

# Planung und Bau der Passivhaus Grundschule, Kalbacher Höhe 15, Frankfurt am Main

Axel Bretzke, Dipl. Phys., Diplom Energiewirt (FH), Hochbauamt der Stadt Frankfurt, Abt. Energiemanagement, Gerbermühlstr. 48, 60594 Frankfurt am Main, T +49 (0) 69-212-38697, [www.stadt-frankfurt.de/energiemanagement/passiv/passiv.htm](http://www.stadt-frankfurt.de/energiemanagement/passiv/passiv.htm), [axel.bretzke@stadt-frankfurt.de](mailto:axel.bretzke@stadt-frankfurt.de)



## 1 Zusammenfassung

Die Stadt Frankfurt hat am 1.11.2004 im Baugebiet Riedberg mit die erste, vollständig in Passivhaus (PH)-Bauweise errichtete Grundschule in Deutschland eröffnet, Baubeginn war September 2003. Im Rahmen eines Wettbewerbs 2000/2001 wurde die Festlegung getroffen, für den Neubau von drei Grundschulen PH-Qualität anzustreben. Im Frühjahr 2003 hat das Stadtschulamt mit dem Magistrat einen Grundsatzbeschluss zur PH-Bauweise für Schulgebäude gefasst, dem intensive Abwägungen über Kosten und Nutzen vorangingen. Die Kosten für das Gesamtprojekt mit 8.785 m<sup>2</sup> Bruttogeschossfläche einschließlich Turnhalle mit zwei Feldern liegen bei 16,7 Mio €. Die Mehrkosten davon gegenüber einem verbesserten Standard, EnEV minus 30% (75 kWh/m<sup>2</sup>) wurden bei Kostenfeststellung mit 5,3% gegenüber dem Fördergeber Deutsche Bundesstiftung Umwelt nachgewiesen. Erfahrungen aus ähnlichen Projekten bestätigen einen Wert von 5-8% Mehrkosten für ähnlich optimierte Objekte mit einer Amortisation von 10-20 Jahren. Die Betriebsergebnisse bestätigen die Konzeption. Im September 2007 hat die neue Frankfurter Stadtregierung beschlossen, dass neue städtische Gebäude nur noch in PH-Bauweise errichtet werden, Abweichungen davon sind zu begründen. Alle Gebäude werden nach den städtischen Leitlinien gebaut <http://www.stadt-frankfurt.de/energiemanagement/pdf/Leitlinie-wirtschaftliches-Bauen.pdf>



**Ansicht der Schule von Südost**

Die Ganztageschule mit KiTa ist mit Vollküche und Speisesaal ausgestattet. Die zugehörige Turnhalle wurde in vergleichbarer Massivbauweise mit etwas schlechteren Südverglasung errichtet. Neben PH-Standards bei der Dämmung und einer Luftdichtheit  $n_{50}$  von 0,46/h werden die Wärmeverluste am Boden durch eine gedämmte Frostschräge vermindert. Der , unabhängig vom PH-Standard notwendige, sommerliche Wärmeschutz wird durch schwere Bauweise, aussenliegende Jalousien und Nachtauskühlung gewährleistet. Der Primärenergiebedarf liegt bei 59 kWh/m<sup>2</sup> a. Die zentralen Lüftungsanlagen sind als Zuluftsysteme mit Wärmerückgewinnung (84%) mit kleinem Frost-Heizregister ausgelegt. Mehrkosten, in Schulen nicht leistbarer Wartungsaufwand und Platzbedarf führten zur Entscheidung gegen dezentrale Lüftungs-Systeme. Die Rest-Beheizung der Räume erfolgt nicht über Gruppenheizregister der Lüftung, sondern über einen kleinen Heizkörper pro Raum. Dies gewährleistet individuellen Komfort bei Kostenneutralität und Redundanz. Die Bereitstellung der Restwärme erfolgt über zwei vollautomatische, 60 kW Holzpelletkessel, die zur Bauheizung bereits 1500 Betriebsstunden störungsfrei gearbeitet haben. Abgerundet wird das ökologische Konzept durch eine Photovoltaik-Anlage (in der Energiebilanz unberücksichtigt) mit einer Leistung von 30 kW im Endausbau auf der verpachteten Dachfläche. Das Gebäude ist zertifiziert als EU Green Building Objekt. Das Projekt wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert und vom Passivhaus Institut beraten und messtechnisch begleitet. Die Holzpellet-Heizung wurde vom Land Hessen gefördert.



Grundriss: KiTa (li), Schule (o. + r.), Turnhalle (u.)



Klassenraum (o.), Eingangshalle

## 2 Warum Schulgebäude in Passivhaus-Qualität?

In einer PH-Schule reicht die Wärme von 25 Schülern und einem Lehrer aus (1,5-2 kW), den Klassenraum in der Nutzungszeit ganzjährig ausreichend zu beheizen. Der Aufwand für die PH-Dämmung ist daher gegenüber PH-Wohngebäuden geringer. Zudem ist eine PH-Schule gutmütig. Selbst bei Ausfall der Heizung über mehrere Tage werden keine unangenehmen Innenraumtemperaturen erwartet. Die PH-Fenster garantieren Behaglichkeit im Winter auch am Fenstersitzplatz, und vergrößern die Raumfläche (kein Heizkörper am Fenster).

In einer PH-Schule gewährleistet eine maschinell zugeführte Luftmenge von 15-20 m<sup>3</sup>/Person einen 2-fachen Luftwechsel und eine dauerhaft ausreichende Luftqualität nach DIN 1946 T2 (Begrenzung der CO<sub>2</sub> Konzentration in Räumen auf unter 1500 ppm). Zudem garantiert diese geringe Luftmenge Geräusch- und Zugfreiheit im Klassenraum und verhindert unkontrolliert trockene Luft (tritt ein bei über 25 m<sup>3</sup>/(Person h)). Die Anforderung zweifacher Luftwechsel wird mit Fensterlüftung allein im Winter nicht gewährleistet, wie in allen repräsentativen Untersuchungen von Klassenräumen mit gemessenen 2500 bis 4000 ppm CO<sub>2</sub> schon vor Jahrzehnten festgestellt wurde. Den geringeren Luftwechsel durch verminderte Fensterlüftung im Winter erwartet auch die ASR 5, die von reduziertem Lüftungsverhalten (50%) unter 0° C ausgeht. Die Wärmerückgewinnung verhindert gleichzeitig die großen Wärmeverluste durch die Lüftung. Diese Verluste müssten sonst nach der neuen DIN 12831 „Heizlast“ durch erheblichen Mehraufwand für Heizkörper gedeckt werden, da korrekt ein 2-facher Luftwechsel für Schulräume anzusetzen ist, der in Praxis notwendig wäre.

Außerhalb der kürzeren Heizzeit einer PH-Schule ist vorgesehen, die Lüftung abzustellen und nur über die Fenster zu lüften. Selbst in der Heizzeit kann bei Bedarf über die Fenster zusätzlich gelüftet werden, da dies im PH erheblich verlustärmer ist als in Bestandsgebäuden (kleiner Heizkörper an der Innenwand statt große Heizkörper unter den Fenstern).

Durch die Ausführung in PH-Bauweise werden also nicht nur die Betriebskosten erheblich reduziert. Es werden vor allem bessere Lernbedingungen für die Schülerinnen und Schüler und bessere Arbeitsbedingungen für die Lehrer geschaffen.

### 3 Kosten-, Energie- und CO2-Bilanz

Als Alternative zur verwendeten Beheizung über die Holzpelletkessel war am Riedberg ein Fernwärmeanschluss aus einem Müllheizkraftwerk vorgesehen. Eine Berechnung belegte aber hier die Wirtschaftlichkeit der Pelletfeuerung.

Daher beträgt die Heiz-Energieeinsparung der Schule in PH-Bauweise gegenüber der Standardausführung Stadt Frankfurt (EnEV - 30%) zwar 260 MWh/a bzw. 28 T€ pro Jahr, die CO2 Einsparung über den gesamten Energieverbrauch aber „nur“ 33 t/a, da für beide Varianten nur geringe spezifische Emissionen anzusetzen sind. Gegenüber Gebäuden im Bestand sind die Einsparungen aber um ein vielfaches höher.

Trotz der höheren Investition sowie des Mehraufwandes an Wartung und Instandhaltung ergab sich daher für diese PH-Schule 2003 ein Vorteil der Gesamtkosten gegenüber einer Schule nach Standard Frankfurt (EnEV-30%) auf Grundlage der Mehrkosten nach Kostenberechnung (Kapitalkosten 5,5%, Preissteigerung 3%, 40 Jahre). Die Kalkulation für 2006 für vergleichbare Objekte der Stadt FFM errechnet gegenüber der EnEV eine Amortisationszeit unter 10 Jahren. Damit noch nicht bewertet ist die architektonische bzw. erlebbare Qualität wie besseres Raumklima und nachhaltiges Bauen.

Bauteil	netto	NK 18%	MWst	Bemerkung
Gründung	43.900	7.900	8.300	verlängerte Frostschrüzen mit Dämmung,
Außenwand	124.800	22.500	23.600	2160 m2, Dämmung 1,3€/m2, erhöhte Fassadenstatik
Elementierte AW/Fenster	137.000	24.700	25.900	1780 m2, PH-Verglasung 75-100€/m2
abgehängte Decken	47.700	8.600	9.000	2560 m2
Dach und Aufbauten	148.500	26.700	28.000	3600 m2
Lüftung/Wärmeversorgung	156.700	28.200	29.600	3 Lüftungsanlagen mehr, weniger Aufwand statische Heizung, GLT, Heizungszentrale
Summe	658600	118.600	124.400	Ca. 900.000 € (ca. 5,3%)

Mehrkosten der PH-Bauweise für die Grundschule am Riedberg Stand Kostenberechnung/-feststellung 2005, Mittelung mehrerer Betrachtungsweisen

### 4 Wärmeschutz/Akustik

#### 4.1 Winter

Die hinterlüftete Fassade wurde mit einer Holz-Aluminium Standard-Unterkonstruktion nach Beispielen des Institut Wohnen und Umwelt ausgeführt. Umfangreiche Detailabklärungen verringerten die Wärmeverluste weiter (aussenliegende Entwässerung, Druckentlüftung Abwasser im Gebäude etc.).

Bauteil	U-Wert W/m <sup>2</sup> K
Dach	0,11
Elementfassade	0,16
Boden mit Frostschrüze (20 cm Dämmung, 2m tief unter der Bodenplatte)	0,34 Reduktionsfaktor 0,22
Fenster	0,74

In der Hanglage mit 11m Höhenunterschied galt es nach Vorgaben der Statik eine Dämmung unter der Bodenplatte zu vermeiden. Statt dessen wurde die Frostschrüze verlängert und gedämmt ausgeführt, ebenso wie die umfangreichen Stützmauern des Gebäudes. Die Dämmung der Frostschrüze bedeutet geringere Wärmebrücken und Taupunktfreiheit der Wandanschlüsse und Versprünge im Gebäude. Bei der Dämmung im Gebäude konnte daher auf Kimsteine etc. verzichtet werden, lediglich waagrechte Bodenflächen wurden mit 15 cm oberhalb der Bodenplatte gedämmt.



**Aufbau der Frostschürze**



**Aufbau hinterlüftete Fassade**

## 4.2 Sommer

Unterrichtsräume haben sehr hohe interne (25 Schüler) und externe Lasten (Fenster 15 m<sup>2</sup>, 15 % Einstrahlung, 60-80 W/m<sup>2</sup>). Wie für klassisch gedämmte Gebäude auch ist für kritische Räume daher zumindest eine einfache Simulation und Berechnung nach DIN 4108 T2 notwendig. Die Wärmeabgabe durch Transmission ist im Sommer (dT von unter 5 Grad) vernachlässigbar und damit unabhängig vom Dämmstandard. Die Wärme muss daher Tags zwischengespeichert und Nachts über Lüftung abgeführt werden. Neben einer schweren Bauweise wurden daher die Fensterflächen optimiert (Tageslicht vs. sommerlicher Wärmeschutz). Die Stürze würden minimiert und opake Brüstungen vorgesehen, um bei gleich bleibender Fensterfläche möglichst viel Tageslicht in die Raumtiefe zu bringen ohne unnötige Sonneneinträge durch einen verglasten Brüstungsbereich zu haben. Die Außenjalousien sind automatisch gesteuert aber mit Schlüsselschalter zeitlich begrenzt manuell übersteuerbar, das obere Drittel der Jalousien ist für Tageslichteinfall in einer festen Kippstellung.

Die Raumakustik wurde optimiert, um die Schallschutznormen einzuhalten aber auch um Decken und Wandflächen in ausreichendem Maß als Speichermasse zur Verfügung zu stellen (Teilweise abgehängte Decke, Schallschutzpinnwand). Zwei automatische Nachluftklappen je Klasse mit der Überströmung in die Flure können eine passive, die Lüftungsanlage über Sommer-Bypass kann zudem eine aktive Nachluftkühlung gewährleisten (2-4 facher Luftwechsel).

## 5 Technik

### 5.1 Heizung

Die Raumheizkörper sind kostenoptimiert verlegt und angeordnet (in der Regel an den Flurwänden). Die Kosten für 4 Räume sind mit einem Gruppenheizregister für die Lüftung vergleichbar, die Steuerung ist dem gegenüber vereinfacht und gewährleistet individuellen Komfort. Die Heizkörper gewährleisten die Aufheizung und die Beheizung leer stehender Raumbereiche, auch wenn dort die Lüftung nicht läuft. Fast alle Räume sind mit Einzelraumregelung mit begrenztem manuellem Temperaturwahlbereich ausgestattet, was zusammen mit den Heizkörpern die Akzeptanz der Nutzer erhöht. Die Flure werden nur über die Abluft der Räume beheizt (mind. 15° C berechnet). Es erfolgt eine Heizungsabschaltung bei Fensteröffnung per Software über den gemessenen Temperaturabfall am Raumtemperaturfühler neben der Eingangstür.

### 5.2 Lüftung

Die insgesamt 6 zentralen Lüftungsanlagen mit zusammen 21.700m<sup>3</sup>/h sind mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung ausgestattet (84%). Davon sind drei Anlagen dem Passivhauskonzept für die Schule und der KiTa zuzuordnen. Die Zuluft wird über einen Gegenstrom-Kreuzstrom-Plattenwärmetauscher erwärmt und den Räumen ohne Nachheizung über Weitwurfschlitze zugeführt (Ausnahme zentrale Vorspülung morgens). Die Lufttemperatur bei Einblasung unter der Decke beträgt mindestens 16°C. Die geringe Luftmenge garantiert die Aufheizung durch



**Klassenraum mit abgehängter Decke, Akustik-Pinnwand, Weitwurfschlitz (Zuluft), Zertifikate**

die Schüler und die Heizkörper, was durch Volumenstromregler je Klassenraum (100 %, 50 %, 0%) verbessert wird. Der Luftwechsel pro Person beträgt am Riedberg ca.  $15 \text{ m}^3/\text{h}$  (zusätzliche Fensterlüftung vorgesehen und notwendig, neue Projekte daher  $20 \text{ m}^3/\text{h}$ ), die Luftwechselrate damit bei Vollbelegung 2/h. Für gering genutzte Räume wird der Volumenstromregler über CO<sub>2</sub>- oder Mischgassensoren angesteuert. Die Luft strömt von den Klassenräumen über die Gruppenräume in den Flur (Schalldämpfer, Brandschutzklappen). Durch die Führung der Abluft über die Flure mit zentraler Absaugung konnte auf ein Abluft-Kanalsystem verzichtet werden. Die im Laufe des Projektes gestiegenen Anforderungen an Brand- und Schallschutz mit den dazugehörigen Investitions- und Wartungskosten lassen für die Zukunft eher ein Abluftkanalsystem als kostengünstiger erscheinen. Mehrkosten, in Schulen nicht leistbarer Wartungsaufwand und Platzbedarf führten zur Entscheidung gegen dezentrale Lüftungssysteme. Die WCs sind separat an die Abluft/WRG angeschlossen. Der mittlere Stromaufwand Lüftung liegt bei  $0,45 \text{ Wh}/\text{m}^3$  gemäß PH-Standard und nach DIN 13779 Effizienzklasse SFP 1 o. 2, da die Führung der Kanäle und die Auslegung der Motoren verbrauchsoptimiert (drehzahl geregelt) erfolgten. Bei der Effizienz der Wärmerückgewinnung wurde beachtet, dass eine Steigerung um 1 Prozent 1 cm weniger Dämmung bedeutet.

### 5.3 MSR/GLT

Die Steuerung ist über ein LON-Netz mit einem OPC-Server verbunden. Es ist eine raumweise Steuerung für Heizung; Lüftung; Sonnenschutz und Lüftungsklappen möglich. Die Flurbeleuchtung wird über Bewegungsmelder mit Lichtsensor gesteuert, die Beleuchtung der Klassenräume wird nach Ende jeder Unterrichtsstunde zentral ausgeschaltet und kann sofort wieder individuell in Betrieb genommen werden.

### 5.4 Warmwasser/Abwasser

Die Warmwasser-Versorgung wurde auf das notwendige Maß beschränkt. Schülertoiletten oder Putzräume haben nur Kaltwasseranschlüsse. Von der Heizzentrale weit entfernte Abnehmer haben aus wirtschaftlich energetischen Gründen elektrische Wassererwärmung, Warmwasser-Großabnehmer (Küche, Turnhalle) dagegen sind in der Nähe der Heizzentrale angeordnet und werden von dort versorgt.

### 5.5 Elektro/PV

Auch die Auslegung Elektro erfolgte kostenoptimiert und stromsparend nach den Technischen Standards des Hochbauamtes (heute „Leitlinien“, [www.stadt-frankfurt.de/energiemanagement](http://www.stadt-frankfurt.de/energiemanagement) unter Dokumente) oder Deutscher Städtetag „Energieleitlinien Planung“. Dies bedeutet u.a. für die Auslegung der Klassenraumbeleuchtung eine installierte Leistung von  $6 \text{ W}/\text{m}^2$  bei 300 lux. Die PV-Anlage wird von einem EVU errichtet und betrieben. Die Modulträger werden von mit dem Dachkies beschwerten Metallplattensystem gehalten, was keine Eingriffe in die Dachhaut erfordert.

## 6 Messkonzept und wissenschaftliche Auswertung

Um die Qualität und die speziellen Lösungen zu evaluieren wurde ein Messprogramm für zwei Jahre eingerichtet mit anschließender wissenschaftlicher Auswertung. Das Passiv-Haus-Institut hat dazu den Energie- und Kaltwasserverbrauch gemessen, den Luftwechsel in den Eingangsbereichen der Schule, den Wirkungsgrad der Lüftungsanlagen, die Raumluftqualität und Temperaturen in Klassenräumen im Vergleich zu den Außenbedingungen und die Wirkung der Frostschräge (abrufbar über [www.passiv.de](http://www.passiv.de) ).

### Eckdaten

Nutzer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 400 Grundschüler in 16 Klassen</li> <li>• 100 - 125 Kinder KiTa,</li> <li>• 50 Personen Schule, KiTa, Verwaltung,</li> </ul>
Nutzflächen NGF	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schule und KiTa 6100 m<sup>2</sup>,</li> <li>• Energiebezugsfläche Schule und KiTa 5540 m<sup>2</sup>, A/V = 0,35</li> <li>• Turnhalle 1600 m<sup>2</sup></li> </ul>
Bruttogeschossfläche, Bruttorauminhalt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 8785 m<sup>2</sup></li> <li>• 40347 m<sup>3</sup></li> </ul>
Energiekennwerte PH-Schule ohne Turnhalle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Heizwärme: 15,0 kWh/m<sup>2</sup> a PH: 15</li> <li>• Heizlast: 10,5 W/m<sup>2</sup></li> <li>• Dichtigkeit: n<sub>50</sub>:0,46/h PH: 0,6</li> <li>• Lüftung: ca. 0,44 Wh/m<sup>3</sup> PH: 0,45</li> <li>• Primärenergiebedarf: 41 kWh/m<sup>2</sup> a PH: 120</li> <li>• Davon Strom ca. 33 kWh/m<sup>2</sup> a</li> <li>• CO<sub>2</sub> Einsparung über 30 Jahre gegen EnEV2004-30% mit KWK-Fernwärme: 1000 t</li> <li>• Beleuchtung Klasse: &lt; 6 W/m<sup>2</sup> (&lt;2 W/100 lux/m<sup>2</sup>)</li> </ul>
Deckung der Heizlast:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Heizkörper (Turnhalle Deckenstrahlplatten) und Lüftung mit WRG ohne lokale Heizregister, Einzelraumregelung</li> <li>• vollautomatische Holz-Pelletkessel (2x60 kW)</li> </ul>
Lüftung/Wärmerückgewinnung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3 Passivhaus-Anlagen (2x4800 m<sup>3</sup>/h, 1x 2800 m<sup>3</sup>/h)</li> <li>• 3 weitere Anlagen: Küche, Speisesaal, Turnhalle</li> <li>• alle Anlagen: Kreuz-Gegenstrom-Wärmetauscher mit WRG eff. Wärmebereitstellungsgrad 73% nach PHI, 84% gemes.</li> <li>• Volumenstromregler, z.T. mit CO<sub>2</sub>- oder Mischgasfühler</li> </ul>
Kosten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gesamtprojektkosten: 16,7 Mio €</li> <li>• Baukosten (nach DIN 276: 300+400): 11,1 Mio € brutto</li> <li>• spezifische Baukosten: 1110 €/m<sup>2</sup> netto</li> </ul>
Kosten Passivhaus	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mehrkosten ca. 5,3 % (zu EnEV2004-30%)</li> <li>• Amortisation gegen Standard EnEV2004-30%: 38 Jahre (Stand 2003), 12 Jahre (Stand 2005)</li> </ul>
Förderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deutsche Bundesstiftung Umwelt: 250 T€ (Messkonzept und Investition)</li> <li>• Land Hessen: 10 T€ (Pelletheizung)</li> </ul>
Beteiligte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauherr: Stadtschulamt Stadt Frankfurt</li> <li>• Architektur: Architekturbüro 4a, Stuttgart</li> <li>• Energetische Qualitätssicherung, Energiekonzept: Passivhaus-Institut, Transsolar</li> <li>• Haustechnik: ICZR</li> <li>• Projektsteuerung/Energiemanagement: Hochbauamt Stadt Frankfurt</li> </ul>