quelle: [Kah 2006] in [AkkP 33]).

Hochwärmegedämmte Konstruktionen verringern zwar in Hitzeperioden Wärmeeinträge über die opaken Bauteile, jedoch findet in der Nacht über die Gebäudehülle kaum Abkühlung statt. Eine Strategie der Nachtlüftung ist daher in gut gedämmten Bildungsgebäuden dringend vorzusehen. Die kontrollierte Lüftung (im Sommerbypass-Betrieb) bietet die Möglichkeit der mechanischen Lüftung in der Nacht. Der Luftaustausch über die kontrollierte Lüftung ist in der Regel ausreichend. Weitere Verbesserungen können Konzepte der freien Nachtlüftung mit höheren Außenluftmengen bringen. Die bauliche Umsetzung einer freien Nachtlüftung sollte daher zumindest geprüft werden (vgl. auch Abschnitt 8.4). Gleichzeitig hat sich als entscheidend erwiesen, dass die Nachtlüftungsstrategie möglichst frühzeitig beginnen sollte. Das Gebäude kann dann mit moderaten Temperaturen in eine Hitzeperiode starten.

Abbildung 99 zeigt den Einfluss der Nachtlüftung wiederum am Beispiel eines Klassenraums. Weiterhin ist, wie oben bereits diskutiert, eine wirksame Verschattung der Solareinstrahlung durch die Verglasungen unverzichtbar (vgl. Abbildung 100).

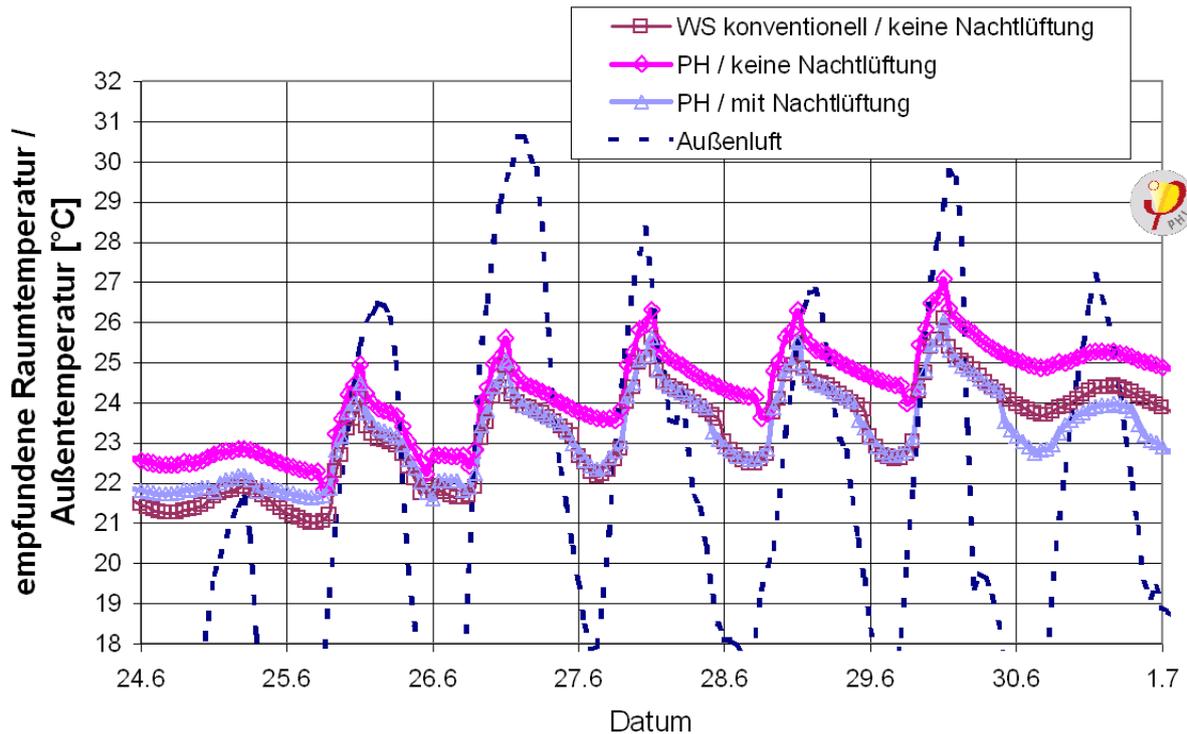


Abbildung 99: Einfluss der Nachtlüftung. Eine Nachtlüftung ist im Passivhaus-Schulbau entscheidend (Quelle: [Kah 2006] in [AkkP 33]).

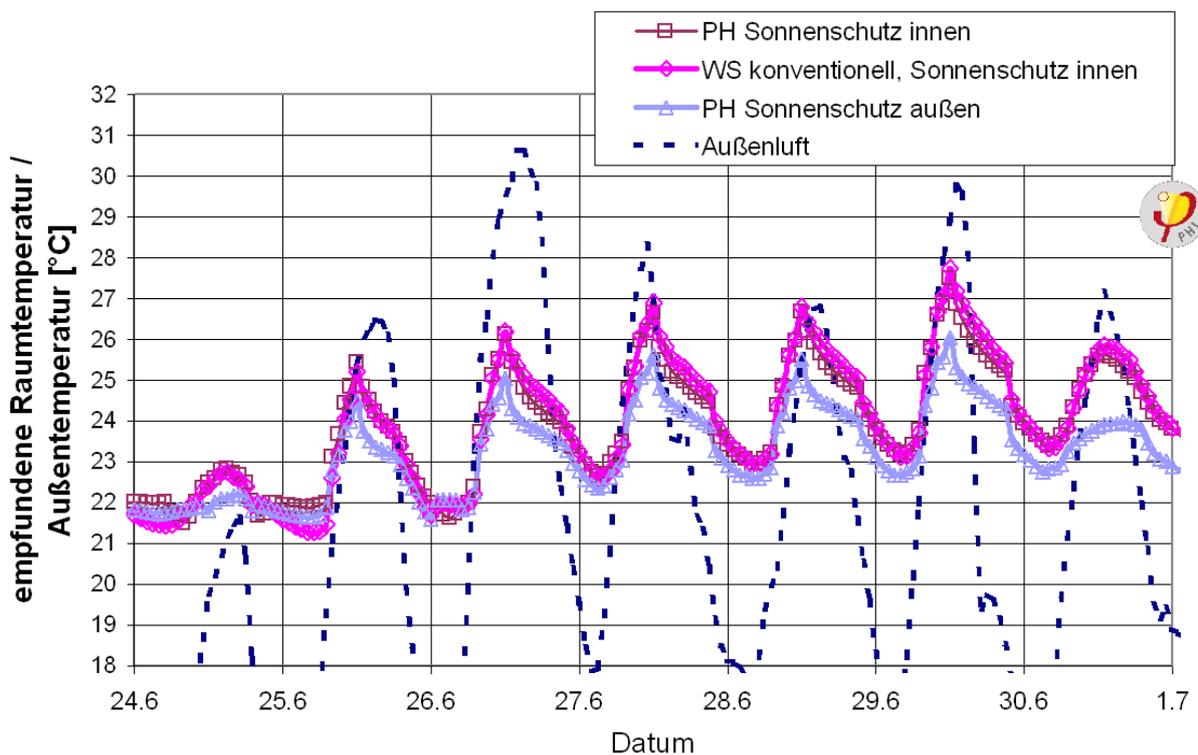


Abbildung 100: Ausführung des Sonnenschutzes. Ein innenliegender Sonnenschutz ist weniger wirksam. Die zusätzlichen solaren Lasten führen im Vergleich zum außenliegenden Sonnenschutz zu einer kontinuierlichen Erwärmung während dieser heißen Woche (Quelle: [Kah 2006] in [AkkP 33]).

Mittels dynamischer Gebäudesimulationen wurde weiterhin das sommerliche Verhalten von Passivhaus-Sporthallen untersucht. Die Verhältnisse sind vergleichbar. Auch hier können mit den Maßnahmen „außenliegender Sonnenschutz“ und „Nachtlüftung“ im Sommer behagliche Raumtemperaturen eingehalten werden (vgl. Abbildung 101).

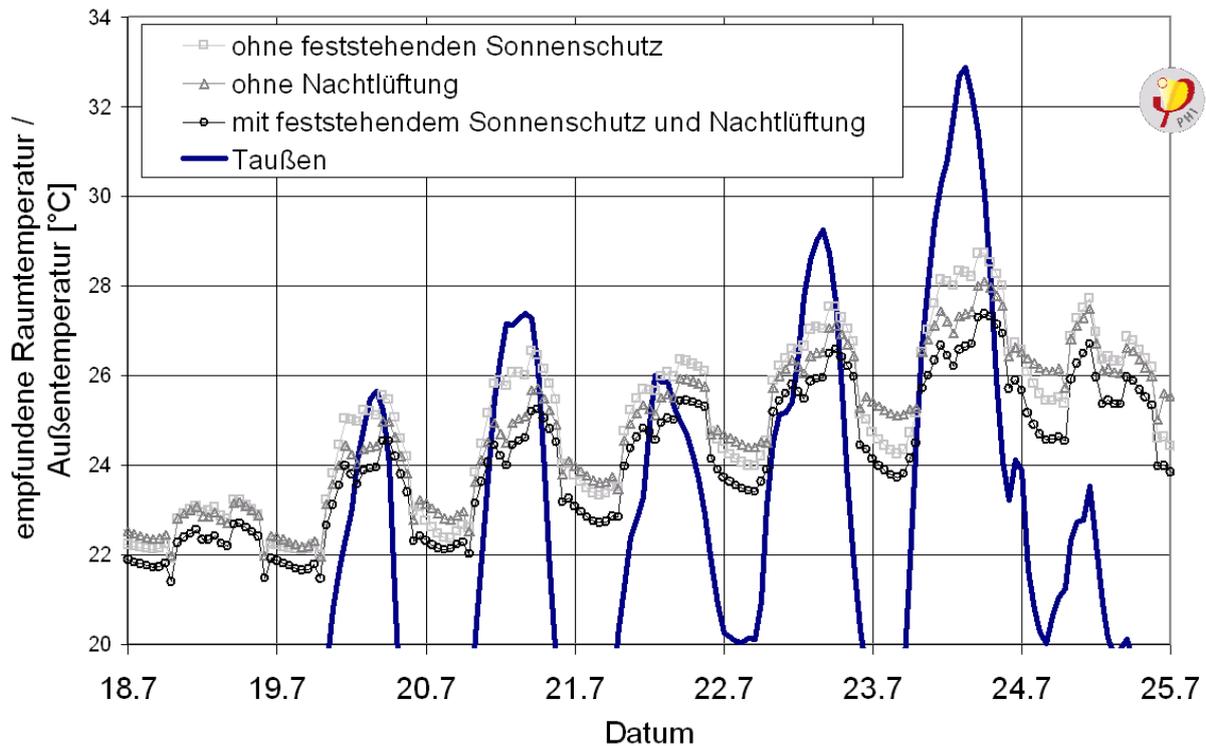


Abbildung 101: Dargestellt ist das sommerliche Verhalten in einer Passivhaus-Sporthalle. Bis auf das Dach ist das Gebäude massiv ausgeführt. Nachtlüftung und Sonnenschutz verbessern die sommerliche Behaglichkeit in der heißen Woche. Maßgeblich ist ein guter Sonnenschutz. (Quelle: PHI)

Auch bei Sporthallen hat die Bauweise einen Einfluss auf das sommerliche Verhalten. Massive Bauteile im Hallenbereich puffern solare und interne Lastspitzen ab (vgl. Abbildung 102). Im Leichtbau können die täglichen Innentemperaturspitzen um 2 K höher als im Massivbau liegen. Eine Extremvariante (Massivbau2) mit zusätzlich massiver Dachausführung (Stahlbeton-Rippendecke) verbessert erwartungsgemäß nochmals das sommerliche Verhalten. Solche Lösungen sollten nur gewählt werden, wenn zusätzliche Anforderungen dafür sprechen (z.B. Nutzung des Daches als Parkfläche).

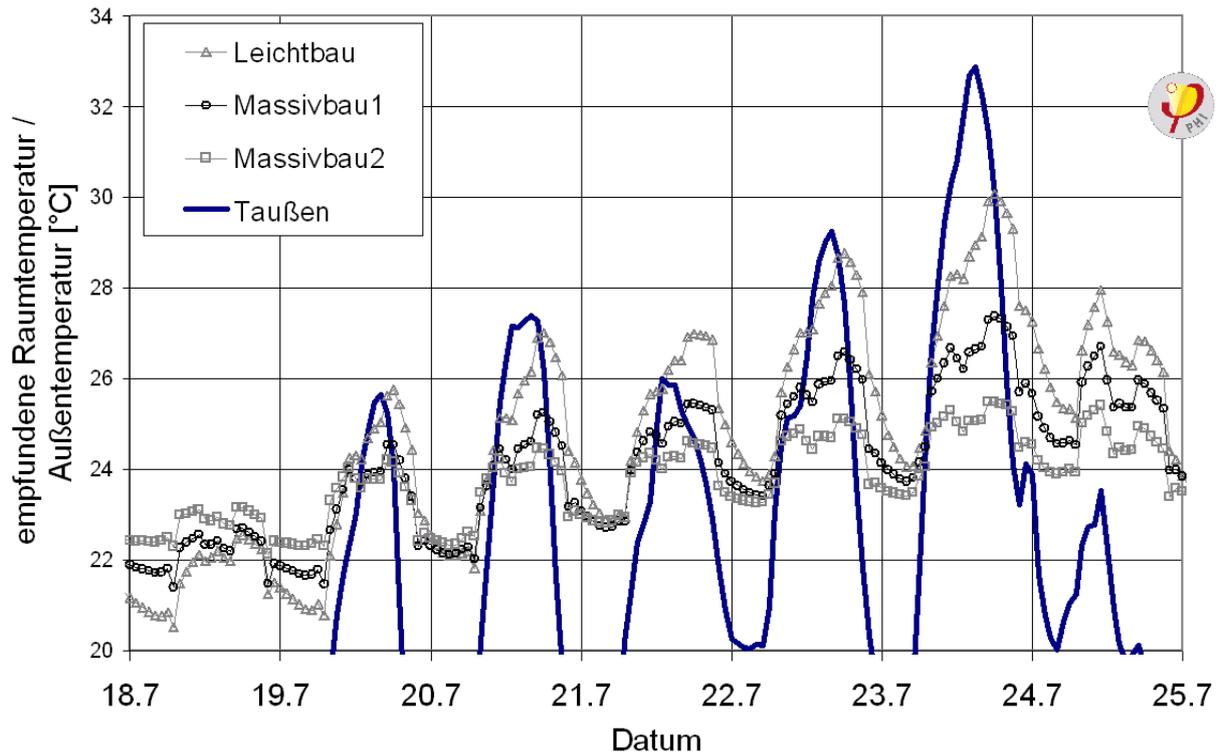


Abbildung 102: Raumtemperaturverlauf während einer heißen Woche in einer Passivhaus-Sporthalle. Dargestellt ist das Verhalten für unterschiedliche Bauweisen. Die Variante Massivbau2 stellt ein Extremfall dar: neben den Innen- und Außenwände ist auch eine massive Ausführung des Daches (Betonrippendecke) berücksichtigt. Auch in der Sporthalle verbessert ausreichend Speichermasse das sommerliche Verhalten. (Quelle: PHI)

Die empfohlenen Maßnahmen sorgen im typischen deutschen Sommer für eine ausreichende sommerliche Behaglichkeit. Die dynamischen Gebäudesimulationen führten auf Übertemperaturhäufigkeiten (über 25°C) im Bereich von 2 % (Grundschule) bis 6 % (weiterführende Schule) der Nutzungsstunden.

Messungen in einer realisierten Passivhaus-Grundschule bestätigen die Ergebnisse der Simulationsrechnungen (vgl. Abbildung 103). In den drei untersuchten Klassenräumen lagen im Temperaturmittel lediglich 2,7 % (Sommer 2005) bzw. 3,6 % (Sommer 2006) der Nutzungsstunden über 25 °C (vgl. [Peper et. al 2007]).

Das sommerliche Verhalten ist dabei vergleichbar mit einem vernünftig betriebenen konventionellen Bildungsgebäude. Das Kühlpotential der empfohlenen Maßnahmen ist begrenzt. Hohe Raumtemperaturen während extremer Sommersituationen können im Unterschied zu Konzepten mit einer aktiven Klimatisierung nicht ausgeschlossen werden.

Sind die Voraussetzungen bei einem Gebäude ungünstig, oder können die empfohlenen Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz nicht umfassend

umgesetzt werden, dann wird im Zweifelsfall eine thermische Gebäudesimulation empfohlen.

In ungünstigen Klimazonen kann es darüber hinaus erforderlich sein, dass weitergehende Maßnahmen für gute sommerliche Behaglichkeit getroffen werden müssen (vgl. Abschnitt 8.5).

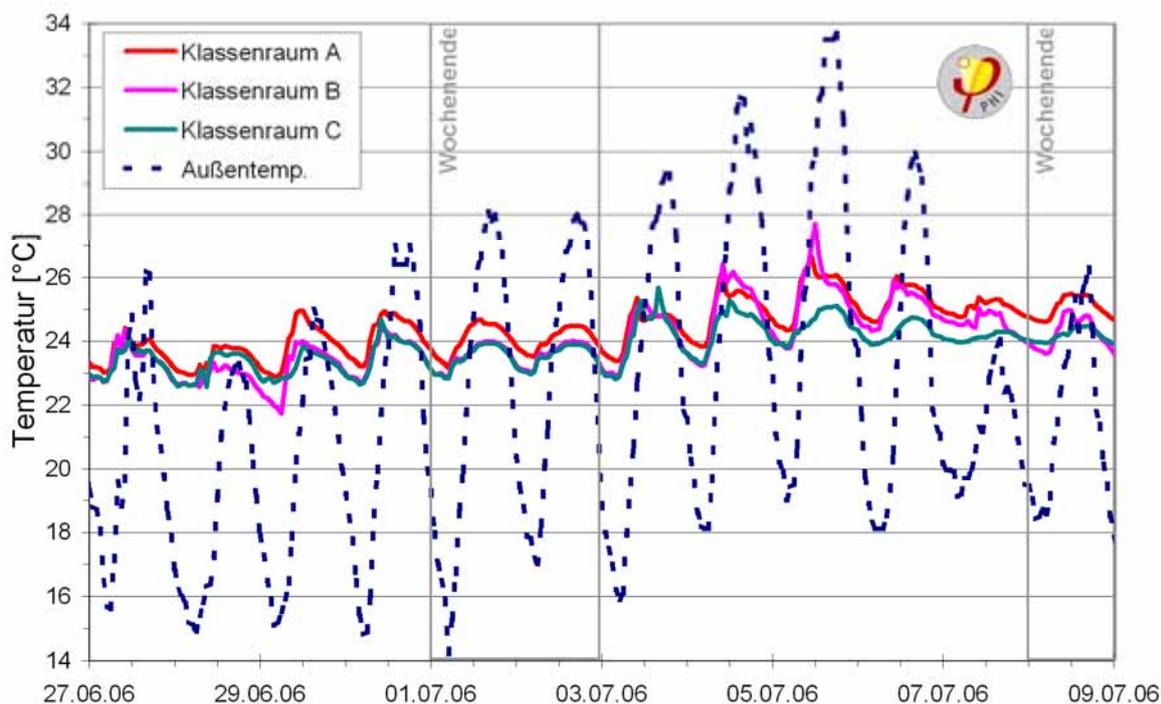


Abbildung 103: Temperaturen in einer Passivhaus-Grundschule in Frankfurt / M. im Verlauf einer Hitzeperiode (Datenquelle: [Peper et al. 2007]). Mit Hilfe der freien Nachtlüftung wird das Gebäude nachts entwärmt, so dass im Verlauf der Hitzeperiode die Raumtemperaturen (Lufttemperatur) nur moderat ansteigen. Im Sommer 2006 lagen in den drei untersuchten Klassenräumen im Temperaturmittel nur 3,6 % der Nutzungsstunden oberhalb von 25 °C und im etwas mäßigeren Sommer 2005 waren dies nur 2,7 %.

8.2 Lüftung im Sommer

Es muss von den baulichen Voraussetzungen her möglich sein, Aufenthaltsräume in Bildungsgebäuden während der Sommermonate unabhängig von der Lüftungsanlage zu belüften. Zum einen ist der Betrieb der mechanischen Lüftung aus energetischer Sicht außerhalb der Heizperiode nicht sinnvoll. Der Strombedarf der Anlage ist selbst bei effizienten Ventilatoren ($< 0,45 \text{ Wh/m}^3$) für den Primärenergiebedarf des Gebäudes von Bedeutung. Zum anderen zeigt die Erfahrung, dass die Nutzer im Sommer über ausreichend große Fensterflächen lüften wollen und geschlossene Fenster oder zu wenig bzw. zu kleine Öffnungsflügel in der Regel nicht akzeptierten.

Im Gegensatz zu den kalten Wintermonaten können die Fenster im Sommer häufig geöffnet sein ohne dass Behaglichkeitseinschränkungen zu erwarten sind. Die öffnbaren Fensterquerschnitte müssen so bemessen sein, dass bei voller Belegung des Klassenraums, des Gruppenraums der Kindertagesstätte oder der Sporthalle ausreichend Außenluft einströmen kann. Gleichzeitig sind bei der Wahl und Anordnung der Öffnungsflügel in Schulen und Kindertagesstätten Unfallverhütungsvorschriften zu beachten (vgl. Abschnitt 5.2, [GUV-V S1])

Die Dimensionierung der Öffnungsquerschnitte hängt einmal von der Belegungsdichte aber auch von der Lüftungsart ab. Im Unterschied zur einseitigen Fensteranordnung fällt durch eine Querlüftung bei gleichen Querschnittsflächen der induzierte Luftaustausch deutlich höher aus. Die Gruppenraumtüren in Kindertagesstätten bleiben häufig offen, so dass hier wie auch in Sporthallen ggf. quergelüftet werden kann (vgl. Abbildung 104).

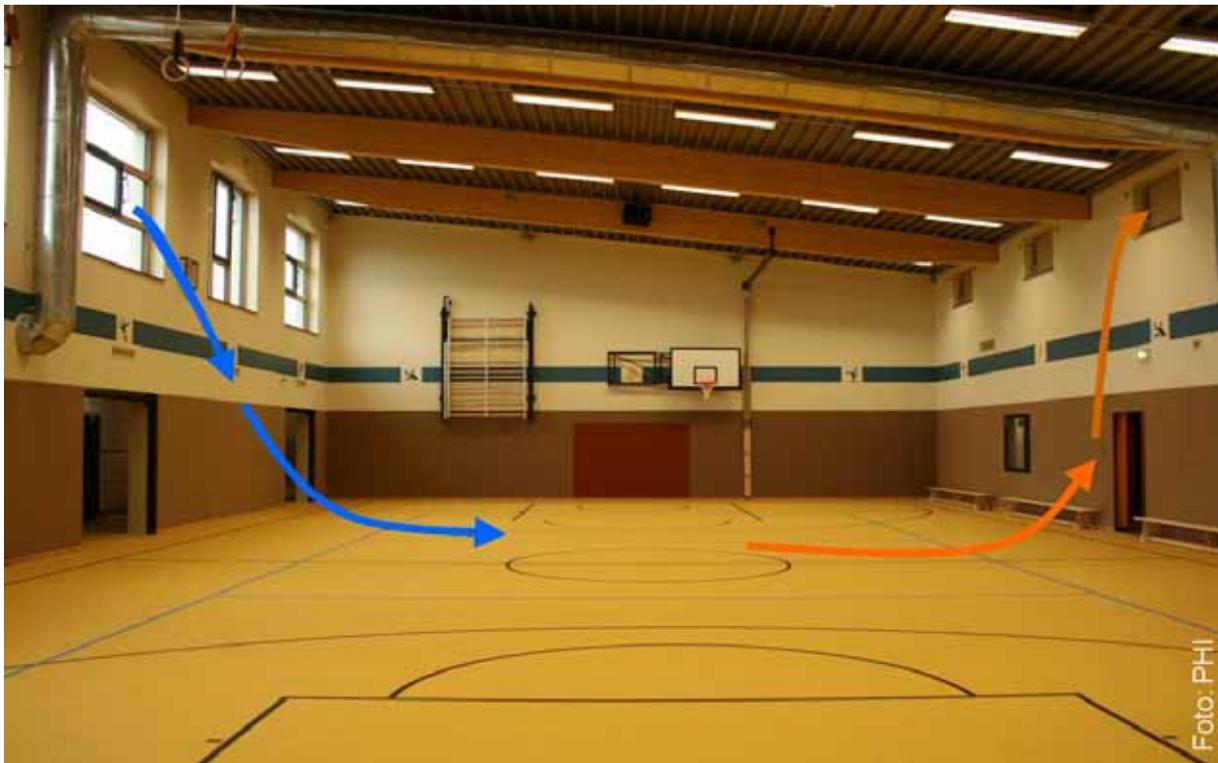


Abbildung 104: Natürliche Lüftung in einer Schulsporthalle (Reichelsheim) mittels Querlüftung. / Architektur: Eigenbetrieb Gebäudewirtschaft Wetteraukreis & a5 Planung, Bad Nauheim

Zur Sicherstellung der Luftqualität sollten durch freie Lüftung mindestens $20 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pers.})$ erreichbar sein, wobei eine größere Sommerauslegung empfohlen wird ($30 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pers.})$). Neben der Deckung des hygienischen Luftbedarfs kann durch die Taglüftung im Sommer ein deutlicher Teil der Wärmelasten abgeführt werden (an einem typischen Sommertag bei ausreichender Auslegung 50 bis 90 % der Personenabwärme).

Ein Verfahren zur Abschätzung der Fensterquerschnitte für die natürliche Lüftung ist im Downloadbereich des Passivhaus Instituts verfügbar (www.passiv.de, Rechentool „SommLuft“). Das Verfahren ist ebenfalls im aktuellen Passivhaus-Projektierungspaket [PHPP] (Tabellenblatt „SommLuft“) enthalten.

Die Stadt Frankfurt empfiehlt für Unterrichtsräume eine freie Öffnungsfläche von $0,3 \text{ m}^3/\text{Person}$ bei einseitiger Lüftung [Linder 2009]. In Gruppenräumen und Klassenräumen sind bei reiner Kippfensterlüftung die Öffnungsflächen in der Regel nicht ausreichend. Mit Drehflügeln hingegen kann ein genügender Luftwechsel bereits mit zwei Fenstertüren erzielt werden. Die Verwendung von Drehflügeln ist jedoch nicht überall problemlos möglich und muss, wie oben bereits erwähnt, mit den Anforderungen der Unfallverhütungsvorschriften abgestimmt werden.

8.3 Sonnenschutz

Große süd-, west- und ostorientierte Glasfassaden leisten im Winter einen willkommenen Anteil zur Senkung des Heizwärmebedarfes. Im Sommer dagegen sind diese solaren Wärmegewinne unerwünscht. Bei südorientierten Verglasungen kann mit Hilfe eines Dachüberstandes ein Großteil der hochstehenden Sommersonne abgeschirmt werden.

Ost- und Westverglasungen sind, sofern sie keinen variablen Sonnenschutz haben problematisch, da die tiefstehende Morgen- und Abendsonne bedeutende Lasten in das Gebäude einträgt. Dies wird vor allem bei Ostfassaden unterschätzt, da bei geöffneten Fenstern die frische Morgenluft eine Kühlung vermittelt und über die kritische Aufheizung durch die Solareinstrahlung hinwegtäuscht. Wird es im Raum im Laufe des Vormittages zu warm ist es für den Einsatz des Sonnenschutzes meist zu spät. Eine manuelle Steuerung des Sonnenschutzes ist daher nicht empfehlenswert. Wirkungsvoll einsetzbar sind variable Verschattungen vor allem dann, wenn sie entweder zeit- und temperaturgesteuert oder strahlungsgesteuert betrieben werden. Um die Akzeptanz einer automatisch gesteuerten Verschattung zu gewährleisten, sollte der Nutzer immer die Möglichkeit einer Übersteuerung haben. Mit der automatischen Steuerung kann der Sonnenschutz auch an Wochenende und in den Sommerferien sichergestellt werden.



Abbildung 105: Wetterstation für Sonnenschutz-Steuerung. Sonnenschutzanlagen müssen über eine Wetterstation gesteuert werden. Der variable Sonnenschutz sollte für Windgeschwindigkeiten von mindestens 13 m/s ausgelegt sein [Linder 2009].

Eine ergänzende Maßnahme zum außenliegenden Sonnenschutz ist z.B. eine natürliche Verschattung durch Laubgehölze. Permanente Verschattungen eignen sich hier nicht, da sie auch in der Heizperiode den solaren Eintrag schmälern. Dies gilt vor allem für Sonnenschutzgläser. Sie besitzen einen besonders geringen Energiedurchlassgrad (g-Wert) und reduzieren sowohl im Sommer als auch im Winter die solaren Wärmegewinne und verschlechtern die Tageslichtausnutzung. Im Vergleich zu einer Außenjalousie lassen sie noch deutlich mehr Sonnenenergie ins Gebäude, so dass ihr Beitrag zum sommerlichen Wärmeschutz geringer ist. Dreischeiben-Wärmeschutzverglasungen besitzen g-Werte um 50%, ein Sonnenschutzglas um 30 % und eine Außenjalousie mit einem Abminderungsfaktor von 0,1 reduziert den g-Wert der Verglasung um 90 % also auf 5 %.

Tabelle 10: Abminderungsfaktoren für typische temporäre Verschattungseinrichtungen bei Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung (nach DIN 18599-2)

Art der Verschattung	außen	innen
Jalousie, Lamellen senkrecht	0,06	0,7
Jalousie, Lamellen 45°	0,10	0,75
Rollo/Markise, weiß	0,24	0,6
Rollo/Markise, grau	0,12	0,8
Folie	--	0,6

Der Sonnenschutz sollte auch im geschlossenen Zustand eine ausreichende Tageslichtversorgung ermöglichen. Außen-Raffstore mit geteiltem Behang zur Tageslichtlenkung oder ein „light shelf“ im oberen Fensterbereich sind mögliche Lösungen.

Erhebliche solare Lasten können auch durch Dachfenster ins Gebäude gelangen. Der Sonnenschutz an Dachfenstern ist in der Regel aufwendiger (vgl. Abbildung 107). Auch an verglasten Gruppenraum-Außentüren von Kindertagesstätten und an verglasten Fluchttüren sollte eine Sonnenschutz-Lösung vorgesehen werden. Abbildung 106 zeigt eine Lösung mit Dachüberstand und Markise.

Bei raumhohen Fenstern ist ein außenliegender Sonnenschutz im Fußbereich besonders gefährdet. Zugängliche Fassaden mit raumhohen Verglasungen in Schulen sollten mit vandalismussicheren Sonnenschutz-Konzepten ausgerüstet werden (z.B. feststehende außenliegende Lamellen).



Abbildung 106: Der Sonnenschutz der südorientierten Kindertagesstätte wurde über einen Dachüberstand sichergestellt. Aufgrund der raumhohen Fenster ist eine zusätzliche Markise zur Verschattung erforderlich. Durch die außenseitige Anordnung der Markise kann der Sonnenschutz auch im Bereich der Gruppenraumtür durchlaufen. In der Übergangszeit kann das Gebäude jedoch nicht vollständig verschattet werden.
Kindertagesstätte in Frankfurt Schwanheim / Architektur: sdks, Darmstadt



Abbildung 107: Sonnenschutz von Dachoberlichtern. Passivhaus-Schule in Marburg (Martin-Luther-Schule). Architekten Hess/Talhof/Kusmierz, München. (Foto: Passivhaus Dienstleistung GmbH)

8.4 Nachtlüftung

Im deutschen Klima liegen die Nachttemperaturen auch im Hochsommer regelmäßig unter 20 °C, so dass sich diese Luft gut zum Auskühlen des Gebäudes eignet (vgl. Abbildung 108). Das bedeutet, dass die während des Tages auftretenden Lastspitzen in den kühleren Nachtstunden abgeführt werden können.

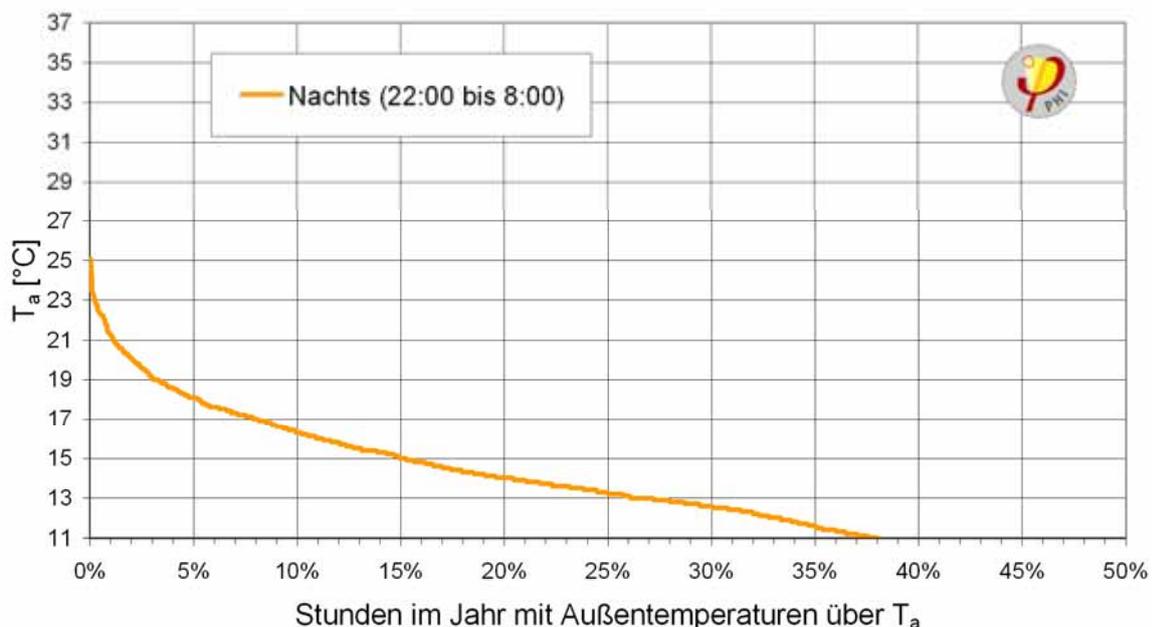


Abbildung 108: Summenhäufigkeit der Außenlufttemperatur für Frankfurt / M. Wetterdatensatz eines durchschnittlichen Sommers (Datensatz von DWD). Dargestellt ist der Anteil an den Jahresstunden mit Außentemperaturen oberhalb des auf der Ordinate angegebenen Wertes T_a. Während der meisten Nachtstunden im Jahr bietet die Außenluft in Deutschland ein erhebliches Potential zur Nachtauskühlung (Quelle: PHI).

Zur wirksamen Entwärmung des Gebäudes müssen sowohl der nächtliche Luftwechsel als auch die Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Raumluft ausreichend groß sein. Als wirkungsvoll haben sich Luftwechsel zwischen dem Zwei- bis Vierfachen des Raumluftvolumens bei Temperaturdifferenzen von mindestens

2 K erwiesen (vgl. [AkkP 22]). Hygienisch erforderlich in Schulen und Kindertagesstätten ist ein etwa 2-facher Luftwechsel, so dass in der Regel auch die kontrollierte Lüftung für eine wirksame Nachtlüftung eingesetzt werden kann. Bei mechanischer Nachtlüftung sollten, wegen des Temperaturhubs durch die Ventilatorabwärme, die Mindest-Temperaturdifferenzen eher höher gewählt werden (4 K). Detaillierte Informationen zu Strategien der „passiven Kühlung“ finden sich in [Zimmermann 1999].

Energieeffizienter und in der Regel wirksamer (bei mehr als zwei Luftwechseln je Stunde) ist eine freie Nachtauskühlung. Die Stadt Frankfurt z.B. fordert dies für ihre städtischen Neubauprojekte (vgl. [Linder 2009]). Dazu müssen geeignete Öffnungsflügel vorgesehen werden, die temperaturgesteuert motorisch öffnen, um eine effektive Regelung der Nachtauskühlung zu gewährleisten. Die erforderliche Öffnungsfläche hängt, wie auch bei Taglüftung (vgl. Abschnitt 5.2) wesentlich davon ab, ob eine raumweise Lüftung oder eine Querlüftung möglich ist. Letztere erfordert Überströmmöglichkeiten vom Klassen- oder Gruppenraum in gegenüberliegende Räume. Noch wirksamer kann die Nachtlüftung betrieben werden, wenn sich die Öffnungen in der Fassade in verschiedenen Höhen befinden. Durch den Effekt des thermischen Auftriebs können die Öffnungsquerschnitte kleiner ausfallen.

Die Möglichkeit zur Überströmung in andere Zonen wird maßgeblich vom Brandschutzkonzept beeinflusst. Das Nachtlüftungskonzept ist daher als Planungsaufgabe zu sehen, das, sofern es möglichst frühzeitig berücksichtigt wird kostengünstig und effektiv realisiert werden kann. Der resultierende Volumenstrom kann, wie oben bereits erwähnt, mit dem Tool „Sommluft“ abgeschätzt werden. Der Planer erhält so Angaben zum erreichbaren Nachtluftwechsel.

Nachtlüftungslappen können sowohl als Teilbereich innerhalb der Verglasung oder auch als gesonderte opake Klappe realisiert werden. In beiden Fällen sind ein wirksamer Einbruch- und Insektenschutz sowie die Vermeidung des Eintretens von Regenwasser zu beachten. Nach außen auffahrende Klappen eignen sich hier besonders gut. Aber Achtung: der Einbruch- und Insektenschutz reduziert in der Regel den tatsächlichen freien Lüftungsquerschnitt. Eine Mehrfachnutzung von ohnehin erforderlichen RWA Öffnungen ist durchaus möglich und kostengünstig.



Abbildung 109: Nachtlüftungsklappe einer Kindertagesstätte. Der Kettenantrieb ermöglicht einen großen Öffnungswinkel. Die nach außen öffnende Klappe verhindert das Eindringen von Regen, die Stäbe stellen einen wirksamen Einbruchschutz dar und das dahinterliegende Netz sichert den Insektenschutz.
Kindertagesstätte in Frankfurt Schwanheim / Architektur: sdks, Darmstadt



Abbildung 110: Detail einer Lüftungsklappe. Glaslamellen und ein Drahtgewebe stellen den Einbruch- und Insektenschutz sicher.
Kindertagesstätte Goldstein (Frankfurt), Architektur: AS&P, Frankfurt

Besonders effektiv wird die Nachtauskühlung in zwei Passivhaus-Schulen durch Nutzung der thermischen Auftriebskräfte betrieben (vgl. Abbildung 111 und Abbildung 112). Hierfür wurden Öffnungsklappen in unterschiedlichen Höhen im Gebäude und offene Verbindungen zwischen den betreffenden Zonen vorgesehen.

In der Martin-Luther-Schule in Marburg werden zur Nachtlüftung die RWA-Klappen in der Dachlaterne und die Lüftungsklappen in den Klassenräumen geöffnet. Über Türen, die nachts offenstehen (Türaufhalter, schließen im Brandfall), strömt die Luft aus den Aufenthaltsräumen in das zentrale Treppenhaus. Durch den Höhenunterschied der Öffnungen verstärkt der thermische Auftrieb die natürlichen Antriebskräfte (vgl. Abbildung 112).

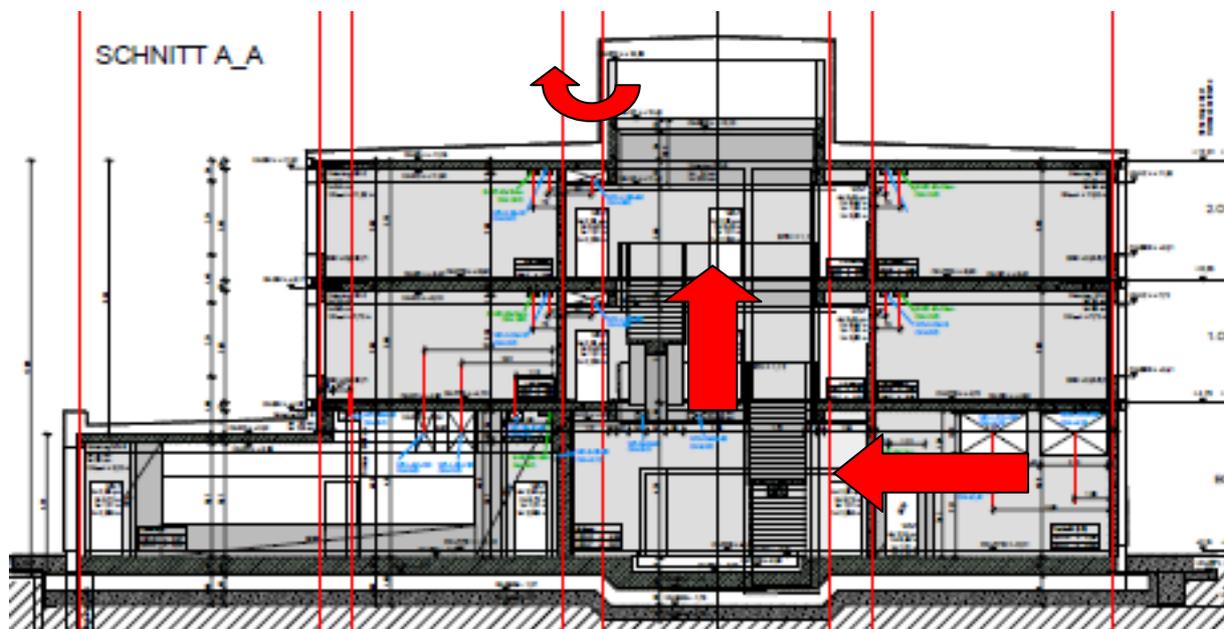


Abbildung 111: Nachtlüftung im Atrium einer Schule. Zur Nachtauskühlung werden Lüftungsklappen im EG und die ohnehin erforderlichen RWA-Klappen in der Dachlaterne nachts geöffnet. Beispiel Ziehenschule Frankfurt, Architekt: Marcus Schmitt, Frankfurt)



Abbildung 112: Freie Nachtlüftung in einer Schule mittels Kamineffekt. Nachts öffnen sich Lüftungsklappen in den relevanten Aufenthaltsräumen. Die Türen zum zentralen Treppenhaus können nachts durch Türaufhalter offen gehalten werden. Die in den Aufenthaltsräumen erwärmte Nachtluft kann das Gebäude über die in der Dachlaterne geöffneten RWA-Klappen verlassen. Passivhaus-Schule in Marburg (Martin-Luther-Schule). Architekten Hess/Talhof/Kusmierz, München. (Fotos: Passivhaus Dienstleistung GmbH)

8.5 Begrenzung interner Lasten

Zu den nennenswerten inneren Wärmelasten in Schulbauten zählen vor allem die Personen, die Beleuchtung und die technische Ausstattung (EDV Anlagen). Während erstere unvermeidlich sind, kann die Wärmeabgabe der künstlichen Beleuchtung und der EDV Geräte deutlich reduziert werden. In Klassenräumen können die internen Lasten durch effiziente Stromanwendungen im Bereich von 20 bis 30 % verringert werden (vgl. Abbildung 113).

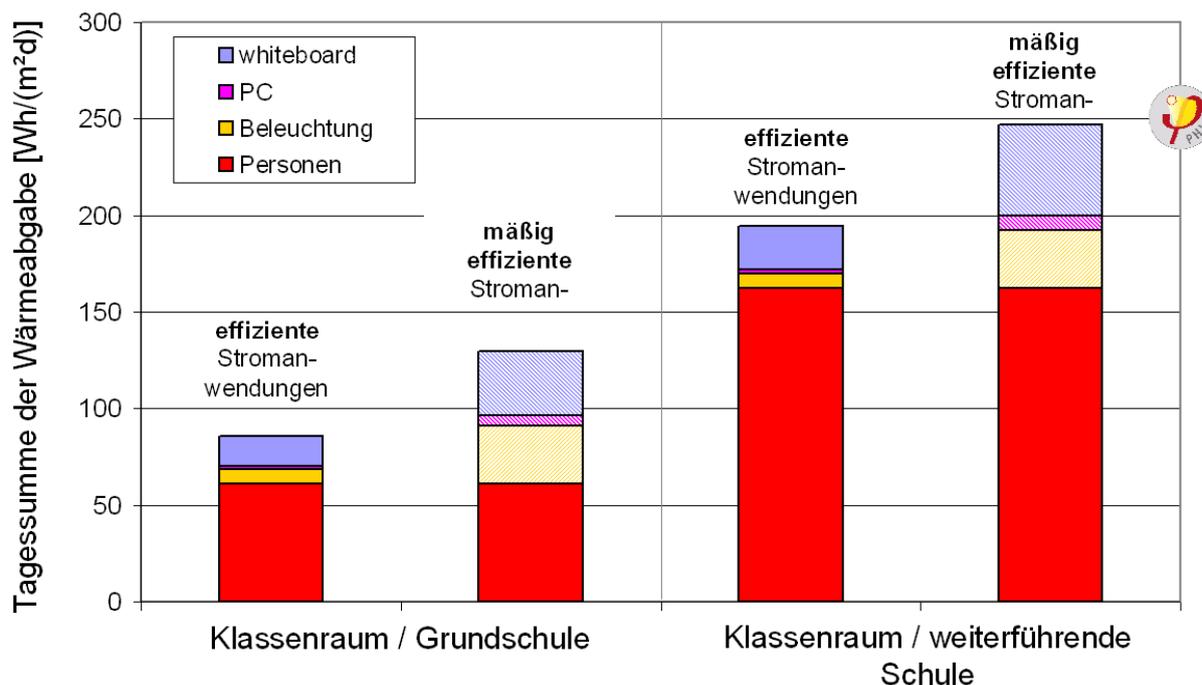


Abbildung 113: Einfluss der Stromanwendungen auf die internen Lasten in einem Klassenraum. Effiziente Stromanwendungen sparen nicht nur Energie sondern können auch in Schule die internen Lasten deutlich verringern (siehe jeweils linke Säule). (Quelle: PHI)

Annahmen: - Grundschule: Nutzung eines PC's während 45 min / Schultag
 - weiterf. Schule: Nutzung eines PC's während 2*45 min / Schultag
 - Whiteboard: System aus PC und Beamer

Ein weitgehend reduzierter Strombedarf für Kunstlicht und damit verbunden eine minimierte Wärmeabgabe wird einmal durch Minimierung der Betriebszeit der Beleuchtung und zum anderen durch effiziente Leuchtmittel sichergestellt (vgl. Abschnitt 9.1). Zentral erscheint hier die Vereinbarung von Grenz- und Zielwerten der spezifischen installierten Leistung des Kunstlichts (vgl. Abschnitt 9.1).

Wie weiter oben bereits erwähnt, sollte auch bei aktiviertem Sonnenschutz eine ausreichende Tageslichtversorgung gegeben sein. In der Regel ist die natürliche Beleuchtung mit wesentlich geringeren Wärmeeinträgen verbunden, als das Einschalten des Kunstlichts. Mögliche Lösungen bieten hier Außen-Raffstore mit

Tageslichtlenkung oder sogenannte „light shelves“ im oberen Fensterbereich. Die natürliche Belichtung und gleichzeitige Verschattung ist aufgrund der tiefstehenden Sonne bei West- und Ostfassade kritischer.

Neben der Beleuchtung geben EDV-Geräte Wärme in beachtlicher Größenordnung ab. In Klassenräumen haben PC gestützte Unterrichtsmethoden Einzug gehalten, so dass in fast jedem Klassenzimmer mindestens ein PC und ein Beamer vorhanden sind. Als Alternative oder Ergänzung zur Schultafel im Unterricht werden dabei verstärkt „Whiteboards“ eingesetzt. Diese Systeme bestehen aus einem PC und einem Beamer.

Auch hier bietet moderne Technik energieeffiziente Lösungen an. Die folgenden Datenbanken geben einen guten Überblick zu energieeffizienten EDV-Geräten: z.B. www.ecotopten.de, www.office-topten.org, www.eu-energystar.org.

8.6 Zusätzliche Kühlstrategien für den Sommer

In ungünstigen Klimazonen oder städtischen Wärmeinseln kann es darüber hinaus erforderlich sein, weitergehende Maßnahmen für gute sommerliche Behaglichkeit treffen zu müssen.

Ein einfacher und effizienter Weg bei Gebäuden mit kontrollierter Lüftung besteht in der Konditionierung der Zuluft. Ein Kühlregister im Zuluftstrang kann z.B. über eine Erdsonde rückgekühlt werden.

Ebenfalls gering ist der Mehraufwand für eine indirekte adiabate Kühlung der Zuluft. Dabei wird die Kälte durch Luftbefeuchtung und Verdunstungskühlung der Abluft erzeugt. Die Kühlleistung ist bei diesem Konzept begrenzt und abhängig von der Abluftfeuchte. Die Kälte kann ohne zusätzlichen Energieaufwand erzeugt werden. Dieses Konzept wird z.B. erfolgreich in einer Berufsschule in Waldshut eingesetzt (vgl. [Weiß 2006]).

Eine weitere Alternative stellt die Bauteiltemperierung dar. Im Vergleich zu den zuvor genannten Lösungen ist der Aufwand höher. Auch hier bietet sich als Quelle ein Erdsondenfeld an. Besonders interessant ist diese Lösung, wenn die Erdsonden auch im Winter über eine Wärmepumpe in die Wärmeversorgung eingebunden sind.

Auch die räumliche Anordnung der Nutzungen hat einen Einfluss auf den Umgang mit Wärmelasten. Räume mit besonders hohen internen Lasten (Server-Räume, EDV-Räume) sollten im Norden angeordnet werden. Die angrenzende Außenluft ist kühler und die solaren Einträge können stark reduziert werden.

8.7 Sommerbetrieb in Kürze

Der sommerliche Wärmeschutz muss gerade bei Schulen und Kindertagesstätten besonders beachtet werden. Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse für behagliche Sommer in Kürze zusammengefasst. Wenn einzelne Aspekte des sommerlichen Wärmeschutzes projektspezifisch ungünstig ausfallen, kann es darüber hinaus erforderlich sein, dass weitergehende Maßnahmen für gute sommerliche Behaglichkeit getroffen werden. Im Zweifel wird eine thermische Gebäudesimulation empfohlen.

- Maßgeblich bei den üblichen Fensterflächen von Bildungsgebäuden ist ein wirksamer Sonnenschutz an Ost-, Süd und Westfassaden.
- Durch die hohen temporären inneren Lasten bei Schulgebäuden und Kindertagesstätten muss die Konstruktion ausreichend zugängliche thermische Speichermasse bereitstellen. Die flächenspezifische Wärmespeicherfähigkeit sollte mindestens $150 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$ betragen.
- Für warme Perioden muss eine Nachtlüftungsstrategie vorgesehen werden. Dies kann mittels der kontrollierten Lüftung (ohne Wärmerückgewinnung) oder in der Regel noch wirksamer durch freie Lüftung über automatisierte Klappen erfolgen.
- Im Unterschied zum Winter sollte im Sommer überwiegend über Fenster gelüftet werden. Dies spart Antriebsenergie für die andernfalls erforderliche kontrollierte Lüftung und ist in der Regel auch von den Nutzern erwünscht.
- In einem typischen deutschen Sommer bietet die Außenluft während der meisten Stunden ein ausreichendes Kühlpotential. Nur etwa während 30 bis 120 Nutzungsstunden von Schulen und Kindertagesstätten liegen die Außentemperatur über 25°C . Im Sommer sollte daher bis auf Hitzeperioden intensiv gelüftet werden.

Eine einfache und effiziente zusätzliche Maßnahme besteht in der Vorkonditionierung der Zuluft mittels eines Solekreislaufs. Zudem bietet eine adiabate Kühlung mit geringem Zusatzaufwand weiteres Kühlpotential.

9 Stromanwendungen

9.1 Kunstlicht

In Schulen und Kindertagesstätten liegen die Anforderungen an die Beleuchtungsstärke bei 300 lx (vgl. [EN 12464-1]). Tagsüber kann über Tageslicht regelmäßig eine angemessene Beleuchtung erzielt werden. Wie in Abschnitt 4.4 ausgeführt, ist die Tageslichtversorgung besonders in der Raumtiefe bei Unterrichts- und Gruppenräumen kritisch. Möglichst hohe sturzfremde Fensteranordnungen und eine helle Raumgestaltung verbessern die Tageslichtversorgung. Transparente Brüstungsbereiche hingegen haben nur geringen Einfluss auf die Tageslichtversorgung.

In Schulen für Abendklassen sind für den Abendbetrieb erhöhte Beleuchtungsstärken vorzusehen (500 lx/m²). Die Beleuchtung sollte in diesem Fall in zwei Leistungsstufen für die Nutzung am Tag und am Abend (300 / 500 lx/m²) schaltbar sein.

Im Schulsport liegt die Beleuchtungsanforderung bei ebenfalls 300 lx/m². Für Vereinssport am Abend und insbesondere bei Wettkampfnutzung können z.T. wesentlich höhere Beleuchtungsstärken erforderlich werden. Sind für die Vereinsnutzung höhere Beleuchtungsstärken gefordert, sollte das Kunstlicht in mehreren Beleuchtungsstärken schaltbar sein. Die Schaltstufen mit den höheren Beleuchtungsstärken sollten durch gesonderte Schüsselschalter nur bei Bedarf freigegeben werden (z.B. Wettkampfbetrieb am Wochenende).

Kunstlicht ist nur bei Raumbelugung und unzureichendem Tageslichtangebot erforderlich. Bei ausreichender natürlicher Beleuchtungsstärke wird die zusätzliche künstliche Beleuchtung kaum wahrgenommen, weshalb häufig vergessen wird, sie wieder auszuschalten. Durch eine Beleuchtungssteuerung können weitere Einsparpotentiale erschlossen werden. In Schulen können z.B. Präsenzmelder in den Sanitäranlagen helfen den Kunstlichteinsatz auf die Nutzungszeiten zu begrenzen.

In den Unterrichtsräumen hat sich in Frankfurter Schulen eine Pausenabschaltung bewährt (vgl. [Bretzke 2006]). Nach der Pause muss von den Nutzern neu entschieden werden, ob tatsächlich ein zusätzlicher Bedarf für künstliche Beleuchtung besteht. Die Beleuchtung muss hierfür zentral steuerbar sein (Aufschaltung auf Gebäudebus). In Gruppenräumen von Kindertagesstätten und Klassenräumen kann ein tageslichtabhängiges Kontrollsysteme den Strombedarf verringern, indem es bei ausreichenden Beleuchtungsstärken abschaltet. Bei Sporthallen ist die tageslichthängige Steuerung besonders interessant und sehr empfehlenswert, da der Zusatzaufwand hierfür gering ist: über ein Steuergerät können gleich zahlreiche Leuchten versorgt werden.

Maßgebliche Einsparpotentiale in der Kunstlichtplanung ergeben sich durch eine Optimierung von Auswahl und Leuchtenanordnung. Hierdurch kann die installierte Leistung für Kunstlicht und damit auch der Strombedarf regelmäßig um 25 % gesenkt werden (vgl. [SIA 380/4], [LEE]).

Abbildung 114 zeigt am Beispiel einer Einfachsporthalle das Einsparpotential einer optimierten Planung. Mit einer veränderten Leuchtengröße und –anordnung kann die spezifische installierte Leistung bei gleicher Beleuchtungsstärke um 30 % verringert werden.

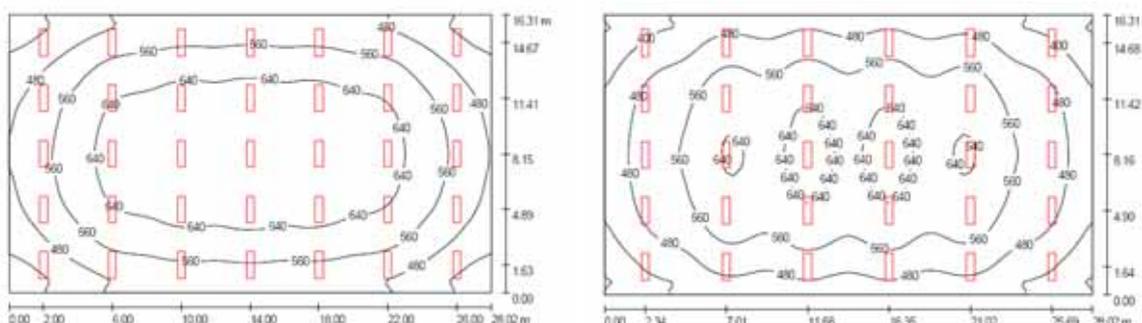


Abbildung 114: Leuchtenanordnung für eine Sporthalle mit erhöhter Anforderung an die Beleuchtungsstärke. Mit der bezüglich Leuchtauswahl und –Anordnung optimierten Variante (links) konnte bei gleichmäßigerer Beleuchtung die erforderliche installierte Lampenleistung um rund 30 % verringert werden. Der spezifische Anschlusswert erreicht den sehr guten Wert von 2,2 W/(100 lx m²). Einfachsporthalle in Reichelsheim.
Elektroplanung: Ing.-Arbeitskreis Stefan, Friedberg.

Zur Nutzung dieser Potentiale bei der Lichtplanung wird empfohlen für die künstliche Beleuchtung frühzeitig Ziel- und Grenzwerte mit dem Planer zu vereinbaren (vgl. Tabelle 11). Wie Erfahrungen in Schulprojekten zeigen, können diese Vorgaben in der Praxis sogar noch unterschritten werden (vgl. [Bretzke 2006]). Die Stadt Frankfurt fordert entsprechend für kommunale Gebäude strengere Werte (2,0 bis 2,5 W/(100 lx m²) (vgl. [Linder 2009]).

Tabelle 11: Planungsempfehlungen für die spezifische installierte Leistung der Beleuchtung

	Empfehlung für Grenzwert bei 300lx	Empfehlung für Zielwert bei 300lx
SIA 380/4, Elektrische Energie im Hochbau [SIA 380/4]	9 W/m ²	6,5 W/m ²
Leitfaden Elektrische Energie im Hochbau [LEE]	9,8 W/m ²	7,2 W/m ²

9.2 Weitere Stromanwendungen

Häufig hören Anstrengungen zur Stromeinsparung bei der Beleuchtung auf. Doch auch in anderen Bereichen kann es sich lohnen, nach Optimierungsmöglichkeiten zu suchen. In Schulen z.B. haben inzwischen zahlreiche EDV-Anwendungen Einzug gefunden. Klassen verfügen regelmäßig über ein bis zwei EDV-Arbeitsplätze zum recherchieren und arbeiten. Weiterhin werden verstärkt „Whiteboards“ als Alternative oder Ergänzung zur Schultafel im Unterricht eingesetzt und in Pilotprojekten arbeiten ganze Klassen an Laptops.

Abbildung 115 zeigt für Stromanwendungen in einem Klassenraum typische Werte zum Strombedarf. Dargestellt ist die Bandbreite von effizienten Anwendungen bis zur mäßigen Effizienz. Überraschend fällt der Strombedarf der „Whiteboards“ auf. Wird ein Betrieb während der Schulunutzung angesetzt, dann liegt der Strombedarf dieser Anwendung höher als beim Kunstlicht. Beim Einsatz von Whiteboards sollten daher möglichst effiziente (und möglichst leise: Geräuschpegel kleiner 30 dB) Projektoren gewählt werden.

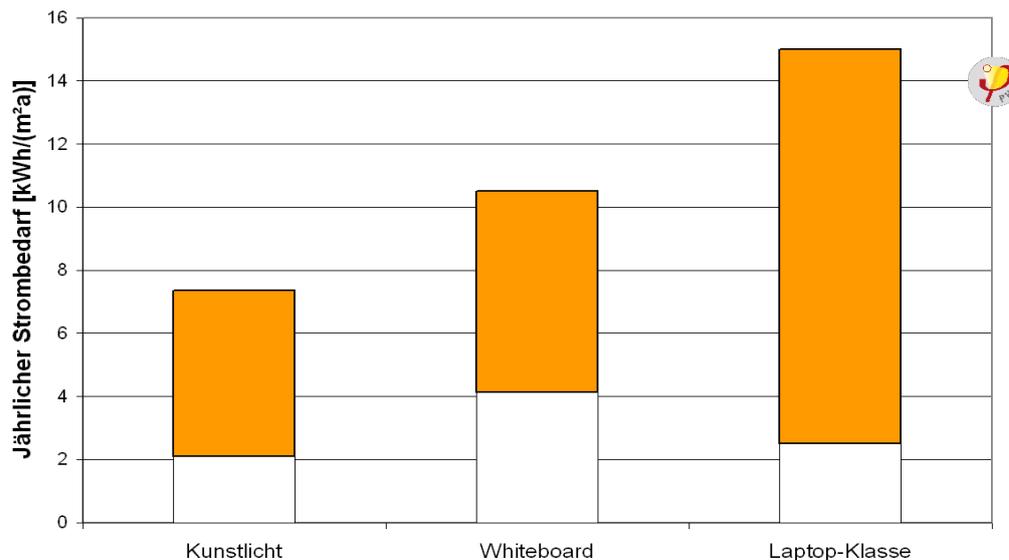


Abbildung 115: Strombedarf für typische Stromanwendungen in einem Klassenraum. Zur Berechnung wurden eine realistische Bandbreite der Leistungsaufnahmen und schultypische Betriebsstunden angesetzt. Die geringsten Werte gelten für effiziente Lösungen. Es mag überraschen, dass eine gute Tageslichtnutzung und eine effiziente Kunstlichtlösung vorausgesetzt, der Betrieb von „Whiteboards“ auf höhere Verbräuche führt. Auch bei der EDV-Ausstattung lohnt die Wahl von effizienten Geräten. (Quelle: PHI)

Weiterhin geben die folgenden Datenbanken einen guten Überblick zu energieeffizienten EDV-Geräten: z.B. www.ecotopten.de, www.office-topten.org, www.eu-energystar.org.

10 Energetische Bilanzierung

Zur Projektierung von energieeffizienten Gebäuden bedarf es zuverlässiger und praktikabler Methoden. Mit dynamischen Simulationen kann das Gebäudeverhalten und der spätere Energiebedarf sehr genau vorausberechnet werden. Die Auslegungsempfehlungen zu energieeffizienten Passivhaus-Bildungsgebäuden wurden anhand von systematischen dynamischen Simulationsrechnungen ermittelt. Für die tägliche Planungspraxis sind diese Werkzeuge zu zeitaufwendig und aufgrund der Komplexität nicht empfehlenswert. Vielmehr sollten stationäre Energiebilanzverfahren verwendet werden, da auch diese ausreichend genaue Ergebnisse liefern.

Die Wärmebilanz des Gebäudes ist das zentrale Planungshilfsmittel für energieeffiziente Gebäude. Sie sollte bereits vom ersten Entwurf an die Planung begleiten und muss entsprechend des Planungsfortschritts detailliert werden. Das Passivhaus-Projektierungspaket (vgl. [PHPP]) hat sich als Planungshilfsmittel für energieeffiziente Gebäude bewährt.

Hinsichtlich der Fenster, sollten die konkreten Kennwerte spätestens bei der Detailplanung vervollständigt werden, denn die Fensterflächen sind nun bekannt, die Einbaudetails sind bzw. werden gezeichnet und verschiedene Produkte müssen jetzt miteinander verglichen werden (U_f -Werte, Ψ -Werte von Rahmen und U_g -Werte und g -Werte der Verglasungen und Einbau- Ψ -Werte). Mit dem Passivhaus-Projektierungspaket ist eine detaillierte Berücksichtigung dieser Produkteigenschaften und der tatsächlichen Verschattungssituation möglich.

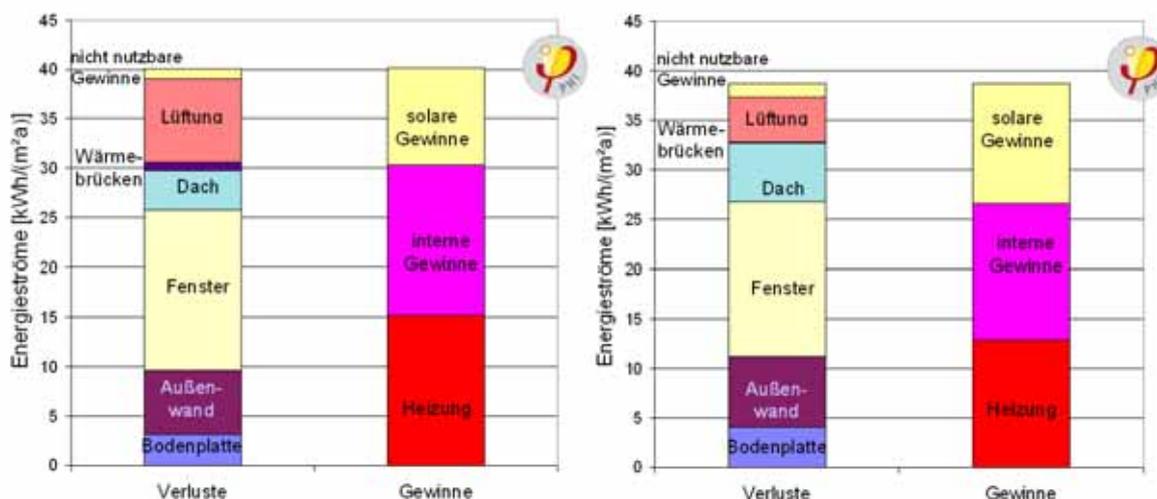


Abbildung 116: Jahres-Heizwärmebilanz nach EN 832 einer exemplarischen Schule (links) und einer Einfachsporthalle (rechts) mit Passivhaus-Standard. Interne Gewinne und solare Gewinne decken über 60 % der Wärmeverluste. (Quelle: PHI)

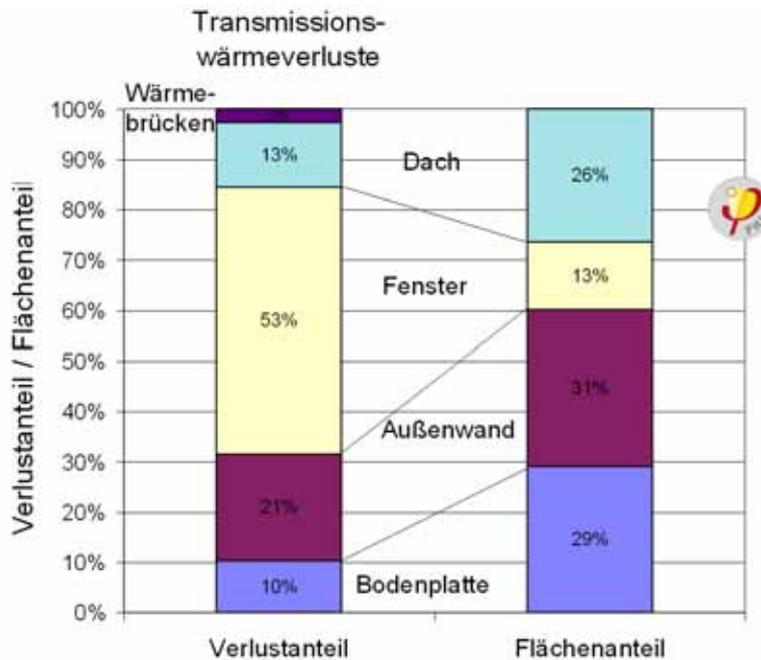


Abbildung 117: Transmissionswärmeverluste durch die einzelnen Bauteile im Vergleich zu deren Flächenanteil am Beispiel einer Passivhaus-Schule. Trotz der guten Dämmwerte der Passivhaus geeigneten Fenster ($U_w \leq 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) ist deren Verlustanteil im Vergleich zu opaken Bauteile (U -Werte $0,10 \dots 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) immer noch sehr viel höher. Bei der Beispielschule sind 13 % der Bauteilfläche für 53 % der Wärmeverluste verantwortlich. (Quelle: PHI)

Für die Projektierung von Passivhaus-Bildungsgebäuden wurden anhand von systematischen Simulationsrechnungen Randbedingungen für das Passivhaus-Planungstool [PHPP 2007] bestimmt (vgl. Tabelle 12 und Tabelle 13). Während in Klassenräumen und Gruppenräumen von Kindertagesstätten konzentriert hohe innere Lasten (bis $50 \text{ W}/\text{m}^2$) auftreten, sind die zeitlichen und über das Gebäude gemittelten Durchschnittswerte mit $2,8 \text{ W}/\text{m}^2$ (vgl. auch [Kah 2006]) nicht weit von den Werten der Wohnnutzung (ca. $2,1 \text{ W}/\text{m}^2$) entfernt.

Aufgrund der zeitlich begrenzten Nutzung sollte in Bildungsgebäuden ein Temperaturabsenkbetrieb vorgesehen. Für Schulen und Kindertagesstätten sind in Tabelle 14 Korrekturterme für die Innentemperatur in Abhängigkeit von der Betriebszeit angegeben. Für Sporthallen hingegen sind in Tabelle 13 bereits, typische Temperaturabsenkzeiten und Innentemperaturen berücksichtigt. Die dargestellten Randbedingungen (Innentemperatur und internen Gewinne) zur energetischen Bilanzierung sind Durchschnittswerte für die Heizzeit und jeweils das gesamte Gebäude. Im Sporthallenbereich wird eine Solltemperatur von 18 °C angesetzt, welche einer gebräuchlichen Betriebsweise entspricht (Empfehlung gemäß [AMEV 2001] 17 °C und Normung zu Sportstätten [DIN 18032-1] 20 °C). Eine Solltemperatur von 22 °C wird in den Duschen und Umkleiden angenommen (vgl. auch [AMEV 2001], [DIN 18032-1]).

Tabelle 12: Randbedingungen und Kriterien für die Projektierung von Passivhaus-Sporthallen mit dem [PHPP 2007]
EBF: Energiebezugsfläche gemäß [PHPP 2007]

Randbedingungen:	Schulen / Kindertagesstätten
Innentemperatur:	20°C
Interne Gewinne:	2,8 W/(m ² EBF)
Passivhaus-Kriterien	
Energiekennwert Heizwärme	max. 15 kWh/(m ² EBF a)
Drucktestluftwechsel n50	max. 0,6 h ⁻¹
Energiekennwert gesamte Primärenergie	max. 120 kWh/(m ² EBF a) inkl. aller Stromanwendungen

Tabelle 13: Randbedingungen und Kriterien für die Projektierung von Passivhaus-Sporthallen mit dem [PHPP 2007]
EBF: Energiebezugsfläche gemäß [PHPP 2007]

Randbedingungen:	Sporthallen
Innentemperatur:	18°C
Interne Gewinne:	2,8 W/(m ² EBF)
Passivhaus-Kriterien	
Energiekennwert Heizwärme	max. 15 kWh/(m ² EBF a)
Drucktestluftwechsel n50	max. 0,6 h ⁻¹
Energiekennwert gesamte Primärenergie	max. 120 kWh/(m ² EBF a) inkl. aller Stromanwendungen

Ein Temperaturabsenkbetrieb in Bildungsgebäuden schlägt sich durch eine geringere mittlere Raumtemperatur gegenüber der Solltemperatur nieder. In der Projektierung kann der Absenkbetrieb durch einen Temperaturabschlag berücksichtigt werden. Die Abschläge wurden mit Hilfe von dynamischen Gebäudesimulationen in der Kernheizzeit berechnet. Für Leichtbau und Massivbau ergeben sich vergleichbare Korrekturterme.

Tabelle 14: Ermittlung der mittleren Raumtemperatur für Schulen und Kindertagesstätten zur energetischen Bilanzierung mit dem [PHPP]. $T_{\text{mittel}} = T_{\text{soll}} + \Delta\theta$

Betriebszeit an Werktagen	7:00 bis 14:00	7:00 bis 16:00	7:00 bis 18:00
Temperatur-Korrekturterme $\Delta\theta$	-1,0 K	-0,8 K	-0,6 K

11 Anhang

11.1 Messkampagne in einer Grundschule zur Feinstaubbelastung

Die Feinstaubbelastung steht verstärkt in den letzten Jahren in der öffentlichen Diskussion. Ein Grund hierfür war die Umsetzung der EU-Richtlinie 96/62/EG zur Feinstaubbelastung in der Außenluft, woraufhin auch vermehrt Messungen in Innenräumen und insbesondere in Schulen durchgeführt wurden. Aufgrund der unterschiedlichen Quellen der Feinstaubpartikel innen und außen sind sie in ihrer Wirkung nicht direkt vergleichbar. Die konkrete Gefährdung durch Feinstaubpartikel im Innenraum ist noch in der Diskussion, wobei die Innenraumlufthygiene-Kommission des UBA feststellt, „dass erhöhte Feinstaubkonzentrationen in Innenräumen hygienisch unerwünscht sind... Eine Verringerung der Staubkonzentrationen der Luft dient damit der Vorsorge vor vermeidbaren Belastungen.“

Feinstaub ist ein Sammelbegriff für luftgetragene Partikel aus unterschiedlichsten Quellen. Das konkrete Gefährdungspotential ergibt sich dabei aus der Beschaffenheit, aber auch aus der Größe der Partikel. Feine Partikel werden von den Schleimhäuten im Nasen/Rachenraum nur bedingt zurückgehalten und gelangen so in die Atemwege, feinste Partikel bis in die Lungenbläschen.

Aufgrund von hohen Feinstaubbelastungen in Frankfurter Schulen wurde, z.B. das Reinigungsintervall in den städtischen Schulen erhöht, mit spürbaren Auswirkungen für den städtischen Etat.

Im Rahmen dieses Leitfadens wurde eine sechswöchige Messkampagne zur Raumlufbelastung in zwei Klassenräumen einer Grundschule in Innenstadtlage durchgeführt. Mit dem Ziel, unterschiedliche Lüftungsstrategien zu untersuchen, wurde jeweils in einem Klassenraum manuell, und in einem mittels Lüftungsanlage gelüftet. Hierzu wurde eine Schule gewählt, die über eine kontrollierte Lüftung verfügt, und ein Klassenraum wurde durch Abkleben der Lüftungsventile präpariert.

Jeweils in der präparierten Klasse wurden die Lehrer in diesem Zeitraum von drei Wochen gebeten, konventionell über Fenster zu lüften. Im zweiten Klassenraum blieb die Lüftungsanlage in Betrieb. Lediglich der Außenvolumenstrom wurde gezielt variiert.

Die Feinstaubkonzentration wurde hierfür kontinuierlich in den zwei Klassen und in der Außenluft ermittelt. Die eingesetzten Feinstaubmonitore messen auf Basis eines Streulichtverfahrens (vgl. Abschnitt 11.1.2) die Partikelanzahl. Die Umrechnung auf Massenkonzentration erfolgte nach dem Verfahren des Herstellers.

Im Zentrum der Feinstaub-Untersuchung stand vor allem der Einfluss der kontrollierten Lüftung auf die resultierenden Partikelkonzentrationen. Untersuchungen in Wohngebäuden deuten darauf hin, dass sich der Einsatz von Lüftungsanlagen positiv auswirkt. Grundsätzlich beeinflussen zwei Mechanismen die Partikelkonzentrationen im Innenraum:

- Einerseits werden in der Außenluft enthaltene Feinstaubpartikel mit der ausgetauschten Luft in den Raum eingetragen. Dies gilt vor allem für feinere Partikelfractionen ($PM_{2,5}$), da deren Quellen überwiegend im Außenbereich liegen. Bei der mechanischen Lüftung verringert das vorgeschaltete Außenluftfilter den Staubeintrag von außen. Dies ist ein klarer Vorteil gegenüber der Fensterlüftung. [Riley et al. 2002] zeigte für Wohnräume, dass lediglich bei Verwendung von Lüftungsanlagen mit einem sehr geringen Anteil an Außenpartikeln an der Innenraumluftbelastung gerechnet werden kann.
- Andererseits kann durch Lüften eine hohe Feinstaub-Innenkonzentration durch Außenluft verdünnt werden, sofern die Außenkonzentrationen geringer sind. Dies ist bei den eher größeren Partikelfractionen der Fall. [Gabrio/Volland] stellt fest, dass ausreichendes Lüften einen deutlichen Einfluss auf die Feinstaubbelastung in Klassenzimmern hat. Da der Außenluftwechsel bei mechanischer Lüftung in der Praxis immer höher ist als bei Fensterlüftung, ist zu erwarten, dass auch hier die Lüftungsanlage vorteilhaft ist.

11.1.1 Messergebnisse

Während dem Unterricht nimmt die Feinstaubkonzentration der Massenfraktion PM_{10} zu und erreicht Werte deutlich oberhalb der Außenkonzentration. Die im Messzeitraum an Schultagen über die Unterrichtszeit bestimmten PM_{10} -Medianwerte bewegten sich zwischen $30,6$ und $182,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Median $80,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Für die Massenfraktion $PM_{2,5}$ ergeben sich Tagesmediane zwischen $4,5$ und $36,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit einem Median von $15,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die gemessenen Werte sind vergleichbar mit Ergebnissen aus anderen Messkampagnen. [Fromme et al. 2006] bestimmte PM_{10} -Tagesmediane in einer Grundschule zwischen $16,3$ und $313 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Median $91,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) bzw. für die Massenfraktion $PM_{2,5}$ von $2,5$ bis $79,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Median $26,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). In Frankfurter Schulen wurden von [Heudorf 2006] PM_{10} -Tagesmediane zwischen 35 und $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ermittelt.

Die Tagesmediane der Feinstaubkonzentration in der Außenluft bewegten sich im untersuchten Zeitraum für die Massenfraktion PM_{10} zwischen $2,7$ und $47,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Median $26,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) bzw. im Bereich von $1,6$ bis $47,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Median $23,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) für die Fraktion $PM_{2,5}$.

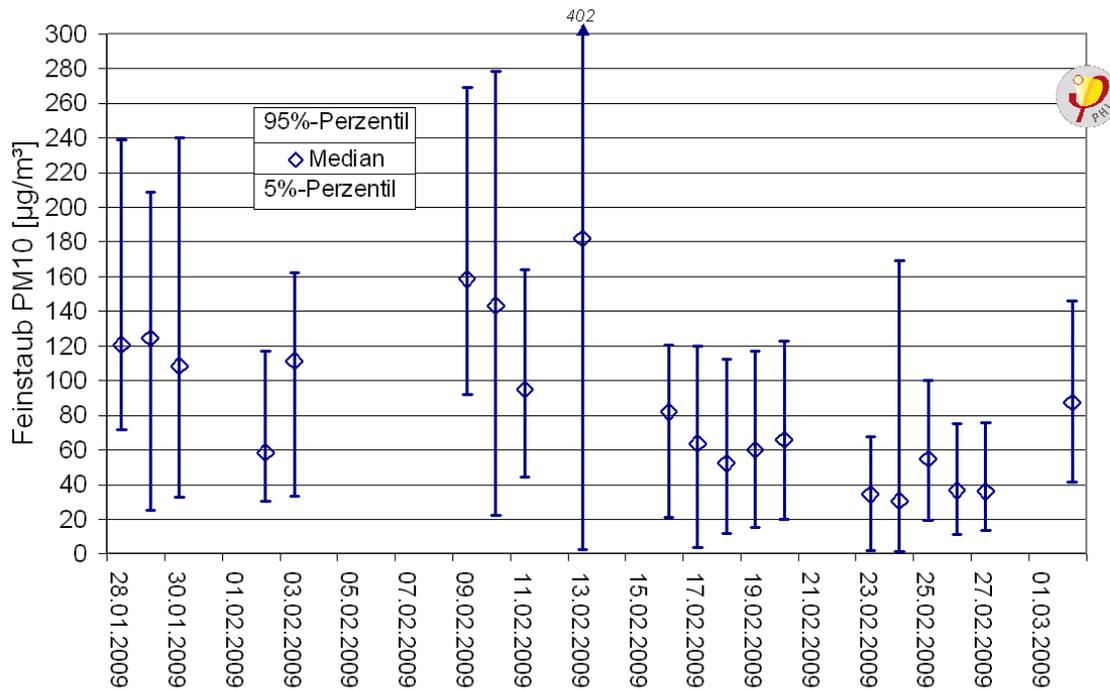


Abbildung 118: Messwerte zur Massenfraktion PM₁₀ in Klasse A. Die kontrollierte Lüftung wurde bis zum 16.2. außer Betrieb genommen. (Quelle: PHI)

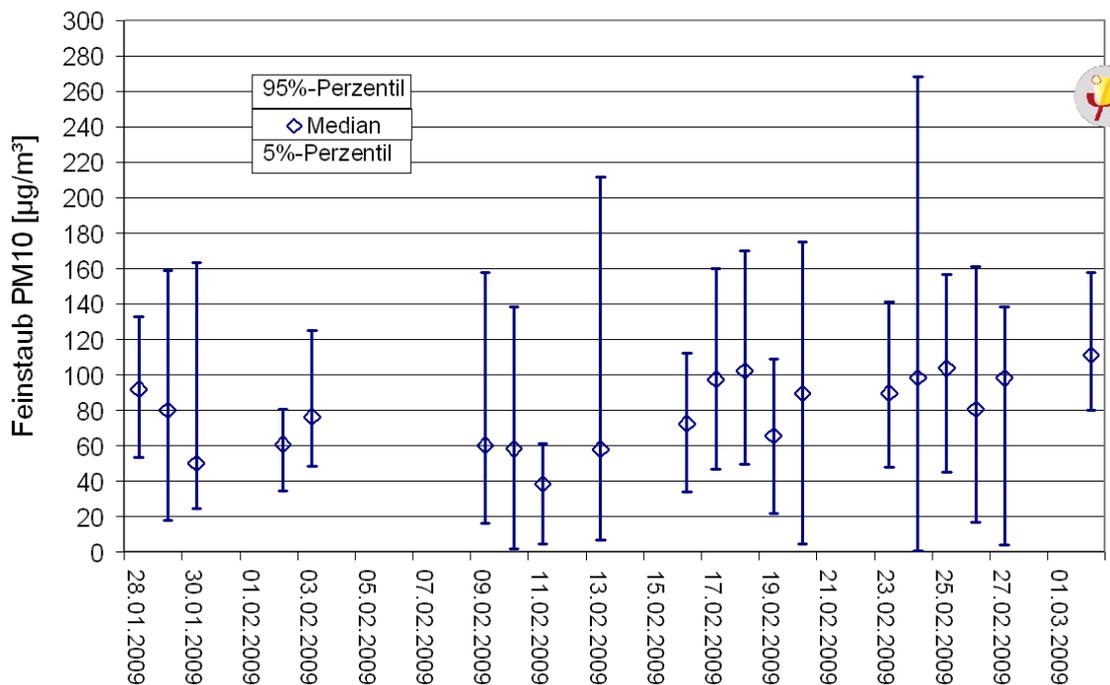


Abbildung 119: Messwerte zur Massenfraktion PM₁₀ in Klasse B. Die kontrollierte Lüftung wurde ab dem 16.2. außer Betrieb genommen. (Quelle: PHI)

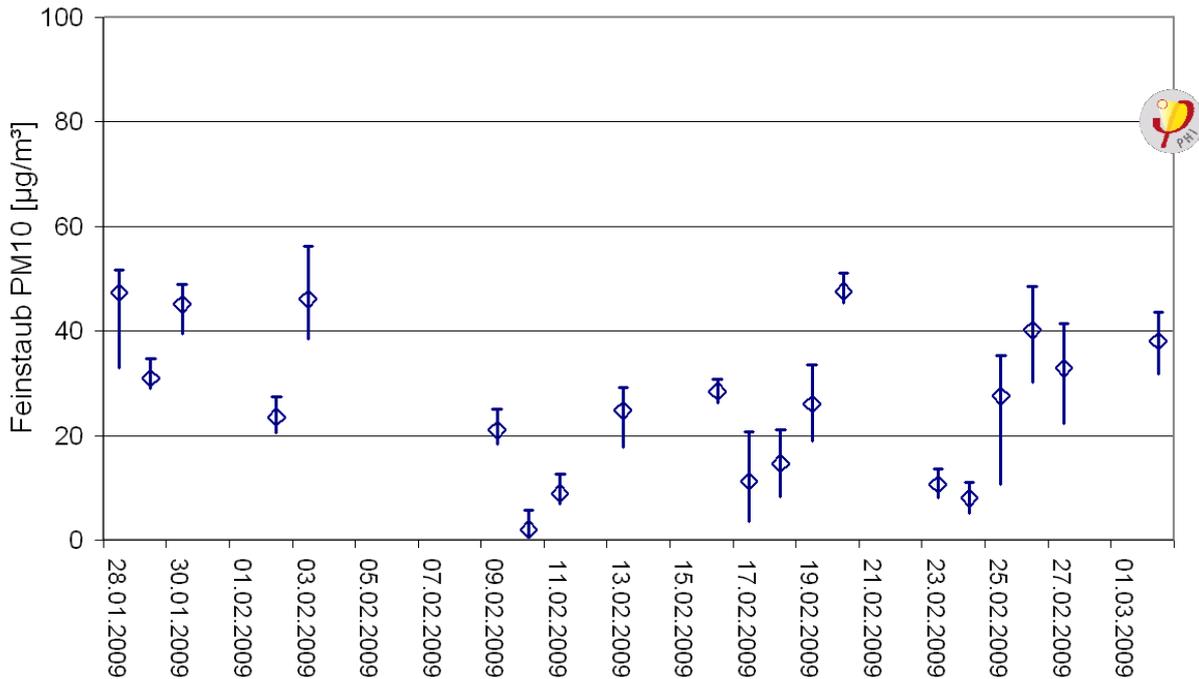


Abbildung 120: Messwerte zur Massenfraktion PM₁₀ der Außenluft im Messzeitraum (Quelle: PHI)

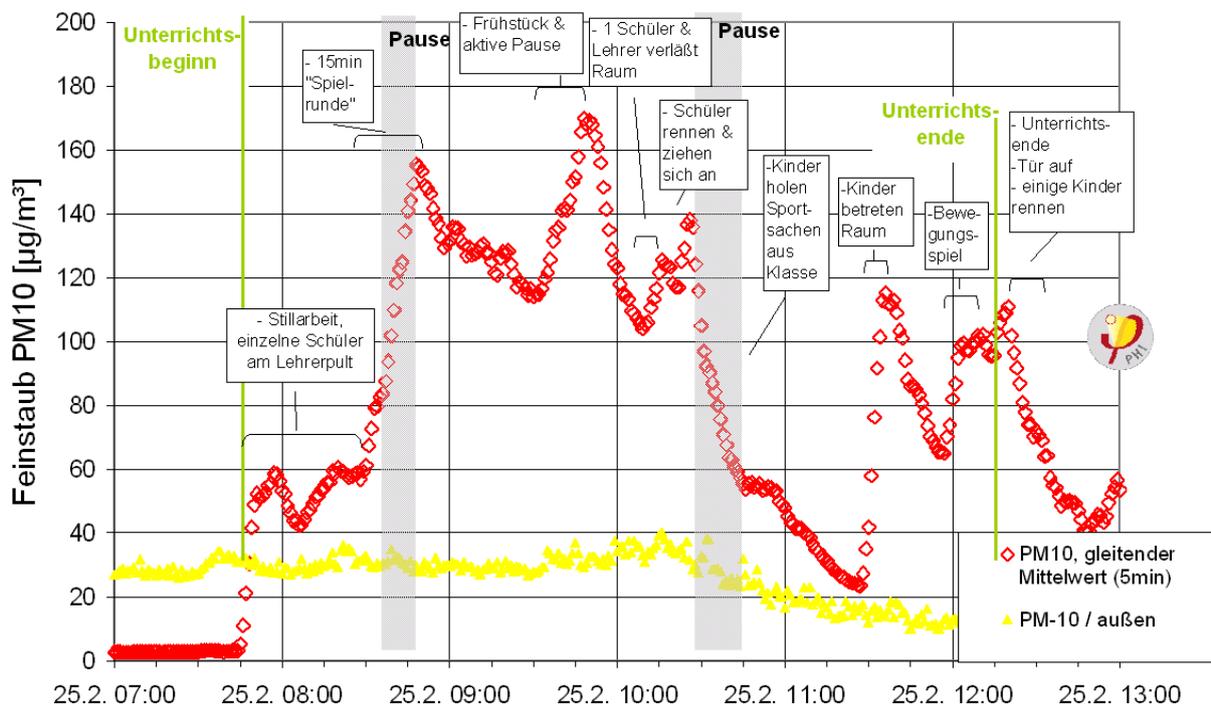


Abbildung 121: Verlauf der Massenfraktion PM₁₀ in einem Klassenraum. Die Massenfraktion korreliert mit der Aktivität der Schüler. (Quelle: PHI)

Massenfraktion PM₁₀

Zur Untersuchung des Einflusses der Lüftungsstrategie auf die Feinstaubkonzentration wurden die Daten nach Zeiträumen mit kontrollierter Lüftung und mit Fensterlüftung ausgewertet. Wie sich zeigte, war die Höhe und der Verlauf der Partikelkonzentrationen im Klassenraum in hohem Maße mit der Aktivität der Schüler korreliert (vgl. Abbildung 121). Grundschultypische Bewegungsspiele führten auf deutliche Konzentrationsspitzen der Massenfraktion PM₁₀.

Wie auch bei [Gabrio/Volland] und [Fromme et al. 2006] deuten die Messergebnisse auf einen signifikanten Einfluss der Lüftungsstrategie bzw. der Intensität der Lüftung auf die Massenfraktion PM₁₀ in den Klassen hin. Im Rahmen dieser Studie konnte darüber hinaus der Einfluss unterschiedlicher Lüftungsstrategien untersucht werden. Die mittleren Feinstaubstauergehalte (PM₁₀-Medianwerte) in den Zeitabschnitten mit kontrollierter Lüftung liegen zwischen 30 und 50 % unter den Werten mit Fensterlüftung (vgl. Abbildung 122 und Abbildung 123). Eine Korrelationsanalyse bestätigt den vermuteten Zusammenhang zwischen Feinstaubkonzentration und Luftaustausch. Hierfür wurde für Zeiten mit Fensterlüftung der Luftaustausch anhand der Fensteröffnungszeiten und -konfiguration abgeschätzt. Die Korrelation zwischen Volumenstrom und mittleren Feinstaubgehalten (PM₁₀) ist ebenfalls signifikant ($R^2 = 49\%$; vgl. Abbildung 123)

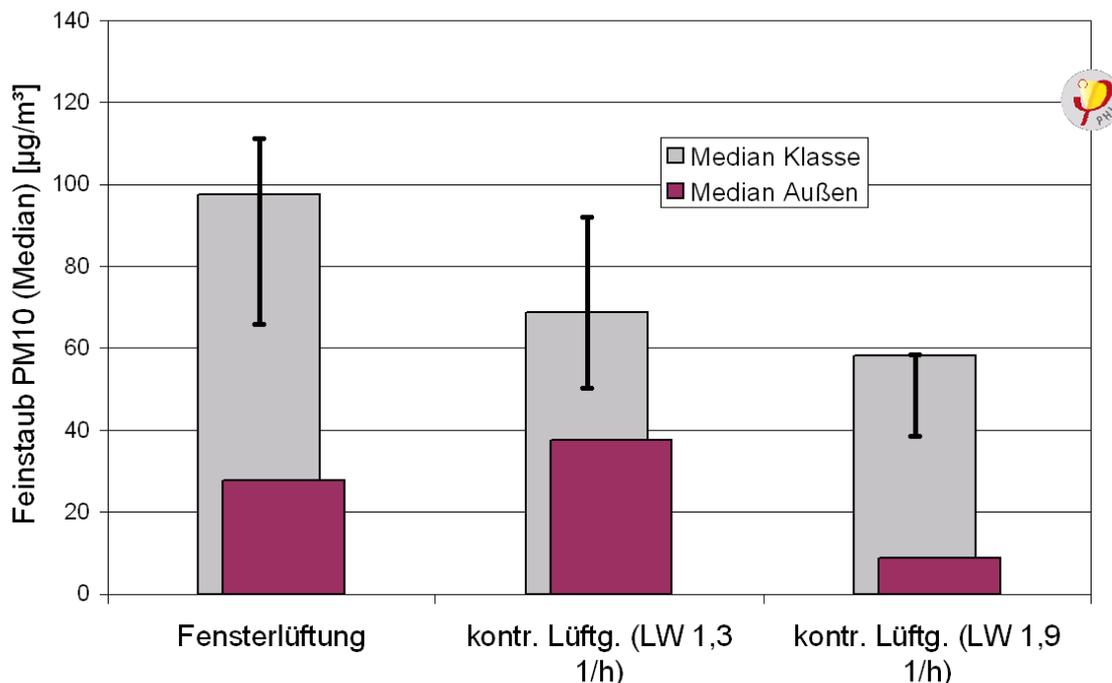


Abbildung 122: Tagesmediane der Feinstaubbelastung deuten auf einen deutlichen Einfluss der Lüftungsstrategie auf die Feinstaubbelastung hin. Die mittleren Tagesmediane in Klasse A liegen bei kontrollierter Lüftung um 30 % (Luftwechsel ca. $1,3 \text{ h}^{-1}$) bzw. 40 % (Luftwechsel ca. $1,9 \text{ h}^{-1}$) unter dem mittleren Tagesmedian bei Fensterlüftung. (Quelle: PHI)

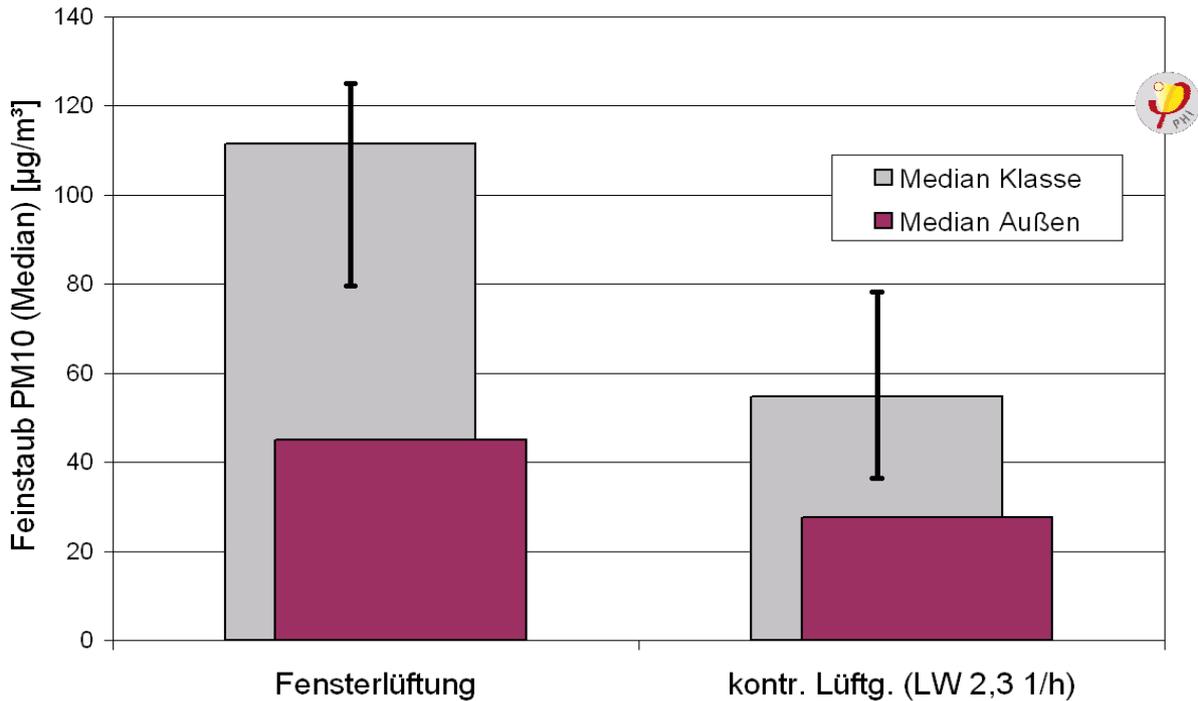


Abbildung 123: Tagesmediane der Feinstaubbelastung. Auch in Klasse B ergeben sich im Mittel signifikant verringerte Feinstaubbelastungen bei kontrollierter Lüftung. Gegenüber dem Zeitraum mit Fensterlüftung sind die mittleren Tagesmediane bei kontrollierter Lüftung (Luftwechsel ca. 2,3 1/h) sogar um 50 % verringert. (Quelle: PHI)

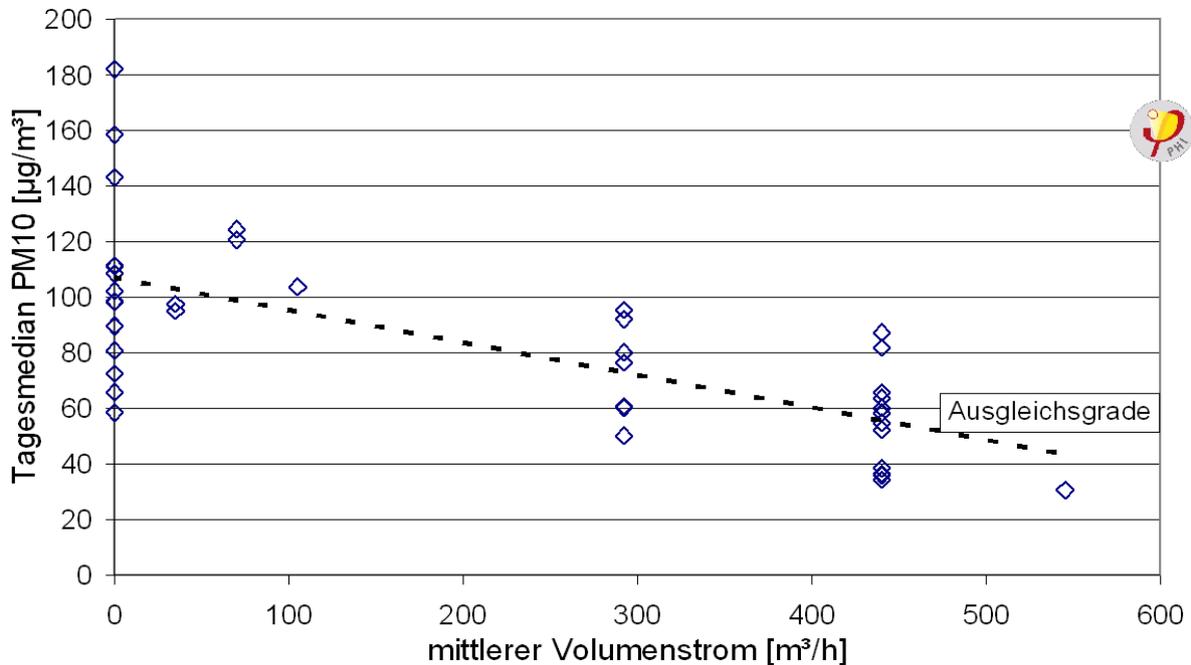


Abbildung 124: Einfluss des Außenluftaustauschs auf die Feinstaubbelastung im Innenraum. Die Messergebnisse deuten darauf hin, dass ein ausreichender Außenluftwechsel die Feinstaubbelastung im Innenraum verringert ($R^2 = 49\%$). Mittlere Volumenströme von 0 bis 100 m^3/h Klasse) sind der Fensterlüftung zuzuordnen, 290 und 440 m^3/h wurden in Zeiten mit kontrollierter Lüftung bereit gestellt. (Quelle: PHI)

Die Massenfraktion PM_{10} ist während dem Unterricht vermutlich maßgeblich durch die Aktivität der Schüler bestimmt. Zur genaueren Untersuchung der Senkenwirkung des Lüftens auf die Feinstaubgehalte wurde zusätzlich das Abklingen der Partikelkonzentrationen nach Schulschluss betrachtet. Die Anzahl der Einflussfaktoren kann auf diese Weise minimiert werden. Wie eine Auswertung der Abklingkurven der Massenfraktion PM_{10} zeigt, nimmt die Feinstaub-Konzentration bei Lüftungsanlagenbetrieb deutlich schneller ab (vgl. Abbildung 125), die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Lüftung für die Massenfraktion PM_{10} in den untersuchten Klassen der wesentliche Senkenprozess ist. Die Zeitkonstante des exponentiellen Konzentrationsabfalls verringert sich um etwa 70 % gegenüber dem Fall mit blockierter kontrollierter Lüftung und dem Sedimentieren als wesentlicher Senke. Die Beschleunigung des Konzentrationsabfalls steht dabei in guter Übereinstimmung mit einem Massenbilanzansatz, welcher eine Verdünnung der Innen- durch Außenluft berücksichtigt.

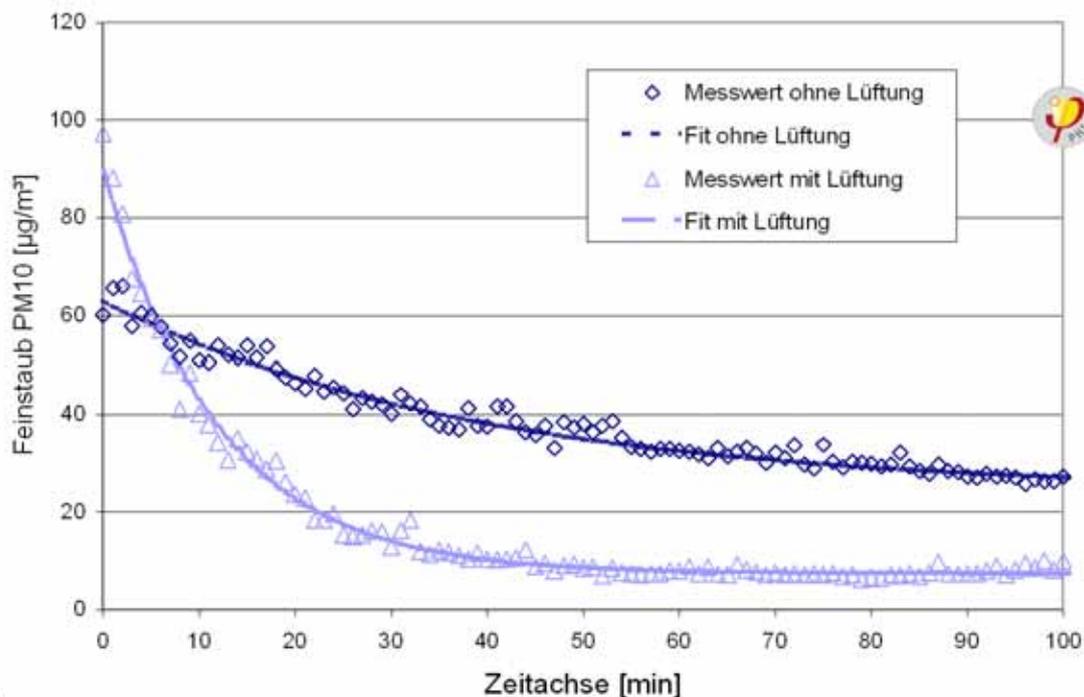


Abbildung 125: Abnahme der Massenfraktion PM_{10} nach Schulschluss mit und ohne Lüftung. Dargestellt sind zwei typische Konzentrationsverläufe. Mit der kontrollierten Lüftung wird der Konzentrationsabfall (PM_{10}) deutlich beschleunigt. Die Zeitkonstante der Abklingkurve wird um 70 % verringert. (Quelle: PHI)

Massenfraktion PM_{2,5}

Für Partikel der Massenfraktion PM_{2,5} deuten die Ergebnisse daraufhin, dass diese stark durch die Außengehalte bestimmt werden. Die Korrelationsanalyse weist auf einen signifikanten Zusammenhang hin ($R^2 = 64\%$; vgl. Abbildung 126). Weiterhin belegen die Messungen in den untersuchten Klassen in der Regel deutlich geringere Innen- als Außenkonzentrationen dieser Massenfraktion. Dies entspricht auch der Erwartung, da die wesentlichen Quellen der feinen Partikel im Außenbereich vermutet werden.

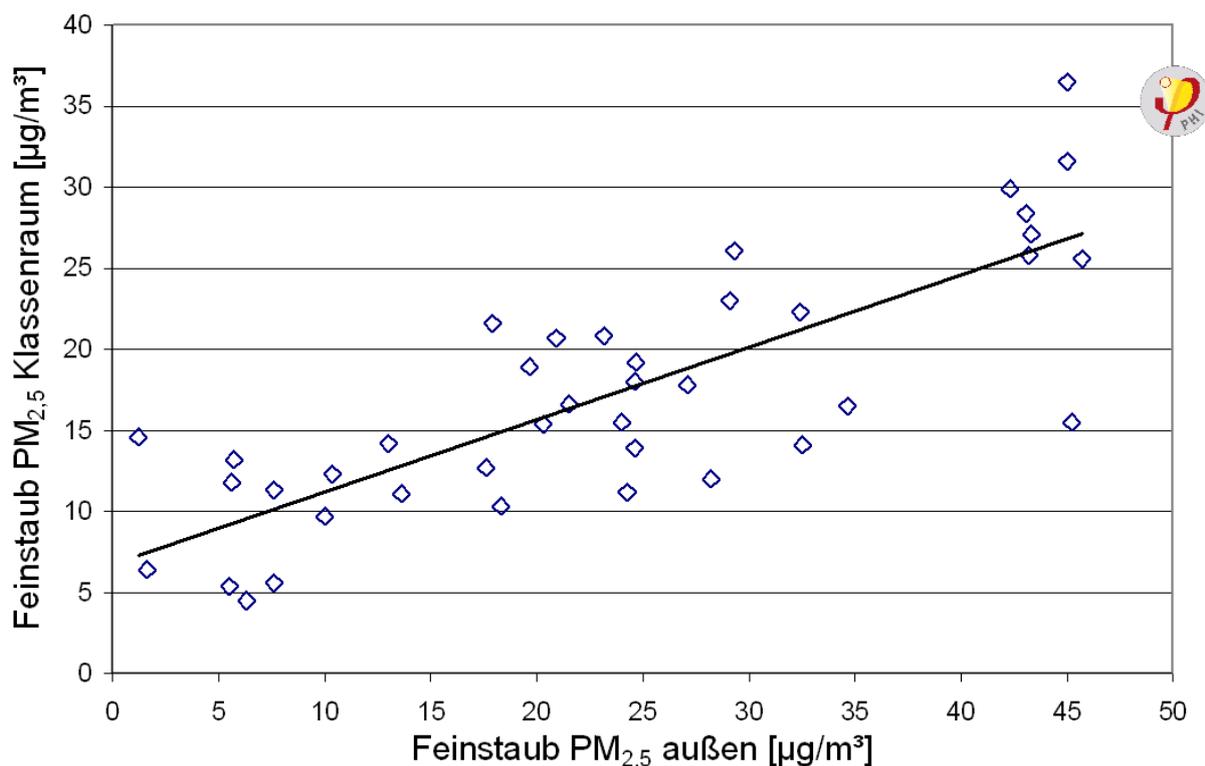


Abbildung 126: Korrelationsanalyse zwischen Innen und Außenkonzentration der Massenfraktion PM_{2,5}. Der Zusammenhang ist mit $R^2 = 64\%$ signifikant. (Quelle: PHI)

Der angenommene Einfluss der kontrollierten im Vergleich zur Fenster-Lüftung auf die Feinstaubgehalte (PM_{2,5}) konnte anhand der gemessenen Innenkonzentrationen nicht eindeutig geklärt werden. In der Lüftungsanlage erfolgt durch das Filtersystem eine Verringerung der feinen Partikel, allerdings wurde in den Zeiten mit Fensterlüftung deutlich weniger Außenluft ausgetauscht. Eine Abschätzung zum Luftaustausch bei Fensterlüftung auf Grundlage der Fensteröffnungsdauern und –konfiguration führt auf Außenluftvolumenströme, welche um über 70 % geringer sind als bei kontrollierter Lüftung.

In einer zusätzlichen Messung wurden daher die Feinstaubgehalte direkt in der Zuluft und in der Außenluft gemessen. Die Untersuchungen stützen die Vermutung, dass

das Lüftungssystem auch eine merkliche Filterwirkung hinsichtlich der Außen-Feinstaub-Konzentration aufweist. Bei Partikeln mit Durchmessern kleiner $2\ \mu\text{m}$ wurde eine Verringerung der Partikelkonzentration in der Zuluft gegenüber der Außenluft von rund 50 % beobachtet.

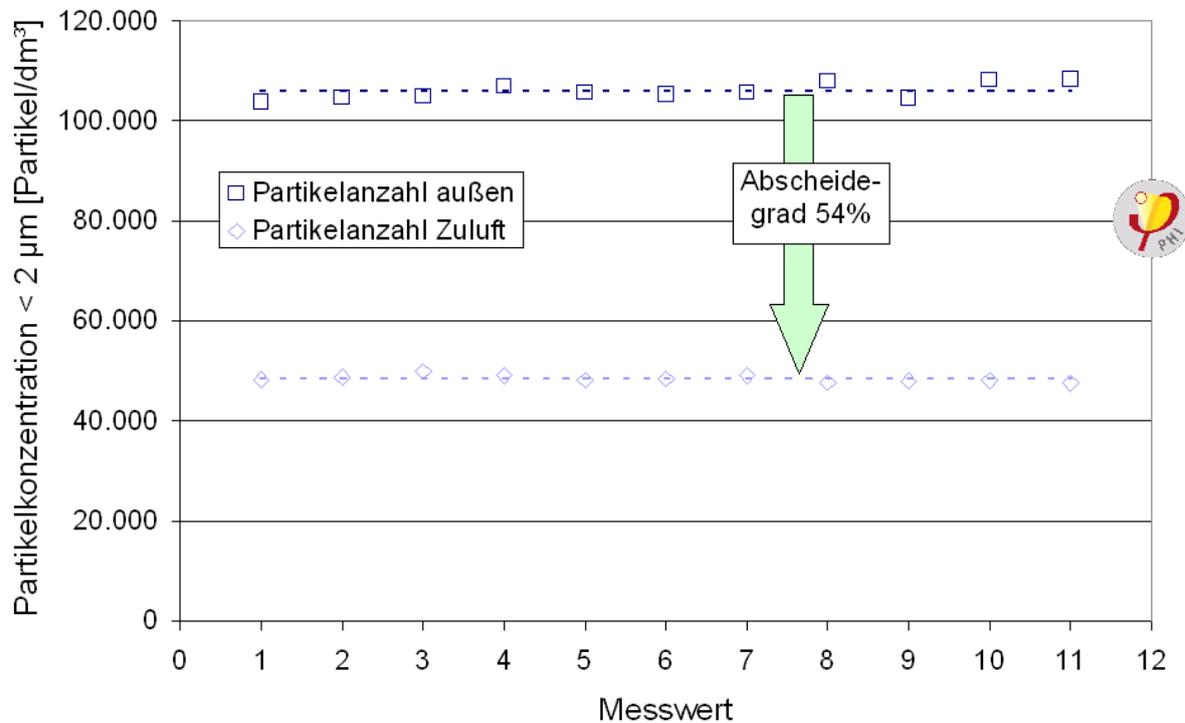


Abbildung 127: Untersuchung der Filterwirkung des Lüftungssystems. Die verringerte Partikelkonzentration in der Zuluft im Vergleich zur Außenluft deutet auf einen Abscheidegrad von rund 50 % hin. (Quelle: PHI)

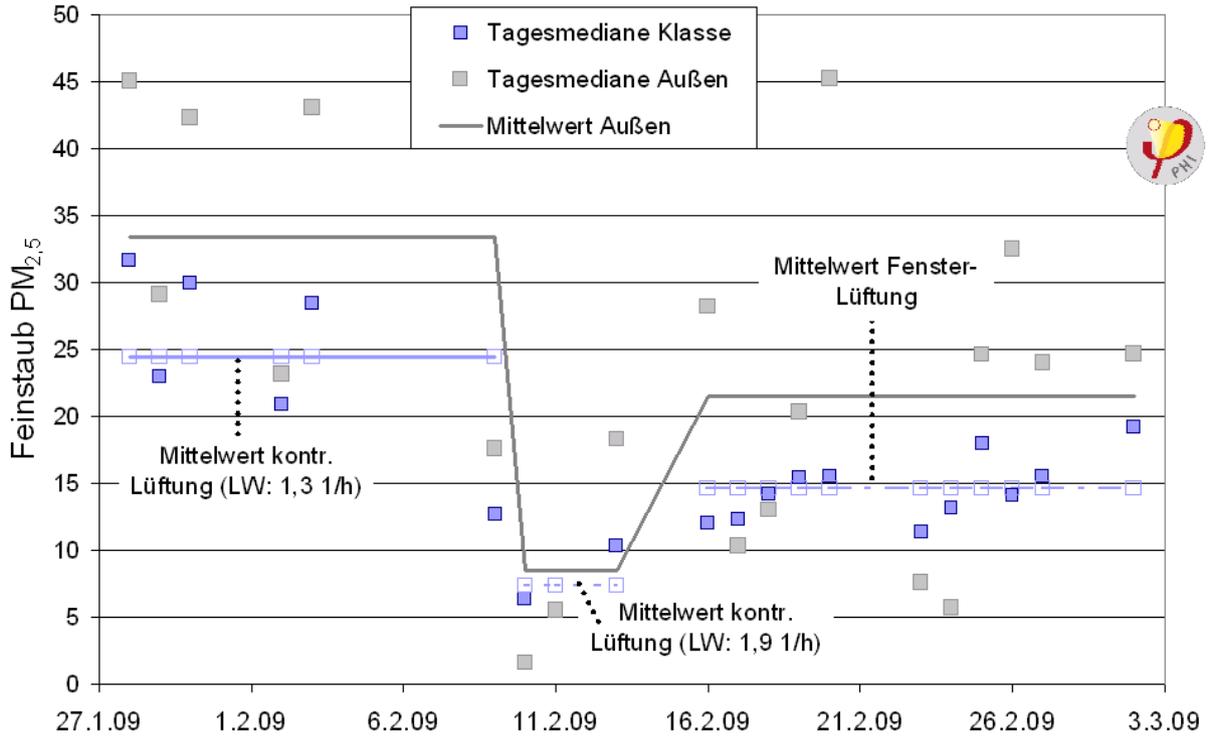


Abbildung 128: Verlauf der Massenfraktion $PM_{2,5}$ in Klasse A und außen. Für alle Lüftungsstrategien ist die Innenbelastung geringer als außen. Die wesentlichen Quellen der feinen Partikel werden auch im Außenbereich vermutet. Je nach Lüftungsstrategie liegt die Innenbelastung um 13 %, 28 % und 42 % unter der mittleren Außenbelastung. Zunächst mag überraschen, dass bei Fensterlüftung die Innen- die Außenbelastung mit 42 % am meisten unterschreitet. Dies kann mit dem extrem geringen Außenluftwechsel in diesem Zeitabschnitt erklärt werden. Der mit Hilfe der Fensteröffnungsdauern abgeschätzte Außenluftaustausch ist um über 70 % geringer als der maschinelle Außenluftaustausch. (Quelle: PHI)

Auf der Suche nach den Quellen

Die Messergebnisse legen die Vermutung nahe, dass die Schüler selbst maßgeblich die Feinstaubbelastung der Massenfraction PM_{10} beeinflussen (vgl. Abbildung 121). [Gabrio/Volland] gehen ebenfalls von einem nicht unerheblichen Beitrag der Schüler zur Feinstaubbelastung aus. Im Wesentlichen kommen hierfür zwei Prozesse in Frage: die Schüler selbst tragen Feinstaubpartikel (Eintrag z.B. von Hautschuppen, Papierstaub aus Heften, etc.) ein und die Aktivität der Schüler sorgt für eine Resuspension (Aufwirbeln) von bereits im Schulgebäude sedimentierten Partikeln. Um zu klären, ob ein maßgeblicher Beitrag durch Resuspension in die Raumluft gelangt, wurde die Raumluft außerhalb des Unterrichts mit einem Gebläse intensiv durchwirbelt. Wie sich zeigte, hatte auch ein 12-facher Luftwechsel im Klassenraum nur geringen Einfluss auf die Partikelkonzentration im Klassenraum (vgl. Abbildung 129). Die durchgeführten Versuche deuten darauf hin, dass die Feinstaubbelastung vor allem auf die Personen selbst zurückzuführen ist. Weitere Untersuchungen sollten die genauen Zusammenhänge klären.

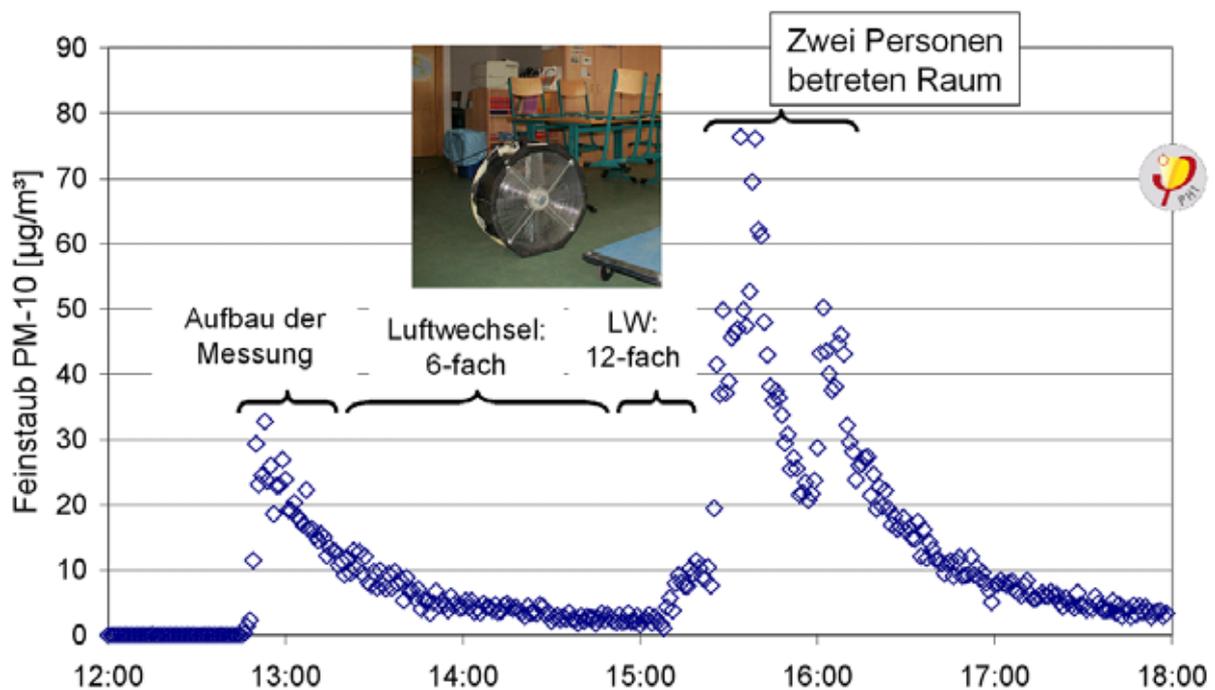


Abbildung 129: Einfluss der Resuspension von sedimentierten Partikeln in einem Klassenraum. Zur Überprüfung des Einflusses der Resuspension wurde mit einem Gebläse die Raumluft 6 bzw. 12-fach umgewälzt. Der Versuch deutet darauf hin, dass der Beitrag der Resuspension im untersuchten Klassenraum eher gering ist. Das Eintreten zweier Personen hingegen erhöhte die Feinstaub-Konzentration deutlich. (Quelle: PHI)

11.1.2 Feinstaub-Monitor

Die Feinstaubmessungen in der Luft wurden mit dem Partikel- und Staubmessgerät 1.108 der Firma Grimm ausgeführt. Das Messprinzip basiert auf einer Laser-Streulichtmessung.

Die Umrechnung der Messdaten auf Massenkonzentrationen erfolgte nach dem Verfahren des Herstellers.

Zählrate:	bis 2 000 000 P/l
Staubmasse [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]:	0,1...> 100 000
Reproduzierbarkeit:	5 % für gesamten Bereich
Größenbereich [μm]:	0,3...> 20
Größenkanäle [μm]:	15 / Partikelanzahl (0,23)/0,3/0,4/0,5/0,65/0,8/1/1,6/ 2/3/4/5/7,5/10/15/20 μm

11.2 Herleitung der Passivhaus-Anforderung bei Sporthallen

Sporthallen werden, wie viele Nichtwohngebäude, nur temporär genutzt. Der Betrieb der Lüftung sollte sich an den Nutzungszeiten orientieren, ein durchgängiger Betrieb kann hingegen - im Unterschied zum Wohnbau - den Primärenergiebedarf bzgl. Lüftung (Energiebedarf zur Deckung der Lüftungswärmeverluste und zum Betrieb der kontrollierten Lüftung) verdoppeln. Für eine Beheizung über eine Nacherwärmung der Zuluft bedeutet dies, dass auch die Beheizung an die Nutzungszeiten gekoppelt ist. Der Wärmeschutz einer Passivhaus-Sporthalle sollte so gut sein, dass eine Nacherwärmung der hygienisch erforderlichen Luftmengen für eine Beheizung ausreichend ist (im Unterschied zur Umluftheizung, welche regelmäßig in konventionellen Sporthallen eingesetzt wird). Diese Bedingung ist während der Nutzung leicht erfüllbar. Bei einem raumlufthygienisch erforderlichen Luftwechsel von etwa $0,7 \text{ h}^{-1}$ in der Halle und einer möglichen Erwärmung der Zuluft bis 50 °C können bis zu 33 W/m^2 Heizleistung in den Hallenbereich eingebracht werden. Kritischer hingegen ist die Wiederaufheizung nach einer Nachtabsenkung. Das Luftvolumen sollte vor Nutzungsbeginn etwa 2-fach ausgetauscht werden (vgl. [EN 15251]). Diese Vorspülphase ist hygienisch erforderlich und sollte zur Wiederaufheizung des Gebäudes nach einer Nachtabsenkung genügen. Daraus lässt sich die funktionale Definition einer Passivhaus-Anforderung für Sporthallen analog zum Schulbau (vgl. [Kah 2006, Kah 2006b]) ableiten:

Der Wärmeschutz einer Passivhaus-Sporthalle sollte derart sein, dass eine Beheizung und Wieder-Aufheizung über eine Nacherwärmung der Zuluft mit den hygienisch erforderlichen Luftmengen (inkl. Vorspülphase) möglich ist.

Der Hallenbereich ist zur Ableitung des Passivhaus-Kriteriums maßgeblich, da die Beheizbarkeit über die Zuluft hier deutlich kritischer ist als in den Umkleiden und Duschen. Zum Vergleich: in den Umkleiden/Duschen ist während der Nutzung ein 5 bis 10-facher Luftwechsel erforderlich, so dass in diesen Bereichen deutlich höhere über die Zuluft übertragbare Heizleistungen zur Verfügung stehen. Im Sporthallenbereich wird eine Solltemperatur von 18 °C angesetzt. Dieser Sollwert entspricht einer gebräuchlichen Betriebsweise und liegt zwischen den Empfehlungen der Normung zu Sportstätten mit 20 °C (vgl. [DIN 18032-1]) und der AMEV (vgl. [AMEV 2001]) mit 17 °C . Wie Abbildung 130 zeigt, wird bei Passivhaus-Qualität der Sporthalle mit Nutzungsbeginn die Solltemperatur erreicht; die ohnehin erforderliche Vorspülphase ist zur Wiederaufheizung nach der Nachtabsenkung ausreichend. Mit geringerem Wärmeschutz und daher höheren Heizwärmebedarfswerten, kann mit Nutzungsbeginn nicht immer die Solltemperatur über die Zuluftheizung erreicht werden (vgl. Abbildung 131).

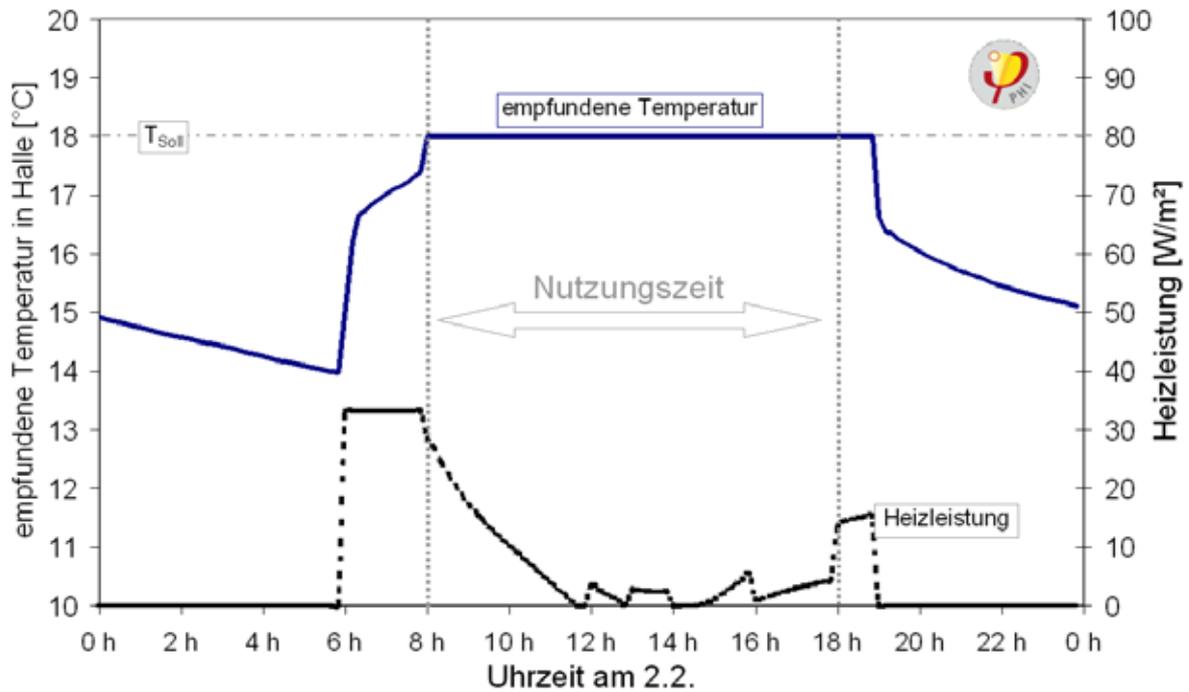


Abbildung 130: Verlauf der Raumtemperatur bei Aufheizung für typische Nutzung in einer Passivhaus-Sporthalle. (Quelle: PHI)

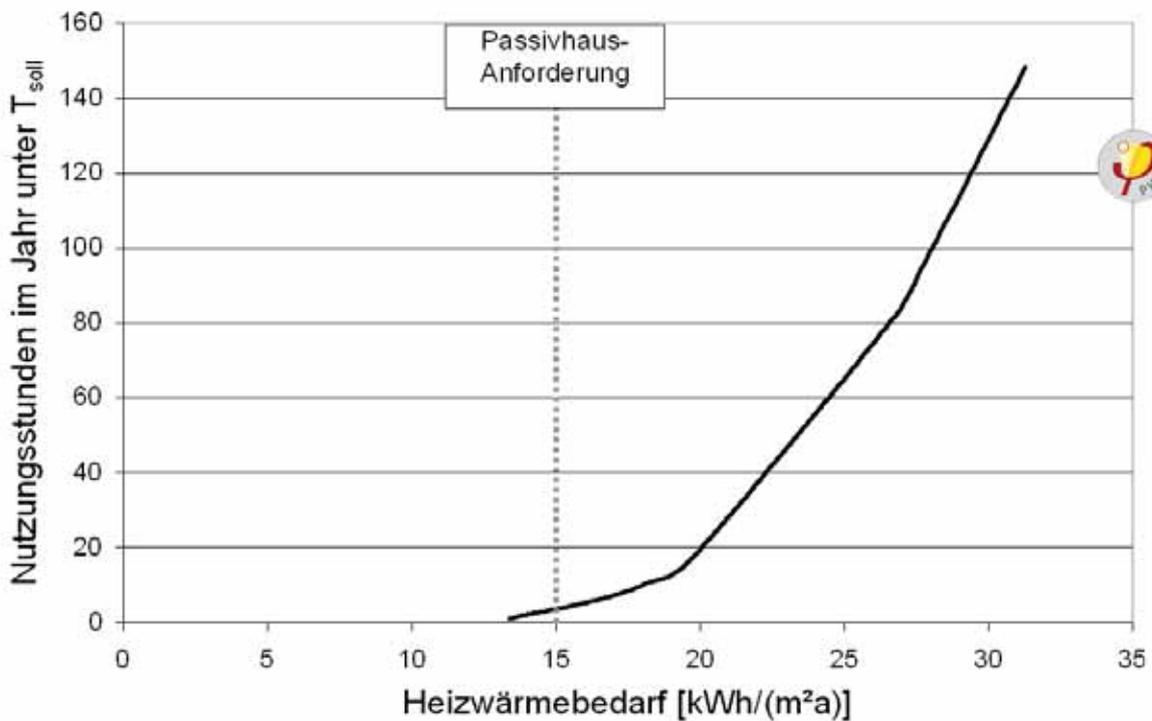


Abbildung 131: Dargestellt ist die Zunahme der Nutzungsstunden mit zu geringen Raumtemperaturen für zunehmende Heizwärme-Kennwerte. (Quelle: PHI)

Das Passivhaus-Konzept zielt auf eine Vereinfachung im Heizungssystem ab, welche durch einen ausgezeichneten Wärmeschutz ermöglicht wird. Folgerichtig wurde daher eine Beheizung über das im Passivhaus-Standard implizierte Lüftungssystem betrachtet. Eine Beheizung mit anderen Übergabesystemen wie z.B. Heizkörpern soll hier nicht Gegenstand sein, ist technisch aber immer auch möglich.

Tabelle 15: Randbedingungen

Solltemperatur im Hallenbereich während Nutzung	18°C
Vorspüldauer	2-facher Luftaustausch / 2 h Vorspüldauer
Zuluftstrom in Einfachturnhalle (30 Sportler)	30 x 60 m ³ /h = 1.800 m ³ /h
max. Temperaturhub ΔT / max. Heizleistung	30 K / ca. 33 W/(m ² Hallenfläche)

12 Literatur

- [AkkP 14]** „Optimierungsstrategien für Fensterbauart und Solarapertur“, Protokollband Nr. 37 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase IV, Passivhaus Institut, Darmstadt 2009.
- [AkkP 15]** „Passivhaus-Sommerfall“, Protokollband Nr. 15 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase II, Passivhaus Institut, Darmstadt 1999.
- [AkkP 16]** „Wärmebrückenfreies Konstruieren“, Protokollband Nr. 16 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase II, Passivhaus Institut, Darmstadt 1999.
- [AkkP 22]** „Lüftungsstrategien für den Sommer“, Protokollband Nr. 22 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase III, Passivhaus Institut, Darmstadt 2003.
- [AkkP 27]** „Wärmeverluste durch das Erdreich“, Protokollband Nr. 27 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase III, Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.
- [AkkP 29]** „Hochwärmegedämmte Dachkonstruktionen“, Protokollband Nr. 29 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase III, Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.
- [AkkP 32]** „Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten“, Protokollband Nr. 32 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase III, Passivhaus Institut, Darmstadt 2005.
- [AkkP 33]** „Passivhaus-Schulen“, Protokollband Nr. 33 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase III, Passivhaus Institut, Darmstadt 2006.
- [AkkP 35]** „Wärmebrücken und Tragwerksplanung“, Protokollband Nr. 35 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase IV, Passivhaus Institut, Darmstadt 2007.
- [AkkP 37]** „Passivhaus-Fenster“, Protokollband Nr. 14 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase II, Passivhaus Institut, Darmstadt 1998.
- [AkkP 39]** „Schrittweise Modernisierung mit Passivhauskomponenten“, Protokollband Nr. 39 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase IV, Passivhaus Institut, Darmstadt 2009.

- [Albrecht 2010]** Albrecht, W.: „Neue Wärmeleitfähigkeitsstufen und Leistungsfähigkeit neuer Dämmstoffe“ in Bauphysik 32 (2010), Heft 2, München 2010.
- [AMEV 2001]** „Hinweise für das Bedienen und Betreiben von heiz-technischen Anlagen in öffentlichen Gebäuden“ des Arbeitskreises Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV), Berlin 2001.
- [Bastian 2009]** „Schrittweise Modernisierung mit Passivhauskomponenten“, Protokollband Nr. 39 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase IV, hier: Beitrag von Zeno Bastian, Passivhaus Institut, Darmstadt 2009.
- [Bastian et al. 2010]** Bastian, Z., Feist, W., Baumgärtner, C., Ebel, W., Gollwitzer, E., Grove-Smith, J., Kaufmann, B., Krick, B., Schnieders, J., Schulz, T., Stärz, N., Schulze Darup, B.: „Altbaumodernisierung mit Passivhaus-Komponenten“, Passivhaus Institut, Darmstadt 2010.
- [Baumgärtner 2009]** Baumgärtner, C.: „Untersuchung von Betriebskosteneinsparungen am Beispiel einer Grundschule in Frankfurt/M.“, 13. Internationale Passivhaustagung, Frankfurt, Passivhaus Institut 2009.
- [Bermich/Lubs 2004]** Bermich, R., Lubs, P.: „Neubau einer Passivhaus-Turnhalle für die Kurpfalzschule in Heidelberg-Kirchheim“ in „Die energieeffiziente Sporthalle“, Hrsg. E.A. Spindler, C.F. Müller Verlag, Heidelberg 2004.
- [BG/GUV-SR]** BG/GUV-SR S2: „Regeln für Kindertageseinrichtungen“ Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, April 2009.
- [Bischof 2005]** Bischof, M., „Energetische und raumluftechnische Optimierung von Schulen“, Diplomarbeit, Fachhochschule Burgenland (A), Pinkafeld 2005.
- [BR 1995]** „Bygningsreglement 1995“, www.retsinfo.dk, Dänische Baurichtlinie.
- [Bretzke 2006]** Bretzke, A.: „Beleuchtungssanierung in 10 Schulen (Standards, internes Contracting)“ in „Gebäudeenergieeffizienz in Kommunen“, S. 115-131, Dokumentation des 12. Deutschen Fachkongresses der kommunalen Energiebeauftragten, Hrsg. Rösler/Deutsches Institut für Urbanistik, Berlin 2007.

- [Bretzke 2009]** Bretzke, A.: „Vorteile des Passivhaus-Standards am Beispiel Schulen (Wirtschaftlichkeit, Nutzerkomfort)“, 13. Internationale Passivhaustagung, Frankfurt, Passivhaus Institut 2009.
- [Chuard 1993]** Chuard, P.: „Beleuchtungstechnik für Schulen“, EMPA-KWH, CH-8600 Dübendorf.
- [DIN 18032-1]** „Sporthallen - Hallen und Räume für Sport und Mehrzwecknutzung - Teil 1: Grundsätze für die Planung“, Beuth Verlag, Berlin 2003.
- [DIN 1946-2]** „Raumluftechnik, Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln)“, Beuth-Verlag, Berlin Januar 1994.
- [DIN 4108-2]** „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz“, Beuth-Verlag, Berlin 2003.
- [DIN 58125]** „Schulbau - Bautechnische Anforderungen zur Verhütung von Unfällen“, Beuth Verlag, Berlin 2002.
- [DIN V 4108-4]** „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte“, Beuth Verlag, Berlin 2004.
- [ea-nrw 2003]** „Brennpunkt Energie 1/2003“, Energieagentur NRW, Wuppertal.
- [ECA 1992]** “Ventilation Requirements in Buildings”, European Collaborative Action – Indoor Air Quality & Its Impact On Man, ECA-Report No. 11, Commission of the European Communities, Joint Research Centre – Environment Institute, 1992.
- [EN 12524]** „Baustoffe und -produkte, Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte“, Beuth Verlag, Berlin 2000.
- [EN 15251]** „Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumlufqualität, Temperatur, Licht und Akustik“, Beuth Verlag, Berlin 2007.
- [EN 12464-1]** „Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen“, Beuth Verlag, Berlin 2002.
- [EN 13779]** „Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlage und

- Raumkühlsysteme“, Beuth Verlag, Berlin 2007.
- [EN ISO 13370]** „Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Wärmeübertragung über das Erdreich – Berechnungsverfahren (ISO 13370:2007)“, Beuth Verlag, Berlin 2007.
- [EN ISO 7730]** „Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD - Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005)“, Beuth Verlag, Berlin 2005.
- [Faustman et al. 2000]** Faustman, E.M., Silbernagel, S.M., Fenske, R.A., Burbacher, T.M., Ponce, R.A.: “Mechanisms underlying children's susceptibility to environmental toxicants”, Environmental Health Perspectives Supplements Vol.108, Nr. S1:13-21, 2000.
- [Feist 2004]** „Hochwärmegedämmte Dachkonstruktionen“, Protokollband Nr. 29 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase III, hier: Beitrag von W. Feist, Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.
- [Feist 2005]** Feist, W.: „Heizlast in Passivhäusern - Validierung durch Messungen“, IEA SHC TASK 28 / ECBCS ANNEX 38, Endbericht, Passivhaus Institut, Darmstadt 2005.
- [Feist/Werner 1994]** Feist, W., Werner, J.: „Der Energieverbrauch im Passivhaus“, Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1994.
- [FLUENT]** ANSYS FLUENT Flow Modeling Software, ANSYS Inc. US.
- [Fromme et al. 2006]** Fromme, H., Dietrich, S., Kiranoglu, M., Twardella, D.: „Frische Luft an bayrischen Schulen“, vorläufige Zusammenfassung, Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, Oberschleißheim 2006.
- [Gabrio/Volland]** Gabrio, T.¹, Volland, G.²: „Feinstaubbelastungen in Schulen“
¹Regierungspräsidium Stuttgart, Landesgesundheitsamt /
²Materialprüfungsanstalt, Universität Stuttgart.
- [Grams et al. 2002]** Grams H., Hehl O., Dreesmann, J.: „Niedersächsisches Schulmessprogramm“, Niedersächsisches Landesgesundheitsamt, Hannover 2002 / 2004.
- [GUV-V S 1]** „Unfallverhütungsvorschrift Schulen“, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Juni 2002.

- [GUV-V S 2]** „Unfallverhütungsvorschrift Kindertageseinrichtungen“, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, April 2009.
- [HBO 2003]** „Hessische Bauordnung (HBO)“, Juni 2003.
- [Hehl / Grams 2003]** Hehl, O., Grams, H.: „Ein Modell zur Simulation der Qualität der Innenraumluft am Beispiel von CO₂“, Niedersächsisches Landesgesundheitsamt, Hannover 2003.
- [Heudorf 2006]** Heudorf, U.: „Innenraumklima in Schulen“, Stadtgesundheitsamt Frankfurt, Frankfurt 2006.
- [Himmelsbach 2005]** Himmelsbach, M.: „Intelligente Technik. Deckenstrahlplatten für Energie sparende und behagliche Hallenbeheizung“, Haustechnik IKZ, Hamburg 2005.
- [HMUE 1993]** „Passivhaus Darmstadt Kranichstein. Dokumentation.“, Hrsg. Hessisches Ministerium für Wirtschaft / Hessisches Ministerium für Umwelt, Wiesbaden, 1. Aufl. 2/91; 3. Auflage 10/93.
- [ILAT 2002]** „Innenraumlufthygienqualität in Berliner Schulen“, Institut für Lebensmittel, Arzneimittel und Tierseuchen Berlin (ILAT) sowie Landesamt für Arbeitsschutz, Gesundheitsschutz und technische Sicherheit Berlin, Berlin 2002.
- [IRK 2007]** „Stellungnahme der Innenraumlufthygiene-Kommission zu Feinstäuben in Wohnräumen und Schulen vom 30.9.2007“, Innenraumlufthygiene-Kommission (IRK) des UBA 2007.
- [Kah 2004]** „Hochwärmegedämmte Dachkonstruktionen“, Protokollband Nr. 29 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase III, hier: Beitrag von O. Kah, Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.
- [Kah 2006]** „Passivhaus-Schulen“, Protokollband Nr. 33 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase III, hier: Beitrag von O. Kah: „Schulen im Passivhaus-Standard: Randbedingungen und Anforderungen“, Passivhaus Institut, Darmstadt 2006.
- [Kah 2006a]** „Passivhaus-Schulen“, Protokollband Nr. 33 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase III, hier: Beitrag von O. Kah: „Schulen im Passivhaus-Standard: Planungsaspekte“, Passivhaus Institut, Darmstadt 2006.
- [Kah 2006b]** Kah, O.: „Passivhaus-Standard bei Schulbauten: Randbedingungen und Planungsaspekte“, 10. Internationale Passivhaustagung, Hannover, Passivhaus Institut 2006.

- [Kah et al. 2008]** Kah, O., Feist, W., Pfluger, W., Schnieders, J., Kaufmann, B., Schulz, T., Bastian, Z.: „Bewertung energetischer Anforderungen im Lichte steigender Energiepreise für die EnEV und die KfW-Förderung“, Ein Projekt des Forschungsprogramms „Zukunft Bau“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Projekt-Nr. 10.8.17.7-06.13, Passivhaus Institut, Darmstadt 2008. (http://www.bbr.bund.de/cln_007/nn_22276/BBSR/DE/-Veroeffentlichungen/BBSROnline/2008/ON182008.html)
- [Kahlert 2004]** Kahlert, C., et al.: „Wirtschaftlichkeit energiesparenden Bauens für kommunale Gebäude in Heidelberg“, Hrsg. Stadt Heidelberg, Amt für Umweltschutz, Energie und Gesundheitsförderung, Heidelberg, 2004.
- [Kaufmann 2004]** „Hochwärmegedämmte Dachkonstruktionen“, Protokollband Nr. 29 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase III, hier: Beitrag von B. Kaufmann, Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.
- [Kaufmann et al. 2009]** Kaufmann, B., Peper, S., Pfluger, R., Feist, W.: „Sanierung mit Passivhauskomponenten, Planungsbegleitende Beratung und Qualitätssicherung Tevesstraße Frankfurt a.M.“, Bericht im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Wiesbaden, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2009. Download unter: www.passiv.de
- [Kaufmann/Schnieders 2002]** Kaufmann, B., Schnieders, J., Pfluger, R.: „Passivhaus - Fenster“, Tagungsband zur 6. Europäischen Passivhaustagung, Basel 2002.
- [Kaufmann/Feist 2002]** Kaufmann, B., Feist, W., Nagel, M.: „Das Passivhaus - energieeffizientes Bauen“, Informationsdienst Holz - Holzbau Handbuch Reihe 1, Teil 3, Folge 10, Hrsg. DGfH Innovations- und Service GmbH 2002.
- [Kaufmann/Feist 2004]** Kaufmann, B., Feist, W.: „Passivhäuser erfolgreich planen und bauen“, ISBN 3-930860-78-3, ILS NRW 2004.
- [Kis/Grobe 2006]** Kis, G., Grobe, C.: „Neubau einer Dreifeld-Sporthalle im Passivhaus-Standard“, 10. Internationale Passivhaustagung, Hannover, Passivhaus Institut 2006.
- [Klutig et al 2001]** Klutig, H.; Dirscherl, A.; Erhorn, H.: „Energieverbräuche von Bildungsgebäuden in Deutschland“, H. 5, S. 221-233, Gesundheits-Ingenieur 122, 2001.

- [Kotthoff/Fouad 2009]** Fouad, N., Kotthoff, I.: "Technische Systeminfo Nr.6 – Brandschutz", Fachverband WDVS e.V. 2009.
- [Krick 2010]** Krick, B.: „Neue Zertifizierungskriterien für transparente Passivhaus geeignete Komponenten“, 14. Internationale Passivhaustagung, Dresden, Passivhaus Institut 2010.
- [Kundi 2006]** Kundi, M., Boos, R., Damberger, B., Hutter, H., Moshhammer, H., Tappler, P., Twrdik, F., Wallner, P., „Bewertung der Innenraumlufte: Physikalische Faktoren, Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter“, österreichisches Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), Wien 2006.
- [Landrigan 1998]** Landrigan, P.J.: "Environmental hazards for children in USA", Int J Occup Med Environ Health 11:189-94, 1998.
- [LEE]** „Leitfaden Elektrische Energie im Hochbau“, Institut Wohnen und Umwelt, im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten, Darmstadt 2000.
- [Linder 2009]** Linder, M.: "Leitlinien zum wirtschaftlichen Bauen 2009", Hrsg. Magistrat der Stadt Frankfurt am Main 2009.
- [Merkblatt 2005]** „Technische Richtlinien für die Planung und Verarbeitung von Wärmedämm-Verbundsystemen“, Merkblatt Nr. 21, Hrsg. Bundesausschuss für Farbe und Sachwertschutz, Frankfurt am Main, 2005.
- [Myhrvold et al. 1996]** Myhrvold, A.N., Olsen, E., Lauridsen, O.: "Indoor environment in schools - Pupils health and performance in regard to CO2 concentrations" in "Indoor Air '96: Proceedings of the 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate" pp 369-374, Nagoya, Japan, July 21-26 1996.
- [NBC 2003]** "D2 National Building Code of Finland, Indoor Climate and Ventilation of Buildings, Regulations and Guidelines 2003", Decree of the Ministry of the Environment on the indoor Climate and ventilation of buildings, Helsinki 2002.
- [Peper 2004]** „Hochwärmegedämmte Dachkonstruktionen“, Protokollband Nr. 29 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase III, hier: Beitrag von S. Peper, Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.
- [Peper et al. 2005]** Peper, S., Schnieders, J., Feist, W.: „Mehrgeschoss-Passivhaus, Hamburg Pinnasberg“, Auftraggeber: Umweltbehörde Hamburg, Passivhaus Institut, 2005.

- [Peper et al. 2005a]** Peper, S., Kah, O., Feist, W.: „Zur Dauerhaftigkeit von Luftdichtheitskonzepten bei Passivhäusern“, Feldmessungen, IEA SHC TASK 28 / ECBCS ANNEX 38, Endbericht, Passivhaus Institut, Darmstadt 2005.
- [Peper et al. 2007]** Peper, S., Kah, O., Pfluger, R., Schnieders, J.: „Passivhausschule Frankfurt Riedberg Messtechnische Untersuchung und Analyse“, 1. Auflage, Passivhaus Institut, 2007.
- [Peper/Feist 1999]** Peper, S., Feist, W.: „Luftdichte Projektierung von Passivhäusern“, Eine Planungshilfe, Fachinformation Passivhaus Institut PHI-1999-6, Darmstadt 1999.
- [Peper/Feist 2002]** Peper, S. und Feist, W.: „Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg“, Analyse im dritten Betriebsjahr, Stadtwerke Hannover, Juli 2002.
- [Pletscher/Kah 2004]** Pletscher, A., Kah, O.: „Sport- und Mehrzweckhalle in Unterschleißheim im Passivhaus-Standard“ in „Die energieeffiziente Sporthalle“, Hrsg. E.A. Spindler, C.F. Müller Verlag, Heidelberg 2004.
- [Pfluger 2004]** Pfluger, R.: „Integration von Lüftungsanlagen im Bestand – Planungsempfehlungen für Geräte, Anlagen und Systeme“, Protokollband Nr. 30 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.
- [Pfluger 2006]** „Passivhaus-Schulen“, Protokollband Nr. 33 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase III, hier: Beitrag von R. Pfluger: „Messungen zur Raumluftqualität in Schulen“, Passivhaus Institut, Darmstadt 2006.
- [Pfluger et al. 2003]** Pfluger, R., Schnieders, J., Kaufmann, B., Feist, W.: „Hochwärmedämmende Fenstersysteme: Untersuchung und Optimierung im eingebauten Zustand“, Anhang zum Teilbericht A, Passivhaus Institut, Darmstadt 2003.
- [PHPP]** Feist, W.; Pfluger, R.; Kaufmann, B.; Schnieders, J.; Kah, O.: „Passivhaus Projektierungs Paket 2007“, Passivhaus Institut, Darmstadt 2007.
- [Radtke 1997]** Radtke, U., „Fussbodenheizung in Turnhallen mit Schwingboden“, Haustechnik IKZ, Hamburg 1997.
- [Riley et al. 2002]** Riley, W.J.; McKone, T.E., Lai, A.C., Nazaroff, W.W.: “Indoor particulate matter of outdoor origin: importance of size-dependent removal mechanisms”, Environ.Sci.Technol. 36, 200-207, Erratum in: Environ.Sci.Technol. 2002, 36, 1868.

- [Schnieders 2000]** Schnieders, J.: „Passivhausfenster“, Tagungsband zur 4. Passivhaustagung, Kassel, 2000.
- [Schnieders 2007]** „Wärmebrücken und Tragwerksplanung“, Protokollband Nr. 35 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase IV, hier: Beitrag von J. Schnieders, Darmstadt 2007.
- [Schnieders 2009]** Schnieders, J.: „Einfluss von Kellerdeckendämmung auf die Feuchtebelastung von Kellerräumen“, Studie im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Passivhaus Institut, Darmstadt 2009.
- [Schulz 2007]** „Wärmebrücken und Tragwerksplanung“, Protokollband Nr. 35 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase IV, hier: Beitrag von J. Schnieders, hier: Beitrag von T. Schulz, Darmstadt 2007.
- [Sedlbauer 2002]** Sedlbauer, K., Gabrio, T., Krus, M., „Schimmelpilze – Gesundheitsgefährdung und Vorhersage“, Gesundheitsingenieur 123, Heft 6, S. 285ff., 2002.
- [SIA 380/4]** „Elektrische Energie im Hochbau“, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich 2006.
- [SIA D 090]** Baumgartner, T., Chuard, P., Wick, B., „Energiegerechte Schulbauten“, Handbuch für Planer, Dokumentation D 090, SIA, Zürich 1992.
- [Vallentin 2006]** „Passivhaus-Schulen“, Protokollband Nr. 33 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase III, hier: Beitrag von G. Vallentin: „Passivhausschule in Aufkirchen“, Passivhaus Institut, Darmstadt 2006.
- [Vallentin/
Lackebauer
2004]** Vallentin, G., Lackebauer, A.: „Montessorivolksschule in Aufkirchen mit Turnhalle“, 8. Europäische Passivhaustagung, Donau-Universität, Krems 2004.
- [VDI 3807-4]** „Energie- und Wasserverbrauchskennwerte für Gebäude - Teilkennwerte elektrische Energie“, Beuth Verlag, Berlin, August 2008.
- [VDI 6022]** „Hygienische Anforderungen an Raumluftechnische Anlagen Büro- und Versammlungsräume“, Beuth Verlag, Berlin, Juli 1998.
- [Vollert 2004]** Vollert, S.: „Neubau einer Einfeld-Sporthalle in Neuberend im Passivhaus-Standard“ in „Die energieeffiziente Sporthalle“, Hrsg. E.A. Spindler, C.F. Müller Verlag, Heidelberg 2004.

-
- [Vollert 2008]** Vollert, S., „Projekt Mehrzweckhalle Nordhastedt“, DBU-Abschlussbericht-AZ-25974_01, 2008.
- [Wargocki et al. 2000]** Wargocki, P., Wyon, D.P., Sundell, J., Clausen, G., Fanger, P.O.: “The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality”, Sick Building Syndrome (SBS) symptoms and productivity, Indoor Air 10:222-236, 2000.
- [Weiss 2006]** „Passivhaus-Schulen“, Protokollband Nr. 33 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase III, hier: Beitrag von V. Weiß: „Projektbeispiel: Passivhausschule Wald“, Passivhaus Institut, Darmstadt 2006.
- [Zeiler et al. 2009]** Zeiler, W., Schuiling, D.J.B.W., Boxem, G., “High performance schools: displacement ventilation an improvement?”, 30. AIVC - Tagung, Berlin 2009.
- [Zimmermann 1999]** Zimmermann, M., „Handbuch der passiven Kühlung“, im Auftrag des Bundesamtes für Energie (Bern), EMPA, CH-Dübendorf 1999.