



Fraunhofer Institut
Bauphysik

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle
für Prüfung, Überwachung und
Zertifizierung
Zulassung neuer Baustoffe, Bauteile
und Bauarten
Forschung, Entwicklung, Demonstra-
tion und Beratung auf den Gebieten
der Bauphysik

Institutsleitung
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

IBP-Bericht

Energetische und raumklimatische Untersu- chung des Gymnasiums Miesbach / Obb.

Durchgeführt im Auftrag des
Landratsamts Miesbach

Gefördert durch
Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) und
Kreissparkasse Miesbach/Tegernsee.

Der Bericht umfasst
30 Seiten Text
20 Tabellen
39 Abbildungen

Autor:
Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

Holzkirchen, 14. Mai 2008

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Zielsetzung und Sanierungskriterien	4
2.1	Energie	4
2.2	Raumklima	5
2.2.1	Thermische Behaglichkeit	5
2.2.2	Hygrisches Raumklima	6
2.2.3	Luftqualität	6
2.2.4	Akustik	8
2.2.5	Licht	9
2.3	Energiesparen als pädagogisches Projekt	10
3	Beschreibung des Schulgebäudes	11
3.1	Bestandsaufnahme und Rahmenbedingungen	11
3.2	Begründung der Raumwahl für die Untersuchungen	12
4	Durchführung der Untersuchungen	14
4.1	Datenerhebung für Bauteile und Anlagen	14
4.2	Messungen in einzelnen Klassenzimmern	14
4.3	Bauphysikalische Berechnungen	16
4.4	Wirtschaftlichkeitsberechnungen	16
4.5	Erarbeitung von Didaktik-Konzepten zur Steigerung des Umweltbewusstsein der Schüler	17
5	Ergebnis der Untersuchung	17
5.1	Energetische Aspekte	17
5.2	Raumklimatische Aspekte	20
6	Vorgeschlagene Verbesserungsmaßnahmen	24
6.1	Gesamtgebäude	24
6.2	Kostenabschätzung	25
6.3	Sanierungsmodelle	26
7	Zusammenfassung	28
8	Ableitung einer allgemeinen Vorgehensweisen	30
9	Literatur	31
10	Tabellen	34
11	Bilder	59

1 Einleitung

In Deutschland gibt es mehr als 40.000 Schulen. Bedingt durch sinkende Schülerzahlen werden zukünftig eher vorhandene Schulgebäude weiter betrieben, als neue gebaut. Nach einer unterdurchschnittlichen Sanierungsrate in den letzten Jahren wartet eine Vielzahl von Schulgebäuden bundesweit auf eine Sanierung [BINE 2006].

Die gesellschaftliche Bedeutung einer optimalen Ausbildung wird allenthalben betont. Neben der Qualität der Lehre rücken dabei zunehmend die Lehr- und Lernbedingungen in den Bildungseinrichtungen ins Blickfeld. Nicht nur der Verbesserung des energetischen Standards soll die Sanierung dienen, vor allem soll sie auch die Lern- und Lehrbedingungen der Schüler und Lehrer optimieren. Von bauphysikalischer Seite kann hier ein Beitrag für ein angenehmes Raumklima geleistet werden. Mit der integralen Schulsanierung wird ein Weg aufgezeigt, wie neben energetischer Verbesserung weitere Faktoren dazu beitragen, das Gebäude auf eine höhere Qualitätsstufe zu heben, um seinen Nutzern optimale Arbeitsbedingungen zu bieten. Schüler und Lehrer profitieren davon.

Bei der Sanierung von Schulgebäuden sind einige typische Besonderheiten zu berücksichtigen [BINE 2006]:

- Durch eine hohe Personenbelegungsdichte sind die internen Wärmegewinne während der Nutzung hoch.
- Durch eine hohe Personenbelegungsdichte ist der Luftbedarf in den Klassenräumen während der Belegung hoch.
- Um eine gleichmäßige Ausleuchtung der Klassenräume zu gewährleisten, ist die Fassade in der Regel ab dem Brüstungsbereich verglast. Daraus resultieren relativ große Fensterflächenanteile von über 50%, die bei sommerlicher Sonneneinstrahlung oftmals zu starker Raumerwärmung führen. Sonnenschutz und Verschattung sind deshalb ein ausgesprochen wichtiges Thema aufgrund hoher interner Lasten und hoher Verglasungsanteile.
- Die Nutzungszeiten der Klassenräume sind relativ kurz (bisher in der Regel vormittags).
- Schulen besitzen oft Bausubstanz aus verschiedenen Baujahren.

Mit gezielten Maßnahmen kann dabei ein Einsparpotential und eine Verbesserung des Raumklimas erschlossen werden. Welches aber sind die richtigen Maßnahmen? Für das Gymnasium Miesbach, Oberbayern, erfolgte eine umfangreiche energetische sowie raumklimatische Analyse des Ist-Zustandes. Die Durchführung der Untersuchungen erfolgte im Auftrag des Landkreises Miesbachs. Gefördert wurde sie durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) und der Kreissparkasse Miesbach/Tegernsee. Die Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Maßnahmen zur Sanierung werden im folgenden Bericht zusammengefasst.

2 Zielsetzung und Sanierungskriterien

Bei den Untersuchungen am Gymnasium Miesbach stand die energetische Er-tüchtigung des Gebäudes bei gleichzeitiger Verbesserung der Raumklimabe-dingungen im Vordergrund; letztere deshalb, weil man sich davon auch bessere Lernbedingungen der Schüler und bessere Lehrbedingungen für die Lehrer er-hofft. Dies bedeutet, dass ein Sanierungskonzept erarbeitet werden muss, bei dem die Energieeinsparung und die Verbesserung der Raumklimakomponenten quasi "Hand in Hand" gehen und, wenn möglich, um auch in pädagogischer Hinsicht den Schülern eine Steigerung ihres Umweltbewusstseins zu vermitteln. Eine weitere wesentliche Randbedingung war, dass das Landratsamt Miesbach als Schulträger Wert auf robuste, wartungsarme und einfach zu bedienende Systeme legt, um die laufenden Unterhaltskosten der Schule zu minimieren.

2.1 Energie

In den letzten Jahren wurden sowohl im Förderprogramm EnSan des Bundes-ministeriums für Wirtschaft und Technologie als auch durch die Deutsche Bun-desstiftung Umwelt zahlreiche Schulgebäude energetisch saniert und dabei ver-schiedene Energiespartechniken erprobt. Im Anschluss an die Sanierung der Schulgebäude erfolgte in einigen Projekten jeweils eine kontinuierliche Mess-phase zur Validierung der Energiekonzepte und zur Bewertung der eingesetz-ten Techniken. Die Sanierungsmaßnahmen betrafen Verbesserungen an der Gebäudehülle, der Wärmeversorgung sowie der Lüftung und der Beleuchtung. Ferner sind auch Maßnahmen am Sonnenschutz und Blendschutz umgesetzt worden. Die Erfahrungen und Erkenntnisse aus diesen Projekten sind vielfältig. Manche Maßnahmen führen immer zum Ziel, andere hingegen nur unter be-stimmten Umständen. Die Ergebnisse wurden u.a. vom wissenschaftlichen Be-gleitteam, unter Leitung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik analysiert und zu Grundsatzaussagen verdichtet. Diese fanden auch Eingang in den Leitfaden des Umweltbundesamt.

In energetischer Hinsicht wurde in diesem Projekt aufgrund dieser Rahmenbe-dingungen folgende prinzipielle Herangehensweise gewählt:

- Verbesserung des Wärmeschutzes der Außenbauteile unter Beachtung der Vorgaben gemäß [EnEV 2007] und [DIN 4108]
- Einsatz von robusten, wartungsarmen Materialien und Dämmsystemen
- Vermeidung technisch aufwendiger haustechnischer Anlagen und Systeme
- Einsatz innovativer Systeme, die als praxistauglich angesehen werden und die Voraussetzungen für eine breite Anwendung aufweisen
- Anstreben eines Energieniveaus bei Übertragung der Maßnahmen auf das Gesamtgebäude, mit dem der Endenergiebedarf/-verbrauch zukünftig spür-bar reduziert wird
- Optimierung der raumklimatischen und raumakustischen Situation

Mit den energetischen Berechnungen nach [DIN V 18599] wurde, im seinerzei-tigen Vorgriff auf die seit Oktober 2007 anzuwendende Rechengrundlage der EnEV für Nichtwohngebäude, bewusst Neuland betreten. Nach der neuen Re-

chenmethodik sind die baulichen und haustechnischen Energiebilanzen nicht mehr separat zu betrachten, sondern werden deren gegenseitige Einflussnahmen und Abhängigkeiten integrativ und damit realitätsnäher bilanziert. Außerdem fließen nunmehr auch die energetischen Anteile der Beleuchtung und ggf. Kühlung mit in die Berechnungen ein.

Bei der Sanierung älterer Schulgebäude muss man natürlich auch die frühere Energieversorgung mit berücksichtigen. Bild 1 verdeutlicht, wie sich Klassenräume allgemein im Laufe der Nachkriegsjahre verändert haben. Bedingt durch die Veränderung der Schulorganisation haben sich auch die Klassenraumentwicklung und die Ausrichtung der Arbeitsplätze verändert. Während in der Vergangenheit eher der Frontalunterricht im Vordergrund stand, bevorzugt man heute lieber eine differenzierte Arbeitsweise mit den Schülern. Das hat, wie Bild 2 veranschaulicht, auch Folgen für die Beheizung und den Energieverbrauch der Klassenräume.

Während 1945 die Beheizung der Klassenzimmer ausschließlich über Einzelöfen, meist intermittierend nur stundenweise erfolgte, hat man in den Jahren der "anscheinend unbegrenzten" Energiequellen keinerlei Rücksicht auf Energiesparmaßnahmen beim Errichten einer Schule getroffen, was den Energiebedarf in die Höhe trieb. Heute haben Schulen durchschnittlich einen jährlichen Verbrauch von ca. 150 kWh/m²a. Zukünftig werden Schulen nach dem Niedrigenergiehauskonzept zu planen oder zu sanieren sein. Primärenergetisch kann dieser Bedarf noch zusätzlich durch den Einsatz regenerativer Energieträgern reduziert werden.

2.2 Raumklima

Die in Deutschland angelaufenen Programme zur energetischen Sanierung von Schulen (DENA, BMWi) konzentrieren sich auf energetische Maßnahmen. Das Thema Leistungsfähigkeit von Schülern und Lehrern in Abhängigkeit der Behaglichkeit in Klassenräumen werden nicht berücksichtigt. Die Übertragbarkeit der Leistungsfähigkeit in Büros auf die in Schulen ist sicher nahe liegend aber nicht wissenschaftlich gesichert.

2.2.1 Thermische Behaglichkeit

Das Raumklima wird dann als angenehm empfunden, wenn sich die im Raum aufhaltenden Menschen behaglich fühlen. Ein Mensch fühlt sich dann thermisch behaglich, wenn seine physiologische Energiebilanz mit der Umgebung ausgeglichen ist, d. h. wenn der Mensch gerade so viel Energie abgeben kann, wie sein Metabolismus will; entzöge man ihm mehr, fühlte er sich unbehaglich kalt, und ließe man ihm nicht jene Wärmemenge abgeben, nach der ihm ist, fühlte er sich ebenfalls unbehaglich, nämlich unbehaglich warm. Selbstredend ist, dass sich nur ein gesunder Mensch behaglich fühlen kann, wobei eine Gesundheitsstörung auch psychischer oder sozialer Natur sein kann. Die psychischen und sozialen Einwirkungsfolgen machen klare Ursachenermittlung für Unzufriedenheit mit dem Raumklima oder medizinische Diagnosen manchmal schwierig. Man spricht dann von symptomatisch unklaren Störungen (z. B. Dystonien) und hat von anlagentechnischer Seite dafür neue Termini, wie z. B.

das "Sick Building Syndrom (SBS)" als diagnostisch nicht genau zuordnungsba-
ren Sammelbegriff geprägt.

Thermische Behaglichkeit hängt im Wesentlichen von sechs Einflussgrößen ab. Diese sind der Aktivitätsgrad des Menschen und dessen Bekleidung, die Lufttemperatur und Strahlungstemperatur der umgebenden Wände, die Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte. Aufgrund der Nutzungsart der Unterrichtsräume mit überwiegend sitzender Tätigkeit wird von einem Aktivitätsgrad von 1,2 met pro Schüler ausgegangen. Der Dämmwert der Kleidung wird im Sommer mit 0,5 clo, im Winter mit 1,0 clo angenommen [DIN EN ISO 7730]. Behaglichkeit muss im Sommer und Winter gleichermaßen sichergestellt sein. Durch die hohen temporären inneren Lasten bei Schulgebäuden ist ein besonderes Augenmerk auf die sommerliche Behaglichkeit zu legen. Für Schulen ist ein normales Maß an Erwartung ausreichend, also Kategorie II nach [DIN EN 15251]. Die Anforderungen der Kategorie I nach [DIN EN 15251] gelten nur für besonders empfindliche Menschen wie kranke oder behinderte Personen. Nach [DIN EN 15251] und [DIN EN ISO 7730] sollte die operative Raumtemperatur im Winter zwischen 20 und 24°C und im Sommer zwischen 23 und 26°C betragen. Über- bzw. Unterschreitungen dieser Werte gemäß Kategorie III (19 - 25°C im Winter; 22 - 27°C im Sommer) sind zulässig, sollten jedoch über lang anhaltende Zeiträume vermieden werden. Der vertikale Lufttemperaturunterschied zwischen Füßen und Kopf sollte kleiner 3 K sein [DIN EN ISO 7730].

2.2.2 Hygrisches Raumklima

Die Luftfeuchte hat bei den in Gebäuden Deutschlands üblicherweise auftretenden Werten relativ wenig Einfluss auf die Behaglichkeit. Der Mensch hat für Raumlufftfeuchte selbst kein Sensorium. Die Ursachen von Klagen über trockene Luft - wie sie in Bürogebäuden mit RLT-Anlagen selbst bei gemessenen Werten der relativen Luftfeuchte von z.B. 40 oder sogar 50% auftreten [Hellwig 2005] - sind noch nicht vollständig geklärt. Die Werte der relativen Luftfeuchte können zwischen 20 und 70% liegen. Sehr niedrige relative Luftfeuchten (< 15%) können, vor allem wenn Feinstäube und Aerosole vorhanden sind, über längere Zeiträume Trockenheit und eine Reizung von Augen und Atemwegen hervorrufen [DIN EN 15251]. Geringe Luftfeuchten sind aber bei den vergleichsweise hohen Belegungsdichten im Schulbetrieb nicht zu erwarten. Ist die Feuchte über längere Phasen im Raum hoch und der Wärmeschutz der Außenwände gering, so besteht die Gefahr von mikrobiellem Wachstum. Im Winter sollte daher die Luftfeuchte in Räumen bei schlecht gedämmten Außenwänden (dies sollte sich jedoch nach einer Sanierung verbessern) nicht dauerhaft über 50% liegen. Bei gut gedämmten Gebäuden sind 60% Raumlufftfeuchte tolerabel.

2.2.3 Luftqualität

Jeder, der eine Schule besucht hat, weiß, dass die Luftqualität in Klassenzimmern oft als schlecht empfunden wird. Die Luftqualität in Innenräumen wird durch ihre Verunreinigung mit Schweb- Schad- und Geruchsstoffen bestimmt. In Räumen mit hoher Belegungsdichte, wie Klassenräumen, werden diese Luftverunreinigungen hauptsächlich durch den Menschen verursacht. Mit der Aktivität der Personen steigt proportional zur Abgabe von Kohlendioxid auch die Abgabe von Geruchsstoffen. Der Kohlendioxidgehalt der Raumlufft wird daher

schon seit 150 Jahren, auch aufgrund seiner einfachen Messbarkeit, als Indikator für die Luftqualität in Räumen verwendet. Tabelle 1 vermittelt einen Überblick über die Zeitvorgaben und Mindestanforderungen an die CO₂-Konzentration von Innenräumen in Abhängigkeit von der angestrebten Raumluftqualität. Man erkennt, dass selbst bei der bescheidenen Qualitätsanforderung "mittel" eine CO₂-Konzentration von 0,1 Vol.-% (die sog. Pettenkofergrenze) nicht überschritten werden sollte. In [Boos et al. 2006] wird folgende praktische Verfahrensweise vorgeschlagen: Ziel ist, dass in dauernd benutzten, frei belüfteten Innenräumen sowohl die Beurteilungswerte (ΔCO_2 : Differenz zwischen CO₂-Konzentration innen und außen) als auch die gleitenden Stundenmittelwerte im Beurteilungszeitraum unter dem Wert von $\Delta\text{CO}_2 = 0,06$ Vol% liegen (etwa 0,1 Vol% absolut). Die gleitenden Stundenmittelwerte dürfen in dauernd benutzten, frei belüfteten Innenräumen im Beurteilungszeitraum den Wert von $\Delta\text{CO}_2 = 0,1$ Vol% nicht überschreiten (etwa 0,14 Vol% absolut). Kein Beurteilungswert in dauernd benutzten, frei belüfteten Innenräumen darf im Bezugszeitraum den Wert von $\Delta\text{CO}_2 = 0,15$ Vol% überschreiten (etwa 0,19 Vol% absolut).

Die Bewertung erfolgt in der vorliegenden Untersuchung nach den in [DIN EN 15251] festgelegten Maximal-Werten für die Kohlendioxid-Konzentration in Klassenräumen. Bei Außenluftkonzentrationen von 0,04 Vol% sollte ein Wert von 0,14 Vol% nicht andauernd überschritten werden. Werte unter 0,1 Vol% sind anzustreben. Dazu wird ein Außenluftvolumenstrom von 15 bis 25 m³/h Person für Klassenräume erforderlich. Für gering verschmutzte Gebäude werden zusätzlich 1,5 bis 2,5 m³/(hm²) Grundfläche benötigt. Bei einer Belegung von 29 Schülern und einem Lehrer pro Schulraum mit einer Grundfläche von 60 m² (2 m²/Schüler) entspricht das einem Außenluftvolumenstrom von 540 bis 900 m³/h. Wie Bild 3 zeigt, wird die Leistungsfähigkeit von Schülern von der Raumluftqualität beeinflusst. Man ersieht, dass die Leistung mit einer höheren Außenluftfrate zunimmt [Wargocki et al. 2006]. Die Versuche fanden in zwei aufeinander folgenden Sommern in Klassenräumen, ausgestattet mit Lüftungsanlagen (mit neuen Filtern je Woche) und regelbaren Kühleinheiten pro Klassenzimmer statt. Den 10 bis 12 Jahre alten Schülern wurden während der Versuchsphase acht ähnliche Aufgaben gestellt (Lesen, Mathematik, etc.) Die Lüftungsraten wurden über kontinuierliche Kohlendioxidmessungen bestimmt. Die Studie erbrachte das Ergebnis, dass eine Verdoppelung der Außenluftfrate die Arbeitsgeschwindigkeit um durchschnittlich 8% verbessert. Es wurde allerdings kein messbarer Einfluss auf die Fehlerquote festgestellt.

Nach derselben Studie übt auch die Raumlufttemperatur einen nicht zu unterschätzbaren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Schüler aus (Bild 4). Bei niedrigen Temperaturen erzielten die Schüler signifikant bessere Ergebnisse. Diese könnten darauf schließen, dass sich bei einer Absenkung der Raumtemperatur um 1 K die Leistung in Bezug auf die Geschwindigkeit der Aufgabe um 2% steigern lässt. Bezieht man nur die signifikanten Testergebnisse mit ein, lässt sich die Leistung um 4% verbessern. Die Raumtemperatur hatte jedoch keinen Einfluss auf die Fehlerquote bei den verschiedenen Leistungstests. Allerdings kann von einem vertikalen Lufttemperaturunterschied eine beträchtliche Unzufriedenheit mit dem Raumklima ausgehen, insbesondere dann, wenn im Fußbereich andere Temperaturen vorliegen als im Kopfbereich. Dies zeigt Bild 5, aus dem hervorgeht, dass der Anteil der Unzufriedenen bis auf 40% (und

mehr) ansteigen kann, wenn größere Temperaturungleichmäßigkeiten auftreten. Die alte Regel "Kopf kalt, Füße warm" hat offenbar nur eine eingeschränkte Gültigkeit.

2.2.4 Akustik

Die von Schülern und Lehrern subjektiv empfundenen akustischen Bedingungen in Unterrichtsräumen resultieren aus störenden Schallquellen, die über mehrere Ausbreitungswege (Außenbauteile, Fenster sowie Trennwände und Trenndecken) hörbar werden und sich mit dem Eigengeräusch überlagern. Da je nach Hör- und Sprachvermögen die Schüler und Lehrer bei auftretendem Lärm ihre Lautstärke instinktiv anheben, kann sich eine verheerende "Lautstärkepirale" (sog. Lombardeffekt) ergeben. Insgesamt wirken sich chronische Lärmexposition einerseits und schlechte Klassenraumakustik andererseits ungünstig auf die neurophysiologische Entwicklung von Schulkindern - insbesondere auf das Aufmerksamkeitsverhalten - aus. Darüber hinaus beeinträchtigen sie die für die Kommunikation wesentliche Entwicklung der Sprachkompetenz. Deshalb sind alle akustischen Bedingungen sorgfältig zu beachten und im Kontext der anderen Raumeigenschaften zu gestalten.

Für kommunikationsintensive Bereiche, wie Unterrichtsräume, gelten besondere akustische Anforderungen. Ihre Vernachlässigung oder Missachtung führt zu Belastungen, Belästigungen, Beeinträchtigungen und Defiziten [Schick, et al. 1999]. Danach bestehen eindeutige Zusammenhänge zwischen Sprachverständlichkeit und (raum-) akustischen Kenngrößen bzw. Maßnahmen [Airey, MacKenzie 1999, Lubmann, Sutherland 2001]. In einem bisher einmaligen Projekt wurde sogar der Zusammenhang zwischen kognitiver Leistung und akustischer Situation im Klassenraum eindrucksvoll belegt [Klatte et al. 2006]. Bild 6 zeigt, wie sich der Prozentsatz von richtigen Antworten verändert. Bei Kindern aus Klassenräumen mit kurzen Nachhallzeiten stimmen die Antworten wesentlich häufiger, als bei Kindern aus Klassenräumen mit längeren Nachhallzeiten.

Bisher werden Klassenräume meist stark bedämpft. Dies empfiehlt beispielsweise auch die aktuelle [DIN 18041]. Auch sind Vorgaben hinsichtlich der Positionierung von Schallabsorbieren und -reflektoren bekannt [Fasold et al. 1987]. Beide Maßnahmen zusammen optimieren das Verhältnis von nützlicher zu schädlicher Stimmenergie. Damit wird - einen geringen Störpegel vorausgesetzt - eine gute Sprachverständlichkeit erreicht. Auch in der angelsächsischen Literatur [Bistafa, Bradley 2000] wird der Fokus auf eine starke Raumbedämpfung und einen geringen Störpegel (z.B. 25 dB geringer als Pegel des Sprechers in einem Meter Abstand) gelegt. Die Realität zeigt, dass die Störpegel (von außen und innen) deutlich höher sind. Dies liegt einerseits an der üblicherweise schlechten Schalldämmung nach außen (gegen Verkehrs- und Industriergeräusche) und innen (Flure, Nachbarräume), aber auch an den von Schülern selbst erzeugten Schallpegeln. Nicht beachtet wird im aktuellen Stand der Technik für Schulen der „Irrelevant Sound Effect“ [Klatte et al. 2004]. Dieser bedeutet, dass die „Speicherleistung“ (also die Kapazität des verbalen Arbeitsgedächtnisses) von gesprochenen Inhalten durch irrelevante (auch leise!) Hintergrundgeräusche reduziert wird.

Bei der Formulierung der akustischen Anforderungen wird berücksichtigt, dass ein nicht zu vernachlässigender Teil der Nutzer über ein eingeschränktes Hörvermögen verfügt bzw. in einer Sprache kommunizieren muss, die nicht als Muttersprache gelernt wurde. Die Festlegung eines zulässigen Störschalldruckpegels erfolgt in Anlehnung an die recht strengen Vorgaben von [DIN 18041]. Für alle Unterrichtsräume soll die hohe Anforderung von 30 dB(A) gelten. Aus diesen Anforderungen kann bei bekanntem Außenlärmpegel die erforderliche Schalldämmung der Außenbauteile bestimmt werden. Wird der Immissionsrichtwert tags nach [VDI 2058] für reines Wohngebiet von 50 dB(A) verwendet, ergibt sich nach [DIN 4109] ein erforderliches resultierendes Schalldämmmaß von 30 dB. Auf eine Korrektur wegen des Verhältnisses von Außenbauteil- zu Raumgrundfläche wird verzichtet; sie wird als „Sicherheitsreserve“ betrachtet. Für die Außenbauteile an straßenzugewandten Seiten mit häufig an- und abschwellendem Lärm verursacht durch einzeln vorbeifahrende Fahrzeuge, soll wegen der hohen Lästigkeit ein erforderliches resultierendes Schalldämmmaß von 35 dB gelten. Für die Innenbauteile sollen hinsichtlich Luft- und Trittschallschutz die Anforderungen aus [DIN 4109] gelten: für Decken 55 dB, für Wände 47 dB (zwischen Unterrichtsräumen und zu Fluren) bzw. 52 dB (zwischen Unterrichtsräumen und Treppenhäusern) bzw. 55 dB (zwischen Unterrichtsräumen und „besonders lauten“ Räumen). Türen sollen 32 dB haben.

Besonders wichtig sind auch raumakustische Anforderungen an Klassenräume, wobei die Nachhallzeit eine entscheidende Rolle spielt. Als objektive Zielgröße wird eine Soll-Nachhallzeit von 0,45 Sekunden formuliert. Dieser Wert ergibt sich z.B. aus der Empfehlung von [DIN 18041] für Räume mit einem Volumen von 200 m³ und der Nutzung „Unterricht“, mit der Reduzierung der Sollnachhallzeit um weitere 20 % für Hörgeschädigte und Nicht-Muttersprachler. Bei richtiger Positionierung der zur Einhaltung der Nachhallzeit erforderlichen Absorberflächen ergibt sich im Raum automatisch ein relativ hoher Deutlichkeitsgrad und eine gute Sprachverständlichkeit. Auf eine gesonderte Anforderung an den Deutlichkeitsgrad wird daher verzichtet. Bild 7 zeigt, dass für sprachliche und musikalische Darbietungen in der Regel unterschiedlich lange Nachhallzeiten angebracht erscheinen. Konzertsäle klingen länger nach (ca. 1 bis 2 s). Im Schulbau führt dies bei wechselnder Raumnutzung (heute Vortrag, morgen Konzert) zu gewissen Schwierigkeiten. Das bedeutet, dass man bei gemischt genutzten Räumen die Nachhallzeit etwa "in der Mitte" zwischen Sprache und Musik einstellen muss. Die kostspieligere Lösung, mit veränderbarem Raumkulissen zu arbeiten, scheidet im Schulbau meistens aus „Sparsamkeitsgründen“ aus.

2.2.5 Licht

Etwa 80 bis 90% der Informationsaufnahme des Menschen erfolgt über das Auge. Der Bereitstellung eines nutzungsgerechten, lernfördernden und kommunikativen visuellen Umfelds kommt daher gerade in Schulen eine besondere Bedeutung zu. Hierbei ist das Anforderungsspektrum an die Beleuchtungsplanung und -technik mit den diversen Funktionsbereichen von Ausbildungsstätten (Klassenzimmer, Fachräume, Räume für Medienarbeit, Cafeterien, Turnhallen etc.) groß. Gezielte Tageslichtnutzung und effiziente Kunstlichtsysteme in Abstimmung mit Lichtmanagementsystemen gestatten die Erfüllung der unterschiedlichen Sehanforderungen bei gleichzeitig hoher Energieeffizienz. Bei der

Sanierung von Beleuchtungsanlagen sind bauliche Parameter kaum zu variieren. Beim Austausch von Verglasungen und Sonnenschutzsystemen können die natürlichen Beleuchtungsverhältnisse im Allgemeinen dennoch signifikant bzgl. Entblendung und größerer natürlicher Raumtiefenausleuchtung (z.B. durch lichtlenkende Systeme) verbessert werden. Elektronische Vorschaltgeräte und Leuchten mit effizienter Reflektortechnik stellen Verbesserungspotenziale beim Ersatz des künstlichen Beleuchtungssystems dar. Lichtmanagementsysteme können die Betriebszeiten in Abhängigkeit des zur Verfügung stehenden Tageslichts oder bei Nichtnutzung der Räume herabsetzen und damit den Energieverbrauch senken.

Für Klassenzimmer wird im Nutzungsprofil der [DIN V 18599] ein Wert der Beleuchtungsstärke von 300 lx in Höhe der Nutzebene (0,8 m über dem Fußboden) angenommen. Nach [DIN 5035-4] betragen die Mindestbeleuchtungsstärken in „Allgemeinen Unterrichtsräumen“ ebenfalls 300 lx. Durch das einfallende Tageslicht sollten die erforderlichen Werte der Beleuchtungsstärke so gut wie möglich abgedeckt werden. Einen Hinweis auf die Güte der Tageslichtversorgung liefert der Tageslichtquotient eines Raums. Der Tageslichtquotient ist das Verhältnis der Beleuchtungsstärke an einem Punkt im Innenraum zur Beleuchtungsstärke im Freien ohne Berücksichtigung des direkten Sonnenlichtes. Eine gute Tageslichtversorgung entspricht nach [DIN V 18599 Lichtversorgung] einem Quotienten von (ermittelt in Raummitte) $\geq 6 \%$, eine mittlere zwischen 6% und $\geq 4 \%$, eine geringe zwischen 4% und $\geq 2 \%$ und „keine Tageslichtversorgung“ herrscht bei Tageslichtquotienten $< 2 \%$ vor.

Daneben spielt die Blendung durch direkte oder diffuse Sonneneinstrahlung bei der Beurteilung der visuellen Behaglichkeit eine Rolle. Nach [DIN EN 12464-1] ist zwar die „psychologische“ Blendung durch Fenster noch nicht abschließend untersucht. Hierfür steht zurzeit kein geeignetes Blendungsbewertungsverfahren zur Verfügung. Um jedoch eine orientierende Bewertung vornehmen zu können, wird auf die Aussage der [DIN 5035-7] zurückgegriffen: „Aufgrund der positiven psychologischen Wirkung des Tageslichtes werden in hellen Räumen durch Fenster gesehene Leuchtdichten bis 4.000 cd/m^2 im Allgemeinen als nicht störend empfunden. Wie Bild 8 zeigt, hängt die Leistungsfähigkeit auch von der Beleuchtungsstärke im Raum ab. Schwierigere Sehaufgaben erfordern höhere Beleuchtungsstärken.“

2.3 Energiesparen als pädagogisches Projekt

Energiesparen mobilisiert wegen der aktuellen politischen Diskussion des Umweltschutzes und der CO₂-Emissionsreduzierung die Schüler, Lehrer und die Elternschaft gleichermaßen. Es liegt deshalb nahe, die Schulgemeinschaft aktiv in den Prozess der Schulsanierung einzubeziehen. Die Einbindung und Beteiligung der Schulgemeinschaft am Projekt dient mehreren Zielen. Die Kommunikation zwischen dem Träger der Einrichtung und den Gebäudenutzern sowie den Planenden wird ermöglicht und unterstützt. Implizit bei den Schülern vorhandenes Wissen kann in die Konzeptfindung integriert werden. Dies trägt der Erkenntnis Rechnung, dass die Schüler durch den alltäglichen Aufenthalt im Gebäude und dem zugehörigen Raumklima auch Erfahrungen bzgl. der Unzulänglichkeiten des Raumklimas besitzen. Dieses Wissen muss bewusst und nutzbar gemacht werden. Die Schüler erlernen am Beispiel der Schulsanierung Methoden, ihre

Ideen über einfache, nicht perfekte Modelle entpersonalisiert darzustellen. Die gemeinsame Kommunikation über die Sanierung kann dann anhand des in Bild 9 schematisch dargestellten Modells erfolgen, welches letztlich zu einer Steigerung des Schüler-Umweltbewusstseins führt. Dabei arbeiten drei Projekt-Säulen Hand in Hand, nämlich:

- Das Schulgebäude spart Energie
- die Betriebskosten für den Schulträger werden reduziert
- Die Schüler erhalten aktuellste Lehrinhalte, was den Unterricht interessanter gestaltet

Die Schüler lernen auf diesem Wege Teamfähigkeit, aber auch selbstständiges Arbeiten. Sie müssen sich mit dem Wissen der am Projekt beteiligten Planungsgruppe auseinandersetzen und üben die Kommunikation mit Fachleuten. Ziel ist es dabei, das kreative Potential der Schüler zu wecken und den Erwerb von neuem fachbezogenem Wissen zu fördern.

Die Einbindung und Beteiligung der Schulgemeinschaft in die Sanierung in dieser Form hat Modellcharakter. Dadurch kann das Thema in eine große Öffentlichkeit transportiert werden. Das Thema des Projektes wird über die Schüler in die häuslichen Bereiche weitergeleitet und erfährt so eine Multiplikation. Dem Projekt steht ein erweiterter Ideenpool zur Verfügung. Die Einbindung der Gebäudenutzer in dieser Form bietet die Chance, dass das Projekt eine große Akzeptanz unter den Betroffenen findet. Die verbesserte Kommunikation fördert die Zufriedenheit mit dem Projekt bei den Beteiligten.

3 Beschreibung des Schulgebäudes

Bild 10 vermittelt anhand eines Luftbildes einen Überblick über die gesamte bauliche Anlage des Gymnasiums. Der Baukörper ist um ca. 30 Grad gegenüber der Nordrichtung gedreht, sodass Südwest-, Südost-, Nordost- und Nordwest-Fassaden entstehen. Der umbaute Raum des Schulgebäudes beträgt 27.000 m³ bei einer beheizten Fläche von ca. 8.500 m².

3.1 Bestandsaufnahme und Rahmenbedingungen

Die ersten Gebäudeteile wurden 1964 errichtet und kontinuierlich aus- und umgebaut. Das Ursprungsgebäude aus dem Jahr 1964 wurde 1974 im Ostflügel aufgestockt. 1984 kam ein Teil des Nordflügels hinzu. 1993 entstand der Anbau der Aula und der Westflügel. Für das Jahr 2009 ist eine Mensa geplant. Der umbaute Raum des Schulgebäudes beträgt ca. 27.000 m³ bei einer beheizten Fläche von ca. 8.500 m². Das Schulgebäude beinhaltet übliche Klassenzimmer, Fachräume für Chemie, Biologie, Physik, Zeichnen, Werken, Musik, ein Observatorium, eine Aula (die auch als Veranstaltungsraum genutzt wird) und eine Bibliothek. Tabelle 2 vermittelt einen Überblick über die Geschoßflächen und die Hüllflächenanteile, wie sie auf die einzelnen Bauabschnitte in den Jahren 1964 bis 1993 entfallen. In Bezug auf jene Bauteil-Kennwerte, die bei den vorliegenden Untersuchungen bedeutsam sind, wurde eine sorgfältige und detaillierte Bestandsaufnahme vorgenommen. Das Resultat ist in Tabelle 3 wie-

dergegeben, welche den Schichtaufbau aller Bauteile, die Schichtdicken, ihre Wärmeleitfähigkeit und den ermittelten U-Wert enthält. Es ist verständlich, dass in früheren Bauabschnitten in den 60-er und 70-er Jahren keine Wärmedämmeigenschaften für die Bauteile gewählt worden waren, welche den heutigen Vorstellungen des energiesparenden Wärmeschutzes entsprechen. Dies gilt auch für die Fenster; die frühere Isolierverglasung mit U-Werten in der Größenordnung 2,5 bis 3 W/m²K kann nicht mit dem U-Wert heutiger Wärmeschutzgläser (ca. 1,0 W/m²K) verglichen werden. Man muss aber insgesamt feststellen, dass die Bauteile der früheren Bauabschnitte für die damals geltenden Bedingungen relativ hochwertig gewählt worden waren.

3.2 Begründung der Raumwahl für die Untersuchungen

Für die Untersuchungen mussten Räume aus Sicht der Gebäudenutzer mit besonderen raumklimatischen Problemen ausgewählt werden. Von Schülern und Lehrern wurden neben den Räumen mit Südwestausrichtung vor allem die Räume an der Südostseite sowie die Räume 207 und 208 an der Nordwestseite genannt. Im Rahmen einer Schulbegehung im Juni 2006 durch Vertreter der Schule, des Elternbeirates, des Landratsamtes, des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, des Architekturbüros werkbureau und des Ingenieurbüros Hausladen wurden aus den genannten Räumen die Zimmer 205 (für alle Räume mit Südwestausrichtung, Baujahr 1964), 207 und 208 für die Nordwestseite, Baujahr 1984, sowie 211 (für die Südostseite mit Orientierung zur Haidmühlstrasse, Baujahr 1974) ausgewählt. Als Referenzraum (laut Auskunft der Nutzer ein Raum mit vergleichsweise angenehmen Klima) wurde N04 im Gebäudeteil von 1993 im Erdgeschoss ausgesucht. Bild 11 veranschaulicht anhand eines Lageplans die Situierung der ausgewählten Räume. Die Belegung dieser Räume schildert Tabelle 4. Die Belegungszeiten sind unterschiedlich. Bild 12 zeigt - mit Angabe des Baujahres und der Orientierung - fotografische Aufnahmen der Außen- und Innenansichten der ausgewählten Räume.

Für die weiteren Untersuchungen wurde auch die Aula des Schulgebäudes ausgewählt, und zwar deshalb, weil sie besondere raumklimatische und akustische Probleme aufweist, die im Zuge einer Sanierung angegangen werden sollten. Die Aula unterliegt einer Mehrzweckhalle. An ca. 200 Tagen im Jahr dient sie zweimal täglich als Pausenhalle. Es finden in ihr jährlich etwa 30 unverstärkte Veranstaltungen (20 Musik, 10 Sprache) und 30 elektroakustisch verstärkte Veranstaltungen statt. Hinsichtlich der raumklimatischen Verhältnisse im Sommer werden Überhitzungen bei größeren Veranstaltungen aufgrund mangelhafter oder beschädigter Sonnenschutzsysteme und unzureichender Lüftungsmöglichkeiten berichtet. Eine Reparatur des schadhafte Sonnenschutzes soll im Rahmen des Bauunterhalts erfolgen. Ein weiteres Problem in der Aula ist die Belüftung bei Veranstaltungen an warmen und schwülen Tagen. Die derzeitige Anlage kann die Zuluft nur erhitzen und nicht kühlen.

Beim Betrieb der Anlage ist außerdem ein Geräuschpegel im Raum wahrnehmbar, der jedoch laut Hausmeister bei Veranstaltungen nicht stört. Die Schalllenkung in der Aula ist nicht optimal. Über dem Bühnenbereich befinden sich absorbierende Flächen (Akustikfilz hinter gelochtem Gipskarton) in den Dachschrägen, die keine nützlichen Reflexionen in den Publikumsbereich oder zurück auf die Bühne liefern. Die Nutzer haben deshalb schon behelfsweise zwei

Holzplatten über die Bühne aufgehängt. Ungünstig ist auch die Asymmetrie der Aula bezüglich ihrer Längsachse. Während von der Glasfassade nützliche Reflexionen in den Zuschauerbereich geworfen werden, fehlen diese von der gegenüberliegenden Seite durch den seitlich angeschlossenen Raumbereich. Aus diesen Gründen wurde auch die Aula des Gymnasiums für die Untersuchungen ausgewählt.

4 Durchführung der Untersuchungen

4.1 Datenerhebung für Bauteile und Anlagen

Zur Durchführung der Untersuchungen müssen die bei der Bestandsaufnahme eruierten Daten vertieft und konkretisiert werden. Die energetische Konkretisierung erfolgte durch Auswertung von Bestandsplänen und Ortstermine mit dem Architekturbüro werkbureau sowie Befragung der Hausmeister und der für die Schule zuständigen Techniker. Aufgrund der erhobenen Daten wurde ein Bauteilkatalog für die Bestandsbauteile mit Hilfe einer Software [Dämmwerk] erstellt. Es sei angemerkt, dass nicht alle erforderlichen Daten aufgrund der Bestandsanalyse gewonnen werden konnten, da entsprechende Unterlagen oder Informationen nicht verfügbar waren bzw. nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand hätten gewonnen werden können. Für die fehlenden Daten wurden Annahmen aus vergleichbaren Objekten ergänzt.

Tabelle 5 vermittelt für die ausgewählten Räume konkretere Angaben über die Raumabmessungen, die Fassaden und Fenster. Tabelle 6 beschreibt die Innenbauteile der ausgewählten Räume näher, mit Angaben zu deren Schichtaufbau und Schalldämmung gemacht werden. Tabelle 7 liefert eine Beschreibung der technischen Anlagen, die in den ausgewählten Räumen installiert sind. Die anlagentechnische Bestandsaufnahme erfolgte durch das IB Hausladen. Bei der Wahl der Randbedingungen und der Eingangsdaten für die Berechnung nach DIN V 18599 mussten weitere Annahmen getroffen werden. In der Regel wurde jedoch auf Standardwerte zurückgegriffen. Ebenfalls nach DIN V 18599 erfolgt eine Zonierung des Gebäudes anhand der maßgeblichen Nutzungsrandbedingungen für verschiedene Gebäudebereiche in 8 unterschiedliche Zonen.

4.2 Messungen in einzelnen Klassenzimmern

In den ausgewählten Räumen wurde eine Reihe von Messungen ausgeführt. Da raumklimatische Aussagen nötig werden, müssen zum Vergleich auch Außenklimadaten herangezogen werden. Da das Gymnasium Miesbach nur ca. 11 km (Luftlinie) vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen entfernt liegt, wurden die Daten der dortigen Wetterstation zu Vergleichszwecken herangezogen (vgl. Bild 13). In dieser ausgezeichnet ausgestatteten Messstation werden alle maßgeblichen Wetterdaten seit mehr als 50 Jahren registriert.

Zur Messung der thermischen Behaglichkeit und der Luftqualität hat das IBP einen speziellen Messstander entwickelt (Bild 14). An diesen Ständern sind in den Höhen 0,1 m, 0,6 m, 1,1 m und 1,7 m über Fußboden Sensoren zur Messung der Lufttemperatur und der relativen Raumluftfeuchte angebracht. In 1,7 m Höhe befindet sich zusätzlich ein Kohlendioxidssensor (Bild 15). Die Messachse wurde direkt an einem Sitzplatz, möglichst in Mitte des Klassenzimmers aufgestellt. Die Messungen erfolgten während einer heißen Woche im Sommer sowie während einer kalten Woche im Januar.

Am 13. Januar 2007 wurden vor Sonnenaufgang (zwischen ca. 6.30 Uhr und 7.30 Uhr) Thermografie-Aufnahmen aller Fassadenbereiche von außen erstellt (Bild 16), um den wärmetechnischen Gebäudebestand zu dokumentieren. Die

Außenlufttemperatur betrug während der Aufnahmen ca. 3 bis 6 °C. Der Hausmeister wurde gebeten, während der Nacht vor der Messung die Heizung der Räume ohne Nachtabenkung zu betreiben.

Am 13. Januar 2007 erfolgte ferner die Bestimmung der Luftdichtheit der Räume 205, 208 und N04 nach dem Blower-Door-Messverfahren in Anlehnung an [DIN EN 13829]. Eine fotografische Aufnahme der Messvorrichtung zeigt Bild 17. Dabei wird entsprechend der Prüfanforderung der Luftwechsel bei 50 Pa Differenzdruck ermittelt. Hierzu wurde in die Flurtür der entsprechenden Räume eine Blower-Door Typ3 eingebaut. Alle Messungen der Räume erfolgten in ihrem momentanen Ist-Zustand, d.h. geschlossen sind lediglich alle Fenster und Türen. Zur Bestimmung der Luftdichtheit des Raumes bei geschlossenen Fenstern wurden nur an den Verbindungstüren zu den Nachbarräumen Abklebungen vorgenommen.

Die vorhandene Beleuchtungsstärke wurde während der Nachtstunden ohne Tageslicht in den Untersuchungsräumen jeweils auf den Schultischen (die Tischhöhe von 0,76 m entspricht näherungsweise der Höhe der Nutzebene von 0,8 m) mit Hilfe eines Hand-Luxmeter gemessen (vgl. Bild 18). Die Ermittlung des Tageslichtquotienten für die einzelnen Räume erfolgte nach [DIN V 18599]. Die Beurteilung der Blendung wurde exemplarisch im Raum 205 durch Messung der Leuchtdichteverteilung an der Fassade mit einer Leuchtdichtekamera durchgeführt.

Die Nachhallzeit wurde mit dem Verfahren der integrierten Impulsantwort nach [DIN EN ISO 3382] bei normaler Messpunktdichte und Anregung durch pseudo-statistisches Rauschen (Maximalfolgen) über einen Dodekaeder-Lautsprecher gemessen (vgl. Bild 19). Die räumliche Mittelung erfolgte durch arithmetische Mittelung der einzelnen Nachhallzeiten für alle Quellen- und Mikrofonpositionen. Pro Klassenzimmer wurden 8 Impulsantworten (2 Schallquellen-Positionen mit je 4 Mikrofon-Stellungen) gemessen, in der Aula 18 Impulsantworten (3 Schallquellen-Positionen mit je 6 Mikrofon-Stellungen). Alle Messungen erfolgten in unbesetzten Räumen. Zur Veranschaulichung wurde die Nachhallzeit auch für den Fall berechnet, dass sich Personen in den Räumen aufhalten (20 Personen in den Klassenräumen, 350 Personen in der Aula), die eine zusätzliche äquivalente Absorptionsfläche nach [Fasold et al. 1987] repräsentieren (Mittelwert Männer und Frauen, sitzend).

Der Deutlichkeitsgrad in allen Klassenräumen wurde für jeden Sitzplatz in 1,2 m Höhe frequenzabhängig gemessen, wobei als Schallquellenposition immer ein Ort in 1,6 m Höhe hinter dem Lehrertisch diente. Um eine grafisch gut darstellbare ortsabhängige Größe zu erhalten, wurde der Deutlichkeitsgrad als arithmetischer Mittelwert der in den wichtigen Oktavfrequenzbändern 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz gebildet.

Die (Luft-)Schalldämmung der Klassenraumtür und jeweils einer Trennwand zwischen 2 Unterrichtsräumen, nur im Falle von Raum N04 auch der Decke, wurde als Bau-Schalldämm-Maß R' in Anlehnung an [DIN EN 140-4] bestimmt. Ferner wurden zeitlich gemittelte äquivalente Dauerschalldruckpegel nach [DIN 45641] zu folgenden Zwecken gemessen:

Bestimmung des Störgeräuschpegels bauseitiger Geräusche nach [DIN 18041]. Dazu wurde in den Klassenräumen mit 2 Festmikrofonen bei geschlossenen Fenstern und Türen für jeweils 30 Minuten gemessen.

Bestimmung des Betriebsgeräusches der Lüftung in der Aula. Dazu wurde an 10 gleichmäßig über den tief liegenden Bereich vor der Bühne verteilten Positionen in 1,2 m über dem Boden gemessen, je einmal bei eingeschalteter und ausgeschalteter Lüftung. Das stationäre Geräusch der Lüftung dominiert den Störgeräuschpegel bauseitiger Geräusche in der Aula eindeutig. Aus diesem Grunde wurde eine Mittelungszeit von nur 30 Sekunden gewählt.

Bestimmung von Ortsabhängigkeiten der Schalldruckpegelverteilung in der Aula. Dazu wurde eine Schallquelle auf der Bühne positioniert, die breitbandiges Rauschen stationär abstrahlte. Von der Bühnenkante mittig beginnend wurde in Abständen von 1 m entlang der Raumlängsachse in 1,2 m Höhe gemessen.

Man ersieht aus dieser kurzen Schilderung der verschiedenen Messauswertungen, dass - obwohl nur relativ wenige Räume des Gymnasiums ausgewählt worden waren - dennoch eine große Zahl aufwendiger Messungen durchgeführt worden sind.

4.3 Bauphysikalische Berechnungen

Um die Ergebnisse von Messungen, die immer nur für die speziellen Randbedingungen im Messraum gelten, zu verallgemeinern und auf andere Randbedingungen zu übertragen, wurde das thermohygrische Verhalten von Klassenräumen auch rechnerisch, mittels des Raumklimasimulationsprogramms WUFI-Plus untersucht. Das Ablaufschema in Bild 20 erläutert die Vorgehensweise von WUFI-Plus. Das Rechenverfahren eignet sich u. a. zur Abschätzung von Lüftungsanforderungen in Abhängigkeit von den instationären Feuchtelasten. Darüber hinaus ermöglicht es die Berechnung der Kohlendioxid-Konzentration in den Klassenzimmern in Abhängigkeit vom Belegungsprofil und dem Lüftungskonzept. Gleichzeitig kann die Nutzenergie, also diejenige Wärmemenge, die von den Heizkörpern im Raum zur Aufrechterhaltung der erforderlichen Temperatur im Raum benötigt wird, bestimmt werden.

4.4 Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Jeder Bauherr - und jeder Schulträger - glaubt die Wirtschaftlichkeit von Investitionsmaßnahmen quasi mit dem "gesunden Menschenverstand" kalkulieren zu können, wobei immer die sog. Amortisationszeit herangezogen wird. Diese ergibt sich, in dem man die Investitionskosten ins Verhältnis zum jährlichen Nutzen setzt, der durch die getätigte Investition erreicht wird (Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis (MNV)). Allerdings entspringt, wie Bild 21 illustriert, dieser Verhältniswert, der gleichzeitig die Amortisationszeit darstellt, einem statischen Kalkül, welches den Zeiteinfluss unberücksichtigt lässt. Derartige Kalkulationen sind aber bei den rasanten Energiepreisänderungen, die sich von Jahr zu Jahr geradezu überschlagen, wirtschaftlich nicht mehr schlüssig; die gravierenden Energiepreissteigerungen erfordern vielmehr dynamische Kalküle. Derartige dynamische Kalkulationsmethoden für energieeinsparende Investitionen wurden Weise von [Werner, Gertis, 1979] im Anschluss an die damalige Energiekrise unter-

sucht. Bild 22 veranschaulicht die abgeleitete Kalkulationsmethode - ohne Zinsen, was bei kameralistischem Verhalten eines staatlichen Schulträgers angebracht erscheint - jedoch mit Berücksichtigung einer jährlichen Energiepreissteigerung (Steigerungsrate j in Bild 22). Man ersieht aus Bild 22, dass sich für die Amortisationszeit in diesem Fall eine relativ komplizierte Logarithmus-Formel ergibt, nach welcher im vorliegenden Fall die Wirtschaftlichkeitsberechnungen vorgenommen worden sind. Würde man, was unrealistisch wäre, die Preissteigerungsrate gleich Null setzen, ergäbe sich aus der Logarithmus-Formel als Grenzwert wieder die (simple) statische Amortisationsformel.

4.5 Erarbeitung von Didaktik-Konzepten zur Steigerung des Umweltbewusstseins der Schüler

Die Schulleitung hat die hohe Bedeutung, welche die durchzuführenden Untersuchungen für die Schärfung des Umweltbewusstseins der Schüler besitzen, gerne aufgegriffen und eine Reihe von Projekten gestartet, in die die Schüler unmittelbar und mittelbar eingebunden waren. Die Untersuchungen wurden auf unterschiedlichen didaktischen und pädagogischen Ebenen im Schulleben integriert, nämlich:

- Information der Lehrer, des Elternbeirats und der Schülermitverwaltung SMV
- Vortrag für interessierte Eltern durch Herrn Prof. Sedlbauer im Juli 2006
- Logowettbewerb in der Schülerschaft im Oktober 2006 (ca. 500 Teilnehmer)
- Ideenwettbewerb im Dezember 2006
- Dezember 2006 Erarbeitung eines Konzepts mit der Fachschaft Musik, dem Elternbeirat und dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik zur Akustik der Aula
- Planspiel mit den 11. Klassen „ASK US“ im Februar 2007
- Studientag der 11. Klassen zum Thema „Wohlgefühle schaffen Lernräume – Lernräume schaffen Wohlgefühle“ am 27./28. März 2007

Tabelle 8 vermittelt einen Überblick über diese pädagogischen Aktionen mit einer kurzen Beschreibung des jeweiligen Inhalts.

5 Ergebnis der Untersuchung

5.1 Energetische Aspekte

Um einen qualitativen Überblick über den energetischen Zustand des Gebäudes zu gewinnen, würde an einem Wintertag eine thermographische Aufnahme der Fassade des Nordflügels gemacht (vgl. Bild 31). Die Auswertung der Infrarotthermografie zeigt folgende erhöhte Wärmeverluste:

- im Bereich der Heizkörpernische
- im Bereich der Deckeneinbindungen bzw. tragenden Strukturen aus Stahlbeton
- im Dachraum
- im Bereich der Holzfassade im Dachgeschoss durch Hinterlüftung der Holzfassade
- im Bereich des Übergangs zum Keller

- entlang einer Linie vom Keller zum 2. OG (Strangleitungen der Heizung)

Ferner wurde zur Überblicksgewinnung ermittelt, wie sich für das Gesamtgebäude die einzelnen Energieflüsse verteilen (Bild 32). Man erkennt daraus, dass der mit Abstand größte Energieanteil für die Beheizung des Gebäudes aufzuwenden ist (mehr als 80%). Tabelle 11 vermittelt einen Überblick über die in den Jahren 2003 bis 2006 vorhandenen Energieverbräuche. Aus den über den Zeitraum 2003-2006 gemittelten Verbrauchsdaten ergibt sich ein flächenbezogener Endenergieverbrauch an Erdgas von 100,6 kWh/(m²a) und an Strom von 19,6 kWh/(m²a). Aus den im Rahmen des internationalen Projekts IEA ECBCS Annex 36 – Energetische Sanierung von Bildungsgebäuden erhobenen nationalen Energieverbrauchsdaten ausgewählter Bildungsgebäude lassen sich Vergleichsdaten ableiten. Hieraus ist ersichtlich, dass sich der Stromverbrauch des Gymnasiums Miesbach mit 19,6 kWh/(m²a) im Mittelfeld der betrachteten Vergleichsgebäude befindet. Beim Heizenergieverbrauch befindet sich das Gymnasium Miesbach in Summe betrachtet mit einem flächenbezogenen Verbrauch von 100,6 kWh/(m²a) bereits im unteren Viertel der betrachteten Gebäude.

Ermittelt man nach dem neuesten Regelwerk [DIN V 18599], das die [EnEV 2007] konkretisiert, den Primärenergiebedarf und den spezifischen Transmissionswärmeverlust für das Gymnasium Miesbach, so erhält man die in Tabelle 12 ausgewiesenen Werte. Dabei ist der Status quo ante verglichen worden mit den nach der [EnEV 2007] geforderten Werten, und zwar für Altbauten und für einen (teilweisen) Neubau. Beide Anforderungsstufen erforderten eine beträchtliche Einsparanstrengung. Dabei ist der Primärbedarf definiert als diejenige Energiemenge, die zusätzlich zum Energieinhalt des notwendigen Brennstoffs und der Hilfsenergie für die Anlagentechnik auch die Energie einbezieht, die durch vorgelagerte Prozessketten außerhalb des Gebäudes bei der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung der jeweils eingesetzten Brennstoffe entstehen. Der spezifische Transmissionswärmeverlust kann als mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) der Gebäudehülle aufgefasst werden, der neben den Wärmeverlusten der Bauteile auch die Einflüsse der Wärmebrücken und die der angrenzenden niedrig temperierten Bereiche berücksichtigt. Zugeordnet zu den jeweiligen Bauabschnitten enthält Tabelle 14 eine Zusammenstellung derjenigen baulichen Maßnahmen, die für eine energetische Ertüchtigung in Frage kämen. Auf die in Tabelle 14 mit enthaltenen Kostenangaben wird später in Ziffer 6 eingegangen. Man ersieht, dass sich durch bauliche Maßnahmen wesentliche Energieeinsparungen realisieren lassen, die den EnEV-Anforderungen in Tabelle 12 ziemlich nahe kommen. Betrachtet man die Wärmeverluste, bezogen auf die Bauabschnitte, so zeigt sich, dass die Bauabschnitte bis 1984 überproportional (82 %) zu den Gesamttransmissionswärmeverlusten beitragen.

Der Sonnenschutz im Altbau besteht aus aussenliegenden Jalousien mit Elektroantrieb ohne Zentralsteuerung, im Neubau ist ein ebenfalls aussenliegender textiler Sonnenschutz mit Zentralsteuerung (helligkeitsabhängig soweit es funktioniert) installiert. Zusammenfassend ergibt sich folgende Kurzdarstellung:

Bauabschnitt 1964

Der Wärmeschutz der Außenbauteile ist allgemein zu gering. Ca. 14% der gesamten Wärmetransmissionsverluste des gesamten Gebäudes gehen über diese

Fassade verloren. Weitere 16 % alleine über die als Schwingflügel ausgeführten Fenster. Die sich davor befindlichen Markisen sind zwar durch den großen Abstand zur Fassade ausreichend belüftet, der Markisenstoff jedoch ist in seiner Wirksamkeit als nicht ausreichend einzustufen.

Bauabschnitt 1974

Der Wärmeschutz der Außenbauteile ist ebenfalls zu gering. Allerdings macht dieser Bauabschnitt nur 9% der gesamten Hüllfläche aus. Der vor den Fenstern befindliche außen liegende Lamellen-Raffstore ist so dicht vor der Fassade angeordnet, dass ein Öffnen der Schwingfenster kaum möglich ist. Der dann noch mögliche Luftaustausch durch den evtl. geschlossenen Sonnenschutz ist behindert.

Bauabschnitt 1984

Auch in diesem Bauabschnitt ist der Wärmeschutz der Fassadenbauteile und der Fenster zu gering. Alleine die Fenster tragen zu 7% zu den gesamten Transmissionswärmeverlusten bei. Das Dach hat einen U-Wert von 0,38 W/(m²K). Die Räume besitzen keinen Sonnenschutz. Auch in Bauabschnitt 1984 wird über die in der Schule allgegenwärtigen Schwingflügel gelüftet.

Bauabschnitt 1993

Der Wärmeschutz der Außenbauteile ist mit U-Werten um 0,7 W/(m²K) bei den Außenwänden und 1,7 W/(m²K) für die Fenster nicht besonders hoch. Der Dämmstand des Daches entspricht der Erwartung. Die Räume besitzen einen Markisen-Sonnenschutz mit großzügiger Hinterlüftung.

Das Gebäude wird durch zwei Niedertemperaturkessel (370 KW, eingestellt sind 320 KW) mit Wärme versorgt. Diese laufen von Montag bis Freitag von 5.30 bis 17.00 Uhr im normalen Heizbetrieb im gesamten Gebäude, nur im Nord- und Westflügel wird wegen des Musikunterrichts bis 20.00 Uhr geheizt. Im 1993 errichteten Westflügel kann jeder Raum einzeln per Computer angesteuert werden. Außerhalb der o. g. Zeiten (also auch am Wochenende) läuft die Heizungsanlage im abgesenkten Betrieb. Ca. ab Pfingsten (liegt an den Außentemperaturen und am Ermessen des Hausmeisters) wird die Heizungsanlage manuell bis zum Ende der Sommerferien abgeschaltet, so dass nur noch der Kesselkreis aktiv ist; d. h. die Verteil- und Anbindeleitungen werden nicht aufgeheizt und umgewälzt. Die Raumtemperatur im normalen Heizbetrieb soll auf 20 °C, im abgesenkten Betrieb auf 16 °C gehalten werden (15 °C sind nicht möglich, da die morgendliche Aufheizphase sonst zu lange dauert). Der Energieträger ist Erdgas. Die Vor- und Rücklauftemperaturen liegen laut Auskunft des Hausmeisters bei ca. 70°C/50°C. Bestandsunterlagen mit eingetragenen maximal erreichbaren Temperaturen liegen nicht vor. Als Trinkwarmwasserspeicher dient ein Speicher-Warmwasser-Erwärmer für 200 Liter mit einer zusätzlichen elektrischen Heizschlange für die Warmwasser-Bereitung im Sommer. Das Gebäude wird ausschließlich natürlich belüftet. Nur die Pausenhalle, WC's, Fotolabor und die Musiksäle sind mit einer mechanischen Lüftungsanlage ohne Wärmerückgewinnung ausgestattet.

Die WUFI-Plus Berechnungen zeigen, dass zwischen der nötigen Energieeinsparung und der ebenfalls notwendigen Reduzierung der CO₂-Innenkonzentration ein zueinander gegenläufiger Zusammenhang besteht. Wird nämlich der Luft-

wechsel auf die erforderlichen $15 \text{ m}^3/\text{h m}^2$ (ca. $30 \text{ m}^3/\text{h Pers}$) erhöht, so steigt der Heizwärmebedarf gegenüber der Bestand trotz verbesserter Wärmedämmung an. Deshalb ist der Einsatz einer Wärmerückgewinnungsanlage erforderlich. Wichtig sind aber auch die resultierenden CO_2 -Konzentrationen. Bei einer Begrenzung der maximal zulässigen relativen Luftfeuchte auf 55 % erreicht man zwar aus Heizwärmebedarfsicht einen energetisch günstigsten Zustand, aber kaum eine wesentliche Verbesserung der CO_2 -Konzentration. Eine Begrenzung der maximal zulässigen CO_2 -Konzentration auf 1.500 ppm ($0,15 \text{ Vol\%}$) führt zu einem Heizwärmebedarf von fast 450 kWh . Dies ist aus energetischer Sicht gesehen eine ungünstige Lösung: die Simulation zeigt den Vorteil einer hybriden Lösung- Wird der der Klassenraum in der Zeit von 7:00 bis 14:00 Uhr mit einer reduzierten Außenlufttrate von $8,5 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ gelüftet und findet zusätzlich in den Pausen ein Stoßlüften statt, so werden auch verbesserte CO_2 -Konzentrationen erreicht. Zeitweise werden nach 3 Stunden Unterricht $0,15 \text{ Vol\%}$ etwas überschritten. Dies kann aber durch Stoßlüften nach jedem Stundenwechsel verbessert werden (also nach 45 min zusätzliches Stoßlüften). Der errechnete Heizwärmebedarf des Raumes im Vergleich zum Bestandsfall (1924 kWh) ist in diesen Fall am niedrigsten (237 kWh).

5.2 Raumklimatische Aspekte

Aus der gesamten Messperiode wurde jeweils eine repräsentative Sommer- und Winterwoche ausgewählt und detailliert ausgewertet. Die Witterungsverhältnisse während der Messwoche im Sommer können als sehr warm eingestuft werden, während die Temperaturen in der Wintermesswoche aufgrund der milden Witterung im Winter 2006/2007 für die Region untypisch waren. Die Temperaturen sind allerdings wiederum typisch für viele Teile Deutschlands. Bild 23 zeigt die zeitlichen Verläufe der Temperaturen und relativen Feuchte der Außenluft, der Sonneneinstrahlung und des Niederschlags während der repräsentativen Sommer- und Winterwoche.

Die Zeitverläufe der Temperatur und Feuchte der Innenluft sowie der dortigen CO_2 -Konzentration für dieselbe Sommer- und Winterwoche veranschaulicht Bild 25 am Beispiel des ausgewählten Klassenzimmers 205. Den Einfluss der Fassadenorientierung demonstrieren die tageszeitlichen Raumlufttemperaturverläufe in Bild 25, in dem die Südost-Ausrichtung (Raum 211) der südwestlichen (Raum 205) und der nordwestlichen (Raum 208) einander für einen Sommer- und Wintertag gegenübergestellt wurden.

Als Anforderung an die winterlichen Temperaturen wurde für Klassenräume ein Bereich von 20 bis $24 \text{ }^\circ\text{C}$ festgelegt. Kurzfristige Über- bzw. Unterschreitungen bis zu 25 bzw. $19 \text{ }^\circ\text{C}$ können zugelassen werden. Im Winter liegen je nach Klassenraum bis zu 50% der Temperaturen während der Nutzung im untersuchten einwöchigen Zeitraum Januar 2007 unterhalb von 20°C . Im Winter zeigt sich, dass im Raum 205 nur 57%, in N04 51% der gemessenen Werte über 20°C liegen. Temperaturen unter 19°C wurden im Raum 205 in 16%, im Raum 208 in 1%, im Raum 211 in 18% und im Raum N04 in 21% der Fälle gemessen. Eine Analyse der Messwerte zeigt aber, dass dies hauptsächlich in Zeiten der Pause mit Fensterlüftung bzw. in nicht belegten Zeiten am Vormittag aufgetreten ist.

Im Sommer sollten Temperaturen zwischen 23 und 26 °C angestrebt werden kurzfristige Überschreitungen bis 27°C sind zulässig. In dieser Zeit weisen Klassenzimmer in vielen Schulen aufgrund eines vergleichsweise hohen Verglasungsanteils in der Fassade, eines unzureichenden Sonnenschutzes und einer hohen Personendichte oft hohe Temperaturen auf. Nicht nur in ost- und südorientierten Räumen, wo Besonnung und Personenbelegung gleichzeitig auftreten, sondern auch in westorientierten Räumen treten diese hohen Temperaturen auf. Da der Sonnenschutz nach der Nutzungszeit am Nachmittag oft hochgefahren wird, um Witterungsschäden am Sonnenschutz zu vermeiden, können sich die so exponierten Klassenräume weiter aufheizen. Fehlende Lüftung in den Nacht- oder frühen Morgenstunden führt zu hohen Temperaturen bereits bei Unterrichtsbeginn. Dies belegen die Messungen eindrucksvoll. Im Sommer liegen je nach Klassenraum im untersuchten einwöchigen Zeitraum im Juli 2006 nur 14 bis 60% der Temperaturwerte unterhalb von 26°C. Kritisch stellt sich die Situation im Raum 211 im Südostteil der Schule dar. Hier werden die Zielwerte am häufigsten überschritten. 66% der gemessenen Temperaturen liegen über 27°C und fast 50% der gemessenen Temperaturen über 28°C. Im Vergleich dazu liegen in den Räumen 205 bzw. N04 nur 14 bzw. 20 % der gemessenen Temperaturen oberhalb von 27°C. Im Raum 208 sind dies nur 9%. Der vertikale Temperaturgradient liegt je nach Klassenzimmer sowohl im Winter als auch im Sommer zwischen 0,5 und 3,5 K, im Mittel bei etwa 1,7 K. Dies liegt im Bereich des maximalen Wertes von bis zu 3 K zwischen Kopf und Fuß und ist somit weitgehend unkritisch.

Die aufgetretenen relativen Raumluftfeuchten in den untersuchten Räumen liegen mehrheitlich im Bereich zwischen 35 und 55%. Dies sind unkritische Werte. Das Auftreten von Reizungen der Augen und Atemwege ist genauso unwahrscheinlich wie das Auftreten von mikrobiellem Wachstum. Beim Ersatz der alten undichten Fenster durch neue dichtere Fenstern würde, wenn auf eine Wärmedämmung der Außenbauteile verzichtet werden würde und das Lüftungsverhalten unverändert bliebe, die Gefahr einer Schimmelpilzbildung durch erhöhte Raumluftfeuchten und damit erhöhten relativen Feuchten auf den kalten Außenwänden bestehen. Darauf sei vorsorglich hingewiesen.

Die Ergebnisse der Luftdichtheitsprüfung der ausgewählten Klassenräume sind in Tabelle 9 wiedergegeben. Die Blower-Door-Messung in dem 1964 erbauten Raum ergab einen relativ hohen Wert von 11,0 h⁻¹. Für den Raum aus dem Jahr 1984 betrug der gemessene Wert 3,2 h⁻¹. Anforderungen an die Luftdichtheit von neuen Gebäuden werden in [DIN 4108-7] ausgesprochen. Demnach soll ≤ 3 h⁻¹ bei Gebäuden ohne raumluftechnische Anlagen erreicht werden. Allerdings werden dabei gesamte Gebäude mit mehreren Fassadenausrichtungen auf ihre Dichtheit hin überprüft. Bei den durchgeführten Messungen wurden dagegen nur einzelne Räume betrachtet. Bei den vorliegenden Räumen ist die geringe Luftdichtheit insbesondere auf offensichtliche Undichtheiten im Bereich der Fenster zurückzuführen. Der Raum N04 (Bauabschnitt 1993) lieferte einen Wert von 2,0 h⁻¹. Beim vorliegenden Raum wäre die Anforderung an ein neu zu errichtendes Gebäude eingehalten.

Den CO₂-Konzentrationsverlauf während eines winterlichen Schultages zeigt Bild 26 am Beispiel des Klassenzimmers 205. Bild 27 gibt ein Berechnungsergebnis des CO₂-Gehaltes bei verschiedenen Lüftungsstrategien mit wechseln-

den Außenluftstraten und Lüftungszyklen wieder. Bei CO₂-Außenluftkonzentrationen von 0,04 Vol% sollte die Kohlendioxid-Konzentration in Klassenräumen einen Wert von 0,14 Vol% nicht andauernd überschritten. Werte unter 0,1 Vol% sind anzustreben. In den gemessenen Räumen des Gymnasium Miesbach liegen im Winter, je nach Klassenraum, 69 bis 91% der CO₂-Werte im untersuchten einwöchigen Zeitraum oberhalb von 0,1 Vol%; 28 bis 68% der Werte sogar über 0,15 Vol%. Im Sommer liegen immerhin noch bis zu 17% der gemessenen CO₂-Werte im untersuchten einwöchigen Zeitraum oberhalb von 0,1 Vol%. Dies ist zu hoch, entspricht aber auch den Beobachtungen anderer Studien, u.a. von [Fromme et al. 2006, Grams et al. 2004].

Die exemplarisch gemessenen Beleuchtungsstärken in den ausgewählten Klassenräumen und in der Aula enthält Tabelle 10. Als Beleuchtungsmittel kommen in den Räumen überwiegend Leuchtstofflampen T26 zum Einsatz, die manuell bedient werden. In den Klassenräumen ist eine direkte Beleuchtung vorhanden, während im Zeichensaal und in den Fluren auch indirekte Beleuchtung zu finden ist. Es kommen hauptsächlich verlustarme Vorschaltgeräte (VVG) zum Einsatz. Der näherungsweise ermittelte Mittelwert der Beleuchtungsstärke beträgt je nach Klassenraum 430 bis 690 lx und liegt damit deutlich über den geforderten 300 lx. Der Tageslichtquotient beträgt 3,5 % bis 6,4.

In sämtlichen Klassenräumen und in der Aula wurden die Nachhallzeiten gemessen. Bild 28 enthält die Ergebnisse für die Klassenzimmer. Bild 29 zeigt die Ergebnisse der Störpegelmessung. Der ermittelte Deutlichkeitsgrad ist für den Raum 211 in Bild 30 wiedergegeben.

Die Nachhallzeit im für den Bauabschnitt 1964 repräsentativen Klassenraum 211 liegt im unbesetzten Zustand bei etwa 0,7 bis 0,8 s, was besetzt um die 0,6 s erwarten lässt. Dies ist ein akzeptabler Wert. Der Deutlichkeitsgrad liegt auch unbesetzt auf allen Plätzen mit deutlich über 50 % auf einem hohen Niveau. Hingegen ist im Bauabschnitt 1974 die Nachhallzeit im gesamten Frequenzbereich deutlich zu lang. Auch im besetzten Zustand wird sich die Situation nicht signifikant verbessern. Man muss eine schlechte Sprachverständlichkeit in diesen Räumen erwarten. Die 1984 errichteten Klassenzimmer übersteigen den angestrebten Bereich ab etwa 400 Hz und darüber im unbesetzten Zustand nur moderat. Besetzt wird sie in diesem Frequenzbereich überwiegend innerhalb dieses Bereiches liegen. Ungünstig ist der in diesen Räumen starke Anstieg bei tiefen Frequenzen. Der gemittelte Deutlichkeitsgrad weist trotzdem sehr hohe Werte auf, da der Frequenzbereich unter 500 Hz nicht in die Mittelung einbezogen ist. Für den 1993 erbaute Klassenraum liegen sowohl die im unbesetzten Zustand gemessenen Werte, als auch die für den besetzten Zustand bei allen Frequenzen Werte über dem anzustrebenden Bereich, tieffrequent sogar besonders deutlich. Ein Deutlichkeitsgrad von unter 50 % in der hinteren Raumbälfte ist Indiz für eine zu erwartende mangelhafte Sprachverständlichkeit an diesen Plätzen.

Bei allen untersuchten Räumen ist die Schalldämmung der Tür zum Flur unzureichend. Der gemessene Störgeräuschpegel bauseitiger Geräusche liegt im zur Straße hin orientierten Gebäudeteil bei geschlossenen Fenstern knapp unterhalb des nach der Anforderung zulässigen Störgeräuschpegels. Es muss jedoch angemerkt werden, dass sich dieser äquivalente Dauergeräuschpegel aus der

zeitgewichteten Mittelung sowohl deutlich geringerer (in Zeitintervallen ohne Straßenverkehr) als auch deutlich höherer Pegel (in Zeitintervallen, in denen Fahrzeuge die Haidmühlstraße passieren) ergibt. Man muss davon ausgehen, dass die Pegel beim Passieren von Fahrzeugen kurzzeitig weit oberhalb von 30 dB(A) liegen. Diese in unregelmäßigen Abständen auftretenden Geräusche bei ansonsten niedrigen Pegeln sind besonders lästig. Bei den anderen Gebäudeteilen wurden nur geringe Schwankungen während der Messdauer um den Mittelungspegel registriert. Begünstigend wirkt sich die durch den Innenhof gut abgeschirmte Lage sowie die der Straße abgewandte Orientierung der Räume aus. Der Störgeräuschpegel bauseitiger Geräusche lag im Messzeitraum unterhalb der zulässigen 30 dB(A).

Eine besondere akustische Situation liegt in der Aula vor. Der Störgeräuschpegel bauseitiger Geräusche liegt mit 24,0 dB(A) bei ausgeschalteter, und 35,7 dB(A) bei eingeschalteter Lüftung im Rahmen der Messgenauigkeit auf Anforderungsniveau. An den vier Messpunkten in unmittelbarer Nähe der Tür zum Technikraum mit der Lüftungsanlage sowie direkt unter den Abluftöffnungen herrschen örtlich höhere Pegel von 38,3 dB(A) bis zu 43,5 dB(A). Diese Messwerte wurden nicht in die Mittelwertbildung einbezogen.

Die im unbesetzten Zustand gemessene Nachhallzeit liegt bei Frequenzen unter 1000 Hz im anzustrebenden Bereich, ab 1000 Hz darüber. Maßgeblich ist jedoch der besetzte Zustand. Die bei Veranstaltungen üblichen 350 (gelegentlich bis 450) Zuhörer sitzen sehr dicht, es ergibt sich eine Volumenkenzahl von nur ca. 5 m³ pro Person. Damit ist der Raum prädestiniert für Sprachdarbietungen. Für Musik wären 7 bis 12 m³ pro Person erforderlich. Die Abschätzung für den besetzten Zustand liefert, bedingt durch die starke Publikumsabsorption, im mittel- und hochfrequenten Bereich Nachhallzeiten an oder leicht unter der unteren Grenze des anzustrebenden Bereichs. Für elektroakustisch verstärkte oder Sprachdarbietungen sind so kurze Nachhallzeiten sogar günstig, nicht jedoch für Musik.

Die Schalllenkung in der Aula ist nicht optimal. Über dem Bühnenbereich befinden sich absorbierende Flächen (Akustikfilz hinter gelochtem Gipskarton) in den Dachschrägen, die keine nützlichen Reflexionen in den Publikumsbereich oder zurück auf die Bühne liefern. Die Nutzer haben deshalb schon behelfsweise zwei Holzplatten über der Bühne aufgehängt. Ungünstig ist auch die Asymmetrie der Aula bezüglich ihrer Längsachse. Während von der Glasfassade nützliche Reflexionen in den Zuschauerbereich geworfen werden, fehlen diese von der gegenüberliegenden Seite durch den seitlich angeschlossenen Raumbereich.

Die Messung der Schalldruckpegel entlang der Raumlängsachse liefert eine stark ungleichmäßige Verteilung in der 50-Hz-Terz. Vor der Aularückwand bilden sich Einbrüche im Pegel im Abstand von ungeradzahligem Vielfachen (1,7 m; 5,1 m), Pegelüberhöhungen im Abstand von geradzahligem Vielfachen (3,4 m; 6,8 m) der Viertelwellenlänge von Schall bei 50 Hz aus. Das deutet darauf hin, dass in diesem Frequenzbereich stehende Wellen vor der Rückwand entstehen. Bei einem elektroakustisch verstärkten Konzert führte dies dazu, dass der Toningenieur, der sein Mischpult unglücklicherweise so aufgebaut hatte, dass er selbst am Ort eines Pegel einbruchs stand, eine beginnende Instabilität

der Verstärkeranlage durch Mitkopplung bei etwa 50 Hz nicht wahrnahm, und erst durch Zuhörer, die unmittelbar vor dem Mischpult am Ort einer Pegelüberhöhung standen, darauf hingewiesen wurde.

6 Vorgeschlagene Verbesserungsmaßnahmen

6.1 Gesamtgebäude

Das Sanierungskonzept muss energetischen und raumklimatischen Zielen gleichermaßen Rechnung tragen. Basierend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Kapitel und nach Abstimmung mit den Projektpartnern werden drei Modell-Varianten eines Gesamtsanierungskonzepts mit unterschiedlichen energetischen Einsparniveaus gebildet und anschließend energetisch und kostenmäßig bewertet. Das Sanierungsmodell 1 stellt eine rein energetische Sanierung nach dem Stand der Technik dar. Bei den beiden anderen Modellen kommt im Wesentlichen eine aus raumklimatischen Gesichtspunkten hochwertigere Anlagentechnik hinzu, wobei Modell 3 die energetisch hochwertigste Lösung beschreibt. Man kann die drei vorgeschlagenen Sanierungsmodelle deshalb mit folgenden Kurzbezeichnungen belegen:

Modell 1: geringe Verbesserungen

Modell 2: mittlere Verbesserungen

Modell 3: große Verbesserungen

Bei den Modellen 1 und 2 werden aufgrund des bereits relativ guten Dämmniveaus im Bestand von 1993 nur die Bauabschnitte 1964, 1974 und 1984 mit in die Betrachtungen einbezogen. Für alle drei Bauabschnitte sind dies die Anbringung eines Wärmedämmverbundsystems an den Außenwänden und der Austausch aller Fenster. Aufgrund der bereits relativ guten Dämmniveaus im Bestand wurden die Dächer der Bauabschnitte 1974 und 1984 nicht in die Betrachtungen mit einbezogen und nur die obersten Geschossdecke für den Bauabschnitt 1964 energetisch ertüchtigt. Im Modell 3 kommt neben einer deutlichen Erhöhung des Dämmstandards fast aller Bauteile (inkl. der Dächer) außerdem noch die Dämmung der Bodenplatte durch einen zusätzlichen Fußbodenaufbau mit Vakuumdämmung und schwimmendem Estrich hinzu. Auch werden die Wände gegen Erdreich mit Perimeter- bzw. Innendämmung ausgeführt.

Die Energieversorgung der Schule soll bei allen drei Modellen durch einen Anschluss an das im nächsten Jahr geplante Fernwärmenetz realisiert werden. Die bestehenden Kessel werden demontiert. Zur Reduzierung der sommerlichen Überhitzung in den Klassenräumen ist ein Sonnenschutzsystem mit Tageslichtlenkung unterschiedlicher Güte und Steuerungsmöglichkeit unumgänglich. Für eine effektive Beleuchtung sind nur in den Modellen 2 und 3 Maßnahmen vorgesehen. Gleiches gilt für den Einbau einer Lüftungsanlage sowie die Steuerung der Fensterflügel. Zur Verringerung des Primärenergiebedarfs ist ferner in diesen Modellen noch die Installation einer Photovoltaik-Anlage geplant.

Der Primärenergiebedarf unterschreitet bei allen 3 Varianten deutlich die EnEV-Anforderungswerte. Der spezifische Transmissionswärmeverlust wird nur bei der Variante 3 unterschritten. Die Anforderungen nach EnEV werden jedoch bei allen Varianten eingehalten, da die verbesserten Einzelbauteile jeweils die zulässigen U-Werte nach EnEV unterschreiten. Um auf die Fördermittel der KfW zugreifen zu können, sollte eine ganzheitliche Sanierung inkl. der Dachflächen entsprechend Modell 3 durchgeführt werden. Ansonsten kann die Voraussetzung für die Förderung, ein spezifischer Transmissionswärmeverlust kleiner als der des Anforderungswertes gemäß EnEV2007 für den Neubau ($0,66 \text{ W/m}^2\text{K}$), nicht erfüllt werden.

Bei Umsetzung der Sanierungsmodelle 2 und 3 ist zu erwarten, dass sich eine erhöhte Leistungsfähigkeit der Schüler ergibt. Durch den messtechnischen Vergleich des Raumklimas vor und nach der Sanierung kann gezeigt werden, dass sich die Mehrkosten lohnen. Die Zusatzkosten durch die integrale Betrachtungsweise spiegeln sich vor allem in den Kosten für die Erneuerung des Sonnenschutzes, der zentralen Lüftungsanlage, der automatischen Lüftungsmöglichkeit über die Fensterflügel, die Maßnahmen zur Verbesserung der Akustik sowie im Bereich der Raumschale wieder. Insbesondere bei Sanierungsmodell 3 dürfen die bei der Aula nötigen Verbesserungen nicht vergessen werden, welche man -prioritär- in folgender Reihenfolge vornehmen könnte:

Priorität 1: Installation eines ca. $6 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ großen Reflektors (kann aus Einzelplatten bestehen) über der Bühne zur Verbesserung der Schalllenkung; Belegung der Rückwand des Zuschauerbereiches mit tieffrequent wirksamen Absorbern zur Verhinderung starker örtlicher Schwankungen in der Schalldruckpegelverteilung.

Priorität 2: Anschaffung mobiler schallreflektierender Stellwände zur Abtrennung des niedrigen seitlichen Bereiches und zum Umschließen klein besetzter Orchester auf der Bühne für eine bessere Schalllenkung sowie Verkleidung der Bühnenrückwand mit Holzpaneelen. Einbau eines saugseitigen Schalldämpfers in die Lüftungsanlage. Aus Brandschutzgründen werden die Tür und das runde Fenster in der Aularückwand (zu dem Raum, in dem die Lüftungsanlage steht) ausgetauscht. Die neue Tür sollte ein bewertetes Schalldämmmaß von $R_w = 32 \text{ dB}$ (d.h. $R_{w,p} = 37 \text{ dB}$) besitzen, das Fenster ein bewertetes Schalldämmmaß von $R_w = 32 \text{ dB}$ (d.h. $R_{w,p} = 34 \text{ dB}$).

6.2 Kostenabschätzung

Nach den Ausführungen in Ziffer 4.4 verwundert es nicht, dass man bei Kostenbetrachtungen nicht nur die Investitionskosten ins Auge fassen darf, sondern die späteren Betriebskosten mindestens als gleichrangig, wenn nicht gar als vorrangig erachten muss; letzteres deshalb, weil bei den rapiden jährlichen Energiepreissteigerungen die Betriebskosten im Laufe der nächsten 20 bis 30 Jahre die Investitionskosten um ein Vielfaches übersteigen werden. Der Investor und der Architekt, der über "Baukosten" relativ präzise Auskunft geben kann, meinen in Kostengesprächen aber fast immer nur die Investitionskosten; über Betriebskosten kann er meist keine Aussage treffen. Einen Schulträger interessieren aber beide Kostenarten, weil er bei einer Sanierung nicht nur den Investi-

tionsbedarf sicherstellen, sondern als Träger der Einrichtung auch die Betriebskosten jahrzehntelang aufbringen muss.

Über die Unterhaltskosten des Gymnasium Miesbachs in den letzten 15 Jahren existiert eine Aufstellung, die in Bild 33 dargestellt ist. Man erkennt Jahre mit relativ hohen und Jahre mit niedrigen Aufwendungen. Die Werte liegen zwischen 11 T€/a und ca. 80 T€/a. Im Mittel wurden 34 T€/a ausgegeben. Bezogen auf die Bruttogeschoßfläche entspricht das einem Wert von 3,3 €/ (m²BGF a). [Lennerts et al. 2006] untersuchten die Unterhaltskosten von 14 Schulimmobilien und erhielten Werte für Unterhaltskosten zwischen 5 und 35 €/ (m²BGF a). Ab dem Alter von 30 Jahren nehmen die Unterhaltskosten überdurchschnittlich zu. Der Lebensalterdurchschnittswert für den Unterhalt weist eine enorme Schwankungsbreite auf. Die Unterhaltskosten der verschiedenen Schulen unterscheiden sich teilweise um den Faktor 7,5. Im Vergleich dazu stellt sich der Mittelwert von 3,3 €/ (m²BGF a) für das Gymnasium Miesbach recht gering dar.

Die Investitionskosten für bautechnische Maßnahmen wurden für die drei Sanierungsmodelle bauabschnittsweise bereits in Tabelle 13 genannt, wobei detailliert auch die durch die jeweilige Maßnahme erreichbare Primärenergieeinsparung, die Kostenreduktionen aufgrund der eingesparten Primärenergie und das Mehrkosten-Nutzenverhältnis mit angegeben sind.

Tabelle 14 veranschaulicht die flächenspezifischen Investitionskosten für die bei den drei Sanierungsmodellen nötigen technischen Anlagen. Tabelle 15 gibt einen Überblick über die Primärenergie- und Betriebskosteneinsparungen sowie über den Investitionsaufwand der anlagentechnischen Teile bei den drei Sanierungsmodellen. Wenn der Energiepreis bekannt ist, kann daraus durch die Quotientenbildung auch das jeweilige Mehrkosten-Nutzenverhältnis ermittelt werden (rechte Spalte in Tabelle 15). Die hierbei zugrunde gelegten aktuellen Energiepreise zeigt Tabelle 16 auf. Diese aktuellen Preise sind "Ausgangspreise", auf die später dann die jährliche Energiepreissteigerung aufgeschlagen werden muss.

6.3 Sanierungsmodelle

Die konkreten Maßnahmen, welche bei den drei Sanierungsmodellen getätigt werden sollen, sind in Tabelle 17 und Tabelle 18 präzisiert worden. Tabelle 17 schildert die bautechnischen, Tabelle 18 die anlagentechnischen Maßnahmen. Man erkennt aus beiden Tabellen für die Sanierungsmodelle 1 (gering), 2 (mittel) und 3 (hoch), wie sich die Maßnahmen von 1 nach 2 und dann nach 3 steigern. Um 3 zu erreichen, muss natürlich mehr getan werden als bei 1. Dies hat Kostenfolgen, welche in Bild 34 und Bild 35 aus verschiedenen Perspektiven beleuchtet werden. Bild 34 zeigt die bei den drei Sanierungsmodellen anfallenden Investitionskosten, jeweils aufgeschlüsselt nach Investitionen für Energiesparmaßnahmen, Raumklimaverbesserung und für Sicherheit. Bild 35 gibt die Gesamtinvestitionen für die drei Fälle wieder, wobei die jeweils erzielte Energiekostenminderung gegenüber gestellt ist. Die Summe der Kosten für die drei Modelle unterscheidet sich drastisch. Beim Modell 1 (ca. 1.5 Mio. €) unterbleibt eine raumklimatische Sanierung im Gegensatz zu Modell 2 (ca. 3.5 Mio. €) und 3 (ca. 5 Mio. €) fast gänzlich. Auch werden beim Modell 1 keine Sicherheits-

maßnahmen getroffen. Das Modell 3 enthält Baumaßnahmen für die optimalen raumklimatischen Bedingungen. Modell 2 und 3 enthält ferner die dringend notwendigen Maßnahmen zur Verbesserung der Raumakustik (ca. 0,9 Mio. €). Die hohen Kosten der Maßnahmen für Energieeinsparungen im Modell 3 resultieren zum Großteil aus der stärkeren Außenwanddämmung und den dreifachverglasten Fenstern die zur Erzielung einer größtmöglichen Energieeinsparung notwendig sind.

Tabelle 19 und Tabelle 20 illustrieren für die drei Sanierungsmodelle jeweils die Primärenergiebedarfswerte, die Betriebskosteneinsparungen und das Mehrkosten-Nutzenverhältnis. Der Jahresprimärenergiebedarf für Modell 1 beträgt 58,9 kWh/m²a und unterschreitet EnEV – Anforderung für Neubauten um ca. 60 %. Beim Modell 2 liegt die Energieeinsparung in ähnlicher Größenordnung, jedoch wird hier raumklimatischen Belangen mehr Rechnung getragen. Beim Modell 3 ergibt sich ein Jahresprimärenergiebedarf von 34,9 kWh/m²a und damit eine Unterschreitung der EnEV – Anforderung für Neubauten von ca. 80 %. Der Primärenergiebedarf unterschreitet bei allen 3 Varianten deutlich die EnEV-Anforderungswerte. Der spezifische Transmissionswärmeverlust wird nur bei der Variante 3 unterschritten. Die Anforderungen nach EnEV werden jedoch bei allen Varianten eingehalten, da die verbesserten Einzelbauteile jeweils die zulässigen U-Werte nach EnEV unterschreiten. Um auf die Fördermittel der KfW zugreifen zu können, muss auf jeden Fall eine ganzheitliche Sanierung inkl. der Dachflächen entsprechend Modell 3 durchgeführt werden. Ansonsten kann die Voraussetzung für die Förderung, ein spezifischer Transmissionswärmeverlust kleiner als der Anforderungswertes gemäß EnEV2007, für den Neubau (0,66 W/m²K), nicht erfüllt werden.

Aufgrund dieser Datenlage ist dem Schulträger zu empfehlen, das Sanierungsmodell 3 anzustreben; es sei denn, dass sich für Modell 3 bei dynamischer Kalkulation sehr hohe Amortisationszeiten von 30 und mehr Jahren ergeben würden. Deshalb wurden die Amortisationszeiten für die drei Modelle in Abhängigkeit von der jährlichen Energiepreissteigerung und vom aktuellen Energie (-Misch) preis nach dem in Bild 22 erläuterten dynamischen Kalkül ermittelt. Das Ergebnis ist in Bild 36 wiedergegeben. Man ersieht hieraus, dass selbst bei dem hochwertigen Modell 3 - ausgehend von einem aktuellen Energie-Mischpreis von 8 bis 15 ct/kWh und einer anzunehmenden jährlichen Energiepreissteigerungsrate von mindestens 10% (vgl. die in Bild 36 eingezeichneten Punkte) Amortisationszeiten unter 10 bis 15 Jahre zustande kommen. Die 2008 getätigte Sanierung nach Modell 3 würde sich also bereits 2018 bis 2020 eingespült haben. Dieses Ergebnis überrascht; der Grund hierfür liegt schlicht darin, dass sich die rasanten Energiepreissteigerungen zu einer dominanten Einflussgröße entwickelt haben. Natürlich braucht die Sanierung gemäß Modell 3 nicht in einem einzigen "Ruck" vor sich zu gehen; man kann sie vielmehr, wie aus dem in Bild 37 veranschaulichten Masterplan hervorgeht, in einzelne Phasen abwickeln.

7 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse des Projektes „Integrale Weiterentwicklung von Schulgebäuden mit Schwerpunktsetzung auf nutzungsoptimierte Ressourcenschonung –Modellvorhaben am Gymnasium Miesbach/Obb.“ dar. Es wurde ein Sanierungskonzept erarbeitet, wobei ein integraler Ansatz solcher Art gewählt wurde, dass sowohl die bauphysikalischen Fachdisziplinen im Sinne einer optimalen Raumqualität und die vom Projekt betroffenen Nutzer- und Interessengruppen einbezogen sind. Dieser Ansatz entwickelte sich aus intensiven Vorgesprächen, bei denen - neben den unmittelbaren Projektbeteiligten - auch die Lehrer, die Schüler und deren Eltern einbezogen worden waren. Bei den Schülern hat dies zu einer Steigerung des Umweltbewusstseins und zu einem "sechsten Sinn" für das Energiesparen geführt.

Der bauliche Zustand des Gymnasiums und die Rahmenbedingungen für die Untersuchungen sind zunächst gründlich analysiert worden. Darauf basierte dann die Auswahl von Klassenräumen verschiedener Bauart und der Aula in der Weise, dass die ausgewählten Räume als repräsentativ geeignet für die raumklimatischen Untersuchungen befunden wurden. In diesen Räumen sind über eine Sommer- und Winterperiode umfangreiche Messungen der

- Raumlufttemperaturen
- Raumluftfeuchte
- Luftqualität (Kohlendioxid)
- akustischen Verhältnisse
- lichttechnischen Verhältnisse

vorgenommen werden. Die Messungen wurden durch verschiedene bauphysikalische Berechnungen ergänzt, die vor allem den Energiebedarf im Istzustand und demjenigen Energiebedarf einschlossen, der gemäß den derzeitigen und künftigen verschärften Vorschriften gefordert wird. Daran schlossen sich dynamische Wirtschaftlichkeitsberechnungen an, die der zu erwartenden rasanten Energiepreissteigerung Rechnung tragen, und Kostenerhebungen. Die energetischen und raumklimatischen Ergebnisse mündeten schließlich in drei Modelle mit unterschiedlichem Energiesparerfolg, die dem Auftraggeber zur Sanierung vorgeschlagen wurden, und zwar:

Sanierungsmodell 1: geringe Verbesserungen

Sanierungsmodell 2: mittlere Verbesserungen

Sanierungsmodell 3: große Verbesserungen

Ein Vergleich der Investitionskosten und des Einsparpotentials zeigt, dass Modell 3 trotz der hohen Investitionskosten als rentabelste Alternative zu sehen ist, weil sich die Amortisationszeiten aufgrund der dramatisch steigenden Energiepreise stark verkürzen. Deshalb soll nach der Erarbeitung des Sanierungskonzeptes nun deren Umsetzung erfolgen. Der Sachaufwandsträger hat diesbezüglich Mittel beantragt. In enger Abstimmung mit den Anforderungen des

Gymnasiums an einen geordneten Ablauf des Unterrichts, den verfügbaren Haushaltsmitteln des Sachaufwandsträgers und in ihrer Abfolge, orientiert an der Dringlichkeit der Maßnahmen, erfolgt die Gesamtsanierung in 3 zeitlich getrennten Abschnitten. Die bauliche Umsetzung ist in ihrer zeitlichen Abfolge so geplant, dass ein Großteil der Maßnahmen in den Ferienzeiten stattfinden kann und die kostenintensive und mit hohem organisatorischem Aufwand verbundene Auslagerung von Klassen auf ein Minimum beschränkt wird.

Abschnitt 1

Sanierung des „Ostflügels“ entlang der Haidmühlstrasse:

- Energetische Ertüchtigung der Außenwände und Erneuerung der Fenster
- Erneuerung bzw. Umbau der vorhandenen Sonnenschutzanlage
- Erneuerung der Beleuchtung mit tageslichtabhängiger Steuerung
- Einbau einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung zur Ermöglichung einer bedarfsgerechten Lüftung bei hohem Lärmpegel an der Haidmühlstrasse.
- Einbau von Stellmotoren an den Fenstern zur Ermöglichung einer effektiven Nachtlüftung zur Kühlung der Räume

Abschnitt 2

Sanierung des Nordflügels Richtung Krankenhauspark:

- Energetische Ertüchtigung der Außenwände und Erneuerung der Fenster
- Dämmung der obersten Geschoßdecke durch Einbau von Polystyrol-Hartschaumplatten und einem Belag aus Span-Verlegeplatten.
- Erneuerung bzw. Umbau der vorhandenen Sonnenschutzanlage
- Erneuerung der Beleuchtung mit tageslichtabhängiger Steuerung
- Einbau von Stellmotoren an den Fenstern zur Ermöglichung einer effektiven Nachtlüftung zur Kühlung der Räume.
- Installation einer PV-Anlage auf der nach Südwesten orientierten Dachhälfte

Abschnitt 3

Sanierung des Westflügels

- Erneuerung der Beleuchtung mit tageslichtabhängiger Steuerung
- Einbau von Stellmotoren an den Fenstern zur Ermöglichung einer effektiven Nachtlüftung zur Kühlung der Räume

Ergänzend zu den Empfehlungen der Expertengruppe ist geplant, auch die Wünsche und Anregungen der Schulgemeinschaft, die durch unterschiedliche methodische Ansätze in das Projekt eingebunden war, umzusetzen. Soweit nicht schon durch die Sanierungsempfehlungen erfasst, handelt es sich hierbei hauptsächlich um Maßnahmen zur Erneuerung der Raumumschließungsteile, akustische Verbesserungen und Ausstattungsergänzungen in Anbetracht des sich deutlich geänderten Schulalltags.

Bei der Umsetzung und hinterher soll das Objekt wissenschaftlich begleitet werden, um die Wirksamkeit des vorgeschlagenen Konzeptes zur Verbesserung der raumklimatischen Bedingungen zu überprüfen. Ein wichtiger Bestandteil der Phase 2 wird es sein, das Vorgehen im Projekt und die Evaluationsergebnisse zu dokumentieren und die angewandten Methoden didaktisch aufzubereiten. Ferner ist es vorgesehen einen Energieausweis für die Schule nach den dann geltenden Regeln zu erstellen und an einer für jedermann gut sichtbaren Stelle öffentlich auszuhängen. Dadurch kann das Bewusstsein der Öffentlichkeit, der Schüler und Lehrerschaft für das Projekt geschärft und weiteres Interesse an energetischen Fragestellungen geweckt werden. Die Messungen, Methoden und Ergebnisse sollen so dokumentiert werden, dass eine Verwendung im Unterricht an Schulen möglich ist. Um einen möglichst hohen Multiplikatoreffekt zu erzielen, sollen die Ergebnisse des Projektes auf verschiedenen öffentlichkeitswirksamen Ebenen kommuniziert werden.

8 Ableitung einer allgemeinen Vorgehensweisen

Bei der integralen Schulsanierung sollte ein strukturiertes Vorgehen angewandt werden, das in der Regel zu einer rationalen und rationellen Lösung der Problematik führt. Schwieriger gestaltet sich die Situation, wenn beispielsweise private Anbieter (Umweltlabors und Ingenieurbüros) durch Messungen und überzogene Bewertungen einen erheblichen Handlungsbedarf konstatierten und daraus weitreichende und nicht indizierte Folgeuntersuchungen und Sanierungsempfehlungen ableiten.

Als Verfahrensvorschlag kann das Ablaufschema (Bild 38), das die einzelnen Schritte verdeutlicht, verstanden werden. Dabei kommt es darauf an, dass frühzeitig kompetenter Sachverstand hinzugezogen wird und durch Transparenz des Verfahrens die Verantwortlichen (Träger, Baubehörde etc.) und Betroffenen (z.B. Eltern, Nutzer) gleichermaßen einbezogen werden und dass alle die gewählten Schritte und Entscheidungen verstehen und akzeptieren. Dazu zählt auch, die Klagen und Beschwerden ernst zu nehmen, Informationen laufend zur Verfügung zu stellen, die Betroffenen in den Entscheidungsprozess einzubinden und Externe (Messinstitute, Sanierer, Handwerker etc.) zur Qualitätssicherung (z.B. Mindestanforderungen an Messungen) zu verpflichten sowie eine Endkontrolle und Abnahme ggf. mit allen Beteiligten durchzuführen (Erfolgskontrolle).

9 Literatur

Klima, Martin; Reiß, Johann, Erhorn, Hans; Fluch, Margit: Gebäude sanieren – Schulen. BINE Themeninfo (I/06), 2006.

Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV) vom 24.07.2007.

DIN 4108: 1981-08: Wärmeschutz im Hochbau.

DIN V 18599: 2007-02: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen.

DIN EN ISO 7730: 2006-05: 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); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005.

DIN EN 15251: 2007-08: Eingangsparemeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007.

Hellwig, R. T.: Thermische Behaglichkeit – Unterschiede zwischen frei und mechanisch belüfteten Bürogebäuden aus Nutzersicht. Dissertation, TU München, 2005.

Boos, R.; Damberger, B.; Hutter, H.-P.; Kundi, M.; Moshhammer, H.; Tappler, P.; Twrdik, F.; Wallner, P.: Bewertung der Innenraumluft: Physikalische Faktoren, Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter. Aus: Arbeitskreis Innenraumluft am BMLFUW gemeinsam mit der Kommission für Reinhaltung der Luft der Österreichischen Akademie der Wissenschaften: Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft. September 2006.

Wargocki, P.; Wyon, D. P.: Research report on effects of HVAC on student performance. ASHRAE Journal 48 (2006), H.10, S. 22-28.

Schick, A. et. al.: Die Lärmbelastung von Lehrern und Schülern - ein Forschungsstandsbericht. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 46 (1999), H.3, S. 77-87

Airey, A.; MacKenzie, D.: Speech Intelligibility in Classrooms. Proceedings of the Institute of Acoustics 21 (1999), H.5, S. 75-79.

Klatte, M.; Wegner, M.; Hellbrück, J.: Feldstudie zur Akustik in Schulen und ihrer Wirkungen auf Kinder. Teil 2: Ergebnisse aus Leistungstests und Fragebogendaten. Langer, Sabine (Hrsg.): Fortschritte der Akustik - DAGA '06. Berlin : DEGA, 2006, S. 573-574.

DIN 18041: 2004-05: Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen.

Fasold, W; Sonntag, E; Winkler, H: Bau- und Raumakustik, Bauphysikalische Entwurfslehre. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1987.

Bistafa, S. R.; Bradley J. S.: Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech

DIN 4109: 1989-11: Schallschutz im Hochbau, Anforderungen und Nachweise.

VDI 2058: 1985-09: Beurteilung von Arbeitslärm in der Nachbarschaft.

DIN 5035-4: 1983-02: Innenraumbeleuchtung mit künstlichem Licht; Spezielle Empfehlungen für die Beleuchtung von Unterrichtsstätten.

Schierz, Ch.: Wirkung des Lichts auf den Menschen. Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie, Eidgenössische Technische Hochschule

DIN EN 12464-1: 2003-03: Licht und Beleuchtung, Beleuchtung von Arbeitsplätzen, Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen.

Dämmwerk, Version 2007-05: Bauphysikalische Berechnungssoftware für den Wärme-, Feuchte-, Schall- und Brandschutz, Bauteil- und Gebäudeberechnungen (Energieeinsparverordnung EnEV), Energiepass, Wärmebrücken, Energiekosten.

DIN EN 13829: 2001-02: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden, Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden.

DIN EN ISO 3382: 2000-03: Akustik - Messung der Nachhallzeit von Räumen mit Hinweis auf andere akustische Parameter. Deutsche Fassung EN ISO 3382:2000.

DIN EN ISO 140-4: 1998-12: Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen; Teil 4: Messung der Luftschalldämmung zwischen Räumen in Gebäuden (ISO 140-4: 1998); Deutsche Fassung EN ISO 140-4: 1998.

DIN EN ISO 140-7: 1998-12: Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen; Teil 7: Messung der Trittschalldämmung von Decken in Gebäuden (ISO 140-7: 1998); Deutsche Fassung EN ISO 140-7: 1998.

DIN 45641: 1990-06: Mittelung von Schallpegeln.

DIN 18041: 2004-05: Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen.

Werner, H.; Gertis, K.: Zur Wahl von Kalkulationsmethoden bei der Ermittlung der Wirtschaftlichkeit von Energiesparmassnahmen. Baumasch. u. Bautechnik 26 (1979), H. 2, S. 65-72.

Fromme, H.; Dietrich, S.; Kiranoglu, M.; Twardella, D.; Schierl, R.; Nowak, D.; Heitmann, D.; Körner, W.: Frische Luft an bayerischen Schulen. Untersuchungen zur Verbesserung der Luftqualität. Vorläufige Zusammenfassung. Bay-

erisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, September 2006.

Grams, H.; Hehl, O.; Dreesman, J.: Niedersächsisches Schulmessprogramm: Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Raumluftqualität in Klassenräumen sowie Modellierung von Kohlendioxid-Verläufen. Niedersächsisches Landesgesundheitsamt. Projektbericht Dezember 2002 und Ergänzungen November 2004.

Erhorn, H (Hrsg.): IEA ECBCS Annex 36 Energy Concept Adviser: Internetbasiertes Computertool für Entscheidungsträger. 2003.

10 Tabellen

Tabelle 1: Zielvorgaben und Mindestanforderungen an dauernd benutzte Innenräume unterschiedlicher Luftqualität im Hinblick auf CO₂. Bezugswerte sind dabei die Differenz der CO₂-Konzentration der Luft zwischen innen und außen und der maximal gleitende Stundenmittelwert.

Raumluftqualität	CO ₂ -Konzentrationsdifferenz zwischen der Innenluft und der Außenluft	Freibelüftete Innenräume	Mechanisch belüftete Innenräume
Speziell	< 0,04 Vol.-%	Zielbereich: Beurteilungswerte < 0,06 Vol.-%	Zielbereich: Beurteilungswerte < 0,04 Vol.-%
Hoch	0,04 – 0,06 Vol.-%		Mindestvorgabe: Maximal gleitender Stundenmittelwert < 0,06 Vol.-%
Mittel	0,06 - 0,10 Vol.-%	Mindestvorgabe: Maximal gleitender Stundenmittelwert < 0,10 Vol.-%	Mindestvorgabe: Alle Beurteilungswerte < 0,10 Vol.-%
Niedrig	0,10 - 0,15 Vol.-%	Mindestvorgabe: Alle Beurteilungswerte < 0,15 Vol.-%	
Sehr niedrig	> 0,15 Vol.-%		

Tabelle 2: Geschoßflächen und Hüllflächenanteil, wie sie auf einzelne Bauabschnitte entfallen.

Bauabschnitt	Lage	Hüllflächenanteil	Geschoßfläche
1964	Ostflügel, Nordflügel	43 %	ca. 4.550 m ²
1974	Aufstockung Ostflügel	9 %	ca. 750 m ²
1984	Anbau Zeichensaal und Erweiterung um 6 Klassenzimmer	13 %	ca. 650 m ²
1993	Westflügel Aula am Nordflügel	35 %	ca. 2.400 m ²

Tabelle 3: Bauliche Beschreibung des vorgefundenen Ist-Zustandes in den Bauabschnitten 1964 bis 1993 inkl. Angabe des Bauteilaufbaus der angenommenen Stoffwerte und der resultierenden U-Werte.

	Bauteil	Bauteilaufbau von außen nach innen	Dicke [cm]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	U-Wert [W/m²K]
BA 1 (1964)	Dach	Betondachsteine Traglattung Konterlattung Bitumendachbahn DIN 52128 Holzschalung Luftschicht belüftet Mineralfaser 040 Grundlattung Gipskartonplatten	4,0 2,5 2,5 0,2 2,5 10,0 8,0 3,0 1,25	1,50 - - 0,17 0,13 - 0,04 - 0,25	0,48
	Fenster	g = 0,75 τ = 0,78	-	-	2,70
	Fußboden gegen Erdreich	Sauberkeitsschicht Normalbeton 2400 Zement-Estrich Fliesen	25,0 20,0 4,0 1,0	- 2,10 1,40 1,00	3,29
	Außenwand gegen Erdreich	Normalbeton 2400	36,5	2,10	3,29
	Außenwand Typ 1	Putzmörtel aus Kalkzement Mz DIN 105 1200 Putzmörtel aus Kalkgips	2,0 36,5 1,5	1,00 0,50 0,700	1,06
	Außenwand Typ 2	Putzmörtel aus Kalkzement PS 15 SE 040 Normalbeton 2400 Putzmörtel aus Kalkgips	2,5 5,0 36,5 1,5	1,00 0,04 2,10 0,70	0,61
	Außenwand Typ 3	Putzmörtel aus Kalkzement PS 15 SE 040 Normalbeton 2400 Putzmörtel aus Kalkgips PS 15 SE 040	2,5 5,0 36,5 1,5 3,5	1,00 0,04 2,10 0,70 0,04	0,40
	Außenwand Typ 4	Putzmörtel aus Kalkzement Mz DIN 105 1200 Putzmörtel aus Kalkgips	2,0 24,0 1,5	1,00 0,50 0,70	1,45
	Außenwand Typ 5	Putzmörtel aus Kalkzement Mz DIN 105 1200 PS 15 SE 040 Putzmörtel aus Kalkgips	2,5 11,5 2,0 1,5	1,00 0,50 0,04 0,70	1,057

*BA: Bauabschnitt

*g: Gesamtenergiedurchlass

*τ: Lichtdurchlassgrad

Fortsetzung Tabelle 3

	Bauteil	Bauteilaufbau von außen nach innen	Dicke	Wärmeleitfähigkeit	U-Wert
			[cm]	[W/mK]	[W/m²K]
BA 2 (1974)	Dachdecke	Betondachsteine	4,0	1,50	0,42
		Traglattung	2,5	-	
		Grundlattung	2,5	-	
		Bitumendachbahn DIN 52128	0,2	0,17	
		Holzschalung	2,0	0,13	
	Luftschicht belüftet	8,0	-		
	Mineralfaser 040	8,0	0,04		
	Grundlattung	5,0	-		
	Gipskartonplatten	1,5	0,25		
	Fenster	g = 0,75 τ = 0,78	-	-	2,70
	Außenwand Typ 1	Putzmörtel aus Kalkzement	2,0	1,00	1,06
Mz DIN 105 1200		36,5	0,50		
Putzmörtel aus Kalkgips		1,5	0,700		
	Außenwand Typ 2	Putzmörtel aus Kalkzement	2,0	1,00	1,45
Mz DIN 105 1200		24,0	0,50		
Putzmörtel aus Kalkgips		1,5	0,70		

*BA: Bauabschnitt

*g: Gesamtenergiedurchlass

*τ: Lichtdurchlassgrad

Fortsetzung Tabelle 3

	Bauteil	Bauteilaufbau von außen nach innen	Dicke [cm]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	U-Wert [W/m²K]	
BA 3 (1984)	Dachdecke	Betondachsteine Traglattung Konterlattung Holzschalung Luftschicht belüftet Mineralfaser 040 Kunststoff-Vlies 200g Harte Holzfaserverplatte	4,0 2,5 2,5 3,0 14,0 10,0 0,01 2,0	1,50 - - 0,13 - 0,04 - 0,17	0,33	
	Decke nach unten gegen die Außenluft	Holzschalung PS-Extruderschaum 040 Normalbeton 2400 Mineralfaser 040 PE-Folie Zement-Estrich Eiche	2,0 4,0 18,0 4,0 0,02 5,0 2,0	0,13 0,04 2,10 0,04 - 1,40 0,20	0,39	
	Fenster Typ 1	g = 0,75 τ = 0,78	-	-	2,70	
	Fenster Typ 2	g = 0,75 τ = 0,78	-	-	2,90	
	Fußboden gegen Erdreich	Normalbeton 2400 PS-Extruderschaum 040 PE-Folie Zement-Estrich Fliesen	10,0 4,0 0,02 4,0 1,0	2,10 0,04 - 1,40 1,00	0,80	
	Außenwand Typ 1	Wärmedämmputz 070 LHLzB 800 LM21/LM36 Putzmörtel aus Kalkgips	2,5 36,5 1,5	0,07 0,34 0,70	0,62	
	Außenwand Typ 2	Wärmedämmschutz 070 LHLzB 800 LM21/LM36 PS 15 SE 040	2,5 14,5 5,0	0,07 0,34 0,04	0,45	
	Außenwand Typ 3	Wärmedämmschutz 070 PS-Extruderschaum 040 Normalbeton 2400 Putzmörtel aus Kalkgips	2,5 3,0 33,5 1,5	0,07 0,04 2,10 0,70	0,69	
	Außenwand Typ 4	Putzmörtel aus Kalkzement Mauerklinker 2200 Putzmörtel aus Kalkgips	2,5 36,5 1,5	1,00 1,20 0,70	1,92	
	Außenwand Typ 5	PS-Extruderschaum 040 Normalbeton 2400 Putzmörtel aus Kalkgips	2,0 20,0 1,5	0,04 2,10 0,70	1,27	
	Außenwand hinterlüftet Typ 1	Holzschalung Luftschicht belüftet LHLzB 800 LM21/LM36 Putzmörtel aus Kalkgips	2,0 4,5 24,0 1,5	- - 0,34 0,70	1,01	
	Außenwand hinterlüftet Typ 2	Holzschalung Luftschicht belüftet LHLzB 800 LM21/LM36	2,0 4,5 30,0	- - 0,34	0,88	
	Sonstiges Bauteil	Rolladenkasten				1,80

*BA: Bauabschnitt

*g: Gesamtenergiedurchlass

*τ: Lichtdurchlassgrad

Fortsetzung Tabelle 3

	Bauteil	Bauteilaufbau von außen nach innen	Dicke	Wärmeleitfähigkeit	U-Wert
			[cm]	[W/mK]	[W/m²K]
BA 4 (1993)	Außenwand	Gipskartonplatten Mineralfaser 040 Gipskartonplatten	2,5 10,0 2,5	0,25 0,04 0,25	0,35
	Dachdecke Typ 1	Stehfalzbleche Harte Holzfaserplatte Luftschicht belüftet Mineralfaser 040 Bitumendachbahn DIN 52128 Holzschalung 30 mm Luftschicht ruhend Mineralfaser 040 Gipskartonplatten 12,5 mm	5,0 2,5 4,0 12,0 0,20 3,0 2,0 2,0 1,25	- 0,17 - 0,04 0,17 0,13 - 0,04 0,25	0,24
	Dachdecke Typ 2	PS-Extruderschaum 040 Bauder V60 S4 Normalbeton 2400	10,0 0,4 20,0	0,04 0,17 2,10	0,36
	Dachdecke Typ 3	Betondachsteine Traglattung Konterlattung Holzschalung Luftschicht belüftet Mineralfaser 040 Dampfbremse 30m Holzschalung	4,0 2,5 2,5 2,5 4,0 12,0 0,03 3,0	1,50 - - 0,13 - 0,04 - 0,13	0,28
	Dachdecke Typ 4	Terrassenbelag Kiesschüttung trocken Bauder V60 S4 PS-Extruderschaum 040 Bauder V60 S4 Normalbeton 2400 Putzmörtel aus Kalkgips	5,0 6,0 1,0 10,0 1,0 28,0 1,5	- 0,70 0,17 0,04 0,17 2,10 0,70	0,35
	Dachdecke Typ 5	Betondachsteine Traglattung Grundlattung Bitumendachbahn DIN 52128 Holzschalung Luftschicht belüftet Mineralfaser 035 Grundlattung Gipskartonplatten	4,0 2,5 2,5 0,2 2,0 10,0 10,0 3,0 1,5	1,50 - - 0,17 0,13 - 0,035 - 0,25	0,31

*BA: Bauabschnitt

*g: Gesamtenergiedurchlass

*τ: Lichtdurchlassgrad

Tabelle 4: Belegungszeiten in den untersuchten Räumen sowie in der gesamten Schule.

Raum	wichtige Rahmenbedingungen
205 207 208 211 N04	Belegungszeiten Schulbetrieb Mo. - Fr. 8:00 Uhr-14:00 Uhr
Aula	Mehrzwecknutzung. An ca. 200 Tagen im Jahr dient sie zweimal täglich als Pausenhalle. zusätzlich etwa 30 unverstärkte Veranstaltungen (20 Musik, 10 Sprache) und 30 elektroakustisch verstärkte Veranstaltungen
ganze Schule	Schulbetrieb Mo. - Fr. 8:00 Uhr-15:00 Uhr

Tabelle 5: Beschreibung der untersuchten Räume mit Angabe ihrer Abmessungen, ihrer Fassade und der jeweiligen Fenster samt den Stoffwerten.

Raum	Raumabmessung	Fassade (ohne Sonderbauteile)			Fenster			
		Schichtaufbau	Abmessung (b/h in m)	U-Wert W/(m ² K)	Anzahl	Abmessung (b/h in m)	U-Wert W/(m ² K)	g-Wert -
205	b: 7,70 m t: 7,20 m h: 3,20 m	2 cm Außenputz 36,5 cm Ziegel 1,5 cm Innenputz (1964 AW Typ 1)	7,70/3,20	1,1	4	1,5/2,21	2,7	0,75
207	b: 7,20 m t: 7,26 m h: 3,10 m	2,5 cm Wärmedämmputz 36,5 cm Ziegel 1,5 cm Innenputz (1984 AW Typ 1)	7,20/3,10 und 7,26/3,10	0,6	4	1,5/2,21	2,7	0,75
208	b: 7,34 m t: 7,26 m h: 2,50 – 5,14 m	2,5 cm Wärmedämmputz 36,5 cm Ziegel 1,5 cm Innenputz (1984 AW Typ 1)	7,34/2,50- 5,14 und 7,26/2,50	0,6	4	1,5/2,21	2,7	0,75
211	b: 6,65 m t: 7,26 m h: 3,04 m	2,5 cm Außenputz 36,5 cm Ziegel 1,5 cm Innenputz (1974 AW Typ 1)	6,65/3,04	1,1	2	2,81/2,00	2,7	0,75
N04	b: 9,76 m t: 7,26 m h: 3,36 m	2,5 cm Außenputz 36,5 cm Wärmedämmziegel 1,5 cm Innenputz (1993 AW Typ 3)	9,76/3,36	0,6	5	1,51/2,26	1,7	0,63
Aula	b: 27,5 m t: 13,4 m h: 7,0 m	2,5 cm Außenputz 36,5 cm Wärmedämmziegel 1,5 cm Innenputz (1993 AW Typ 3)	27,5/5,3	0,6	1 1	15,6/5,3 (Pfosten- Riegel) 4,4/ca.2,1	2,0 1,7	0,63 0,63

*b: Breite

*t: Tiefe

*h: Höhe

*U-Wert: Wärmedurchgangskoeffizient [W/m²K]

*g-Wert: Gesamtenergiedurchlassgrad

Tabelle 6: Beschreibung des Schichtaufbaus der Innenbauteile (Decken und Wände) der untersuchten Räume mit Angabe ihres Schalldämmmaßes.

Raum	Decken		Wände	
	Schichtaufbau	Schalldämmmaß	Schichtaufbau	Schalldämmmaß
205	k. A.	k. A.	1,5 cm Innenputz, 20 cm Ziegel, 1,5 cm Innenputz; Verbindungstür (Doppeltür)	36 dB
207	UK abgeh. Decke , 23 cm Luftraum, 24 cm Stahlbeton-Decke	k. A.	1,5 cm Innenputz, 24 cm Ziegel, 1,5 cm Innenputz	42 dB
208	Ziegeldacheindeckung, Konterlattung/Lattung, 3 cm Holzschalung-Decke, 14 cm Hinterlüftung, Sparren 10/6, 10 cm Wärmedämmung zwischen den Sparren, Holzakustikdecke + Vlies	k. A.	1,5 cm Innenputz, 24 cm Ziegel, 1,5 cm Innenputz	42 dB (= Wand zu 207)
211	k. A.	k. A.	k. A.	46 dB
N04	1 cm PVC-Fliesen, 5 cm Estrich, 4 cm TSD/WD, 28 cm Stb. Decke, abgehängte GK. Streulochplatten	R'w = 56 dB	1,5 cm Innenputz, 24 cm Ziegel, 1,5 cm Innenputz	44 dB
Aula	Ziegeldacheindeckung, Konterlattung/Lattung, 2,5 cm Holzschalung, 4 cm Hinterlüftung, 12 cm WD, Dampfbremse, 3 cm Holzschalung	k. A.	k. A.	k. A.

*k. A.: keine Angabe möglich, weil nicht Verfügbar

Tabelle 7: Beschreibung der technischen Anlagen in den untersuchten Räumen (Heizung, Lüftung, Beleuchtung und Sonnenschutz).

Raum	Anlagentechnik			
	Heizung	Lüftung	Beleuchtung	Sonnenschutz
205	Heizkörper	Fenster	Leuchtstoffröhren	Markisen
207	Heizkörper	Fenster	Leuchtstoffröhren	ohne
208	Heizkörper	Fenster	Leuchtstoffröhren	ohne
211	Heizkörper	Fenster	Leuchtstoffröhren	ausenliegende Jalousien
N04	Heizkörper	Fenster	Leuchtstoffröhren	Markisen
Aula	Heizkörper/ Heizregister Lüftungsanlage	Mechanische Lüftungsanlage	Leuchtstoffröhren	defekte Screens

Tabelle 8: Pädagogische Aktionen, die während des Projektes zusammen mit der Schule, den Schülern und den Projektteilnehmern durchgeführt wurden.

Aktionen	Zeitpunkt	Beschreibung
Information der Lehrer, des Elternbeirats und der SMV	Juni 2006	In einer Lehrerkonferenz wurde über die geplante Maßnahme unter allen Projektpartnern umfassend informiert. Dabei wurden die Projektidee, sowie die ersten Schritte zur Umsetzung erläutert. Insbesondere wurde mit dem Kollegium besprochen, welche Räume besondere Schwierigkeiten mit dem Raumklima hätten.
Vorträge	Juli 2006	Information der Eltern über das geplante Projekt
Energiefüchse	laufend	Die Energiefüchse – meist zwei oder drei Schüler einer Klasse – sollen darüber wachen, dass die Klasse sich energiebewusst verhält. Sie achten auf richtiges Lüften, richtigen Gebrauch des Deckenlichts, Umgang mit fließendem Wasser und anderes mehr. Die Energiefüchse wechseln sich in einer Klasse ab, so dass möglichst viele Schüler dieses Amt einmal ausführen können.
Logowettbewerb	Okt. 2006	Das Logo wird durch eine Jury - bestehend aus Lehrern der Schule sowie den Projektpartnern - ausgewählt. Über die Auswahl des Logos in einem Wettbewerb besteht die Chance ein gemeinsames Leitmotiv, dass alle an der Konzeption der Sanierung Beteiligten unter einem gemeinsamen Ziel vereinigt, zu finden. ca. 500 Teilnehmer
Ideenwettbewerb	Dez. 2006	Aufsatzwettbewerb zum Thema: „Wie sieht für dich ein optimales Klassenzimmer aus?“
Planspiele	Feb. und März 2007	Im Planspiel sollen Ideen aus dem Aufsatzwettbewerb durch gemischte Teams in ein einfaches Pappmodell umgesetzt werden. Das Modell erlaubt Personen, die nicht in der Fachsprache geübt sind, Ideen für alle verständlich darzustellen.
Studientag	März 2007	Beim zweitägigen Studientag der 11. Klassen stellten alle Schüler in Referaten oder sonstigen Präsentationen eine vertiefte Behandlung des Themas vor. Hier stand ein Eingehen auf die theoretischen Grundlagen ebenso wie ein Darstellen des Unterrichtsklimas im Zentrum des Tages und stellte somit eine gelungene Ergänzung des Planspiels dar. Das FhG-IBP stellt die Ergebnisse der Messungen vor, zeigte Zusammenhänge zwischen Bauphysik und Wohlbefinden und die möglichen Lösungen der Probleme auf
Ausstellung	Juli 2007	Die Modelle werden in einem öffentlichen „Architekturwettbewerb“ präsentiert. Veränderungswünsche, die sich aus der Diskussion an den Modellen ergeben, werden gesammelt und am Modell erprobt.

Tabelle 9: Luftwechselzahlen, die in den Räumen gemessen worden sind.
Die Luftdichtheit der Räume wurde nach dem Blower-Door-Messverfahren in Anlehnung an [DIN EN 13829] bestimmt. Dabei wird entsprechend der Prüfanforderung der Luftwechsel bei 50 Pa Differenzdruck ermittelt.

Raum	Luftwechsel [h ⁻¹]
205	11,0
207	keine Messung durchgeführt
208	3,2
211	keine Messung durchgeführt
N04	2,0
Aula	keine Messung durchgeführt

Tabelle 10: Beleuchtungsstärken und Tageslichtquotienten, die in den einzelnen Räumen gemessen worden sind.

Raum	Beleuchtungsstärke [lx]	Tageslichtquotient [%]	Bemerkung
205	500	3,5	höher als Anforderung von 300 lx für Klassenzimmer geringe Tageslichtversorgung
207	430	3,5	höher als Anforderung von 300 lx für Klassenzimmer geringe Tageslichtversorgung
208	515	6,4	höher als Anforderung von 300 lx für Klassenzimmer hohe Tageslichtversorgung
211	690	5,5	deutlich höher als Anforderung von 300 lx für Klassenzimmer mittlere Tageslichtversorgung
N04	635	4,0	deutlich höher als Anforderung von 300 lx für Klassenzimmer mittlere Tageslichtversorgung
Aula	keine Messung durchgeführt		

Tabelle 11: Jährlicher Energieverbrauch für Raumwärme (Erdgas) und Strom des Gymnasiums Miesbach, nach Angaben von Erdgas Südbayern.

Bezugsfläche: 8.496 m²

Energieträger	2003	2004	2005	2006
Erdgas [kWh/m ²]	96,7	101,4	82,7	121,6
Strom [kWh/m ²]	18,5	19,8	20,5	keine Angabe

Tabelle 12: Anforderungen an den jährlichen Primärenergiebedarf und an den spezifischen Transmissionswärmeverlust des Gymnasiums Miesbach nach der EnEV 2007 im Vergleich zum Status quo ante.

Bezugsfläche: 8.496 m²

Anforderungen	Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	Spezifischer Transmissions- wärmeverlust [W/(m²K)]
Gebäude Ist-Wert	246,7	1,40
EnEV2007-Anforderungswert modernisierter Altbau	213,0	0,92
EnEV2007-Anforderungswert Neubau	152,1	0,66

Tabelle 13: Detaillierung der bautechnischen Maßnahmen für die vorgeschlagenen Sanierungsvarianten in den einzelnen Bauabschnitten mit Angabe der wärmetechnischen Stoffwerte, der Primärenergieeinsparung sowie von Kostengrößen (Investitionskosten, eingesparte Primärenergiekosten, Mehrkostennutzenverhältnis).

Die Kostenangaben beruhen auf Erfahrungswerten des Instituts und auf den Beicht des Architekturbüros.

Bauabschnitt 1964							
Bauteil	Sanierungsvariante	Dämmschichtdicke	U-Wert	Primärenergieeinsparung	Investitionskosten	Primärenergie-reduktionskosten	Mehr-kosten-Nutzen-Verhältnis (MNV)
		m	W/(m²K)	MWh/a	T€	€/kWh/a)	-
Außenwand	Hinterlüftete Vorhangfassade	0,12 0,20 0,40	0,19-0,30 0,14-0,20 0,09-0,12	184 203 221	431 496 755	2,34 2,44 3,42	27,6 28,7 40,2
	WDVS	0,12 0,20 0,40	0,18-0,27 0,13-0,18 0,08-0,09	189 207 225	259 324 540	1,37 1,57 2,40	16,1 18,4 28,2
Oberste Geschoss-Decke	Dämmplatten	0,10	0,21	42	59	1,40	16,5
		0,20	0,13	54	74	1,37	16,1
Fenster	Kunststoff- oder Holzrahmen inklusive Einbau	-	1,7	68	327	4,81	56,6
		-	1,2	124	364	2,94	34,5
		-	0,9	157	473	3,01	35,4
Boden gegen Erdreich	Zusätzlicher Fußbodenaufbau	0,08 EPS	0,38	171	124	0,73	8,5
		0,02 VIP	0,19	182	249	1,37	16,1
Wand gegen Erdreich	Perimeterdämmung	0,10	0,36	60	78	1,30	15,3
		0,20	0,19	64	88	1,38	16,2
Wand gegen Erdreich	Innendämmung	0,06	0,50	57	28	0,49	5,8
		0,10	0,32	61	31	0,51	6,0

Fortsetzung Tabelle 13

Bauabschnitt 1974							
Bauteil	Sanierungs- variante	Dämm- schicht- dicke	U-Wert	Primär- energie- einspa- rung	Investi- tions- kosten	Primär- energie- reduktions- kosten	Mehr- kosten- Nutzen- Verhältnis (MNV)
		m	W/(m²K)	MWh/a	T€	€/(kWh/a)	-
Außenwand	Hinterlüftete Vorhangfassade	0,12	0,28-0,30	32	74	2,31	27,2
		0,20	0,19-0,20	36	86	2,39	28,1
		0,40	0,11-0,12	39	130	3,33	39,2
	WDVS	0,12	0,25-0,27	34	44	1,29	15,2
		0,20	0,17-0,18	37	56	1,51	17,8
		0,40	0,09	40	93	2,33	27,4
Fenster	Kunststoff- oder Holzrahmen inklusive Einbau	-	1,7	11	50	4,55	53,5
		-	1,2	20	56	2,80	32,9
		-	0,9	25	72	2,88	33,9

Bauabschnitt 1984							
Bauteil	Sanierungs- variante	Dämm- schicht- dicke	U-Wert	Primär- energie- einspa- rung	Investi- tions- kosten	Primär- energie- reduktions- kosten	Mehr- kosten- Nutzen- Verhältnis (MNV)
		m	W/(m²K)	MWh/a	T€	€/(kWh/a)	-
Außenwand	Hinterlüftete Vorhangfassade	0,12	0,21-0,31	44	162	3,68	43,3
		0,20	0,15-0,21	48	187	3,90	45,8
		0,40	0,10-0,12	53	284	5,36	63,0
	WDVS	0,12	0,19-0,28	45	98	2,18	25,6
		0,20	0,14-0,18	49	122	2,49	29,3
		0,40	0,08-0,10	54	203	3,76	44,2
Fenster	Kunststoff- oder Holzrahmen inklusive Einbau	-	1,7	49	167	3,41	40,1
		-	1,2	79	186	2,35	27,7
		-	0,9	96	242	2,52	29,7

Fortsetzung Tabelle 13

Bauabschnitt 1993							
Bauteil	Sanierungs- variante	Dämm- schicht- dicke	U-Wert	Primär- energie- einspa- rung	Investi- tions- kosten	Primär- energie- reduktions- kosten	Mehr- kosten- Nutzen- Verhältnis (MNV)
		m	W/(m²K)	MWh/a	T€	€/(kWh/a)	-
Außenwand	Hinterlüftete Vorhangfassade	0,12	0,20-0,28	48	241	5,02	59,1
		0,20	0,15-0,19	55	277	5,04	59,3
		0,40	0,09-0,12	62	421	6,79	79,9
	WDVS	0,12	0,19-0,26	50	144	2,88	33,9
		0,20	0,14-0,17	57	181	3,18	37,4
		0,40	0,08-0,09	63	301	4,78	56,2
Fenster	Kunststoff- oder Holzrahmen in- klusive Einbau	-	1,2	52	302	5,81	68,3
		-	0,9	81	393	4,85	57,1
		-					

Tabelle 14: Flächenspezifische Investitionskosten bei verschiedenen Varianten der Sanierung der technischen Anlagen. Die Kostenangaben sind auf die Nutzfläche (Nettogrundfläche) bezogen und beruhen auf Erfahrungswerten des Instituts.

Sanierungsvariante		Investitionskosten (netto)
		€/m ²
Brennwertkessel	Ersatz des bestehenden Kessels einschließlich Demontage Bestand	8
Holz hackschnitzelheizung	Ersatz des bestehenden Kessels einschließlich Demontage Bestand	18
Fernwärme Biomasse-HKW Oberland/Miesbach	Ersatz des bestehenden Kessels einschließlich Demontage Bestand	2
Beleuchtung Klassenzimmer	a) tageslichtabhängig gedimmt	90
	b) tageslichtabhängig geschaltet	70
Zentrale Lüftungsanlage Klassenzimmer	a) Wärmerückgewinnungsgrad 60 %	200
	b) Wärmerückgewinnungsgrad 80 %	230
Dezentrale Lüftungsanlage Klassenzimmer	a) Wärmerückgewinnungsgrad 60 %	200
	b) Wärmerückgewinnungsgrad 80 %	230
Photovoltaik-Anlage	Südwestdach 400 m ² Kollektorfläche	525

Tabelle 15: Primärenergieeinsparung, Betriebskosteneinsparung und Investitionskosten der untersuchten anlagentechnischen Sanierungsvarianten.

Aus dem Verhältnis von Investitionskosten zu Primärenergieeinsparung können die primärenergetisch günstigsten Maßnahmen abgelesen werden.

Sanierungsvariante	Primär- energie- einsparung	Betriebs- kosten- einsparung	Investi- tionskosten	Primär- energie- reduktions- kosten	Mehr- kosten- Nutzen- Verhältnis (MNV)	
	MWh/a	€/a	T€	€/(kWh/a)	-	
Brennwertkessel	212	11.836	68	0,32	5,7	
Holzackschnitzelheizung	1248	53.944	153	0,12	2,8	
Fernwärme Biomasse-HKW Oberland/Miesbach	1427	10.931	17	0,01	1,6	
Beleuchtung Klassenzimmer	a)	17	1.190	327	19,24	274,8
	b)	21	1.499	255	12,14	170,1
Zentrale Lüftungsanlage Klassen- zimmer, Versorgung Heizregister über bestehende Kessel, Zuluft- temperatur 22 °C	a)	273	16.318	728	2,67	44,6
	b)	321	18.960	837	2,61	44,1
Dezentrale Lüftungsanlage Klas- senzimmer, Versorgung Heizregis- ter über bestehende Kessel, Zuluft- temperatur 22 °C	a)	217	12.631	728	3,35	57,6
	b)	249	14.191	837	3,36	59,0
Photovoltaik-Anlage	103*	17.434	210	2,04	12,0	

Tabelle 16: Aktuelle Energiepreise für die jeweiligen energieträger, die bei der Berechnung der Betriebskosteneinsparung zugrunde gelegt wurden.

Energieträger	Energiepreis [ct/kWh]
Nettokosten Erdgas	5,5
Nettokosten Strom	18,0
Nettokosten Hackschnitzel	2,0
Nettokosten Fernwärme	6,0
Mindest-Einspeisevergütung	45,7

Tabelle 17: Zusammenstellung der baulichen Maßnahmen bei den drei Modell-Sanierungsfällen.

Bauteil	Bautechnische Maßnahmen	Modell 1			Modell 2			Modell 3		
		U-Wert (Dämmschichtdicke)	Investitionskosten (netto)	Bauabschnitt	U-Wert (Dämmschichtdicke)	Investitionskosten (netto)	U-Wert (Dämmschichtdicke)	Dämmschichtdicke	Investitionskosten (netto)	Bauabschnitt
		W/(m²K) m	T€		W/(m²K) m	T€	W/(m²K) m	m	T€	
Außenwand	Wärmedämmverbundsystem	0,19-0,30* (0,12)	401	1964 1974 1984	0,13-0,18* (0,20)	502	1964 1974 1984	0,08-0,09* (0,40)	1137	1964 1974 1984 1993
Oberste Geschoss Decke	Dämmplatten	0,13 (0,20)	74	1964	0,13 (0,20)	74	1964	0,13 (0,20)	74	1964
Fenster	Kunststoff- oder Holzrahmen inklusive Einbau	1,2	606	1964 1974 1984	1,2	606	1964 1974 1984	0,9	1180	1964 1974 1984 1993
Boden gegen Erdreich	Zusätzlicher Fußbodenaufbau							0,38 (0,08)	269	1964 1984 1993
Wand gegen Erdreich	Innendämmung							0,50 (0,06)	50	1964 1993
Dach	Zwischensparrendämmung							0,19-0,22* (0,20)	90	1974 1984 1993
Gründach/ Dachterrasse	Umkehrdachdämmung							0,19-0,26* (0,18)	38	1993
Decke nach unten gegen Außenluft	Wärmedämmverbundsystem							0,09 (0,40)	41	1984

*unterschiedliche U-Werte aufgrund unterschiedlicher Bestandsaufbauten

Tabelle 18: Zusammenstellung der anlagentechnischen Maßnahmen der drei Modell-Sanierungsvarianten.

Maßnahmen	Modell 1		Modell 2		Modell 3	
	Maßnahme und Investitionskosten (netto)	T€	Maßnahme und Investitionskosten (netto)	T€	Maßnahme und Investitionskosten (netto)	T€
Fernwärme Biomasse-HKW Oberland/Miesbach	Fernwärmeanschluss und Demontage des bestehenden Kessels	17	Fernwärmeanschluss und Demontage des bestehenden Kessels	17	Fernwärmeanschluss und Demontage des bestehenden Kessels	17
Heizung					Austausch Heizkörper	255
Sonnenschutz	Sonnenschutz mit Tageslichtlenkung (bisherige Bereiche ohne Markise), Leitungen für Handsteuerung (Kosten nur für Räume mit Sonnenschutz, nicht für gesamtes Objekt)	163	Sonnenschutz mit Tageslichtlenkung (bisherige Bereiche ohne Markise), zentrale Steuerung Sonnenschutz (Kosten nur für Räume mit Sonnenschutz, nicht für gesamtes Objekt)	209	Sonnenschutz mit Tageslichtlenkung (bisherige Bereiche ohne Markise), Austausch Markisenstoff, zentrale Steuerung Sonnenschutz Datenpunkte zur Sonnenschutzsteuerung (Kosten nur für Räume mit Sonnenschutz, nicht für gesamtes Objekt)	248
Beleuchtung Klassenzimmer (ANGF = 3638 m ²)			Austausch der Leuchten (Vorschaltgeräte EVG); tageslichtabhängig geschaltet, Für Tageslichtsteuerung müssen noch neue Leitungen gezogen werden.	255	Austausch der Leuchten (Vorschaltgeräte EVG); tageslichtabhängig gedimmt, zentrale Steuerung Beleuchtung Für Tageslichtsteuerung müssen noch neue Leitungen gezogen werden.	327
Zentrale Lüftungsanlage Klassenzimmer, Versorgung Heizregister über Fernwärme, Klassenzimmer Straßenseite Ostflügel			Wärmerückgewinnungsgrad 60 %	146	Wärmerückgewinnungsgrad 80 %	167
Lüftung über Fensterflügel Klassenzimmer			Stellmotore an den Fensterflügeln zur bedarfsgerechten Lüftung bzw. Nachtlüftung Datenpunkte zur Fensterlüftung (Kosten pro m ² nur für Räume mit Fensterlüftung, nicht für gesamtes Objekt)	348	Stellmotore an den Fensterflügeln zur bedarfsgerechten Lüftung bzw. Nachtlüftung Datenpunkte zur Fensterlüftung (Kosten pro m ² nur für Räume mit Fensterlüftung, nicht für gesamtes Objekt)	34
Photovoltaik-Anlage			Südwestdach 100 m ² Kollektoren	53	Südwestdach 400 m ² Kollektoren	210

Tabelle 19: Vergleich des ermittelten Primärenergiebedarfs und spezifischen Transmissionswärmeverlustes bei den drei Sanierungsmodellfällen.

Die Werte wurden nach DIN V 18599 ermittelt.

Sanierungsmodell	Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	Spezifischer Transmissions- wärmeverlust [W/(m²K)]
Sanierungsmodell 1	58,9	1,05
EnEV2007- Anforderungswert modernisierter Altbau	215,6	0,92
EnEV2007-Anforderungswert Neubau	154,0	0,66
Sanierungsmodell 2	57,8	1,04
EnEV2007-Anforderungswert modernisierter Altbau	225,8	0,92
EnEV2007-Anforderungswert Neubau	161,3	0,66
Sanierungsmodell 3	34,9	0,42
EnEV2007-Anforderungswert modernisierter Altbau	230,6	0,92
EnEV2007-Anforderungswert Neubau	164,7	0,66

Tabelle 20: Vergleich der Primärenergieeinsparung, Betriebskosteneinsparung und Primärenergie-reduktionskosten bei den drei vorgestellten Sanierungsmodellflächen.

Sanierungsmodell	Primär- energie- einsparung [kWh/a]	Betriebs- kosten- einsparung [€/a]	Primär- energie- reduktions- kosten [€/(kWh/a)]	Mehrkosten- Nutzen- Verhältnis (MNV) [-]
Sanierungsmodell 1	1.595.549	37.603	0,9	34,6
Sanierungsmodell 2	1.604.894	39.295	1,1	45,8
Sanierungsmodell 3	1.799.452	77.188	2,5	57,0

11 Bilder

Unterricht „gestern – heute“ frontal → differenzierter Unterricht



Das Klassenzimmer nach dem Krieg (<http://www.asg-erlangen.de>)
1945



Das Klassenzimmer Anfang der 70er Jahre
(<http://www.asg-erlangen.de>)
1970



Das Klassenzimmer heute
(www.beamer-discounter.de)
2000

Bild 1: Photos von Klassenräumen der letzten 60 Jahre.
Oben: Innenansicht 1945
Mitte: Innenansicht 1970
Unten: Innenansicht 200

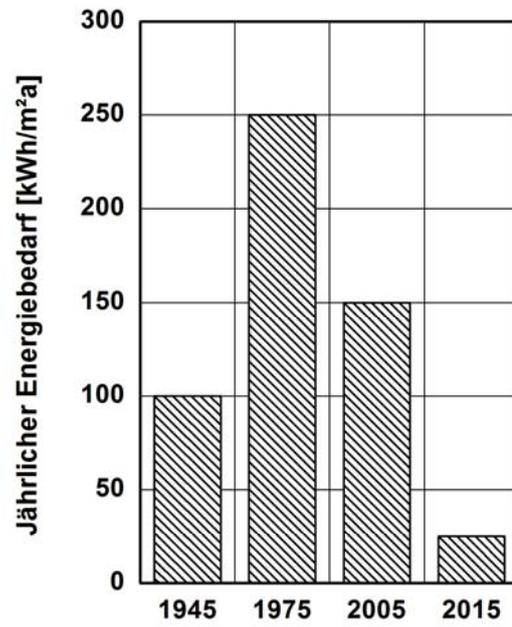
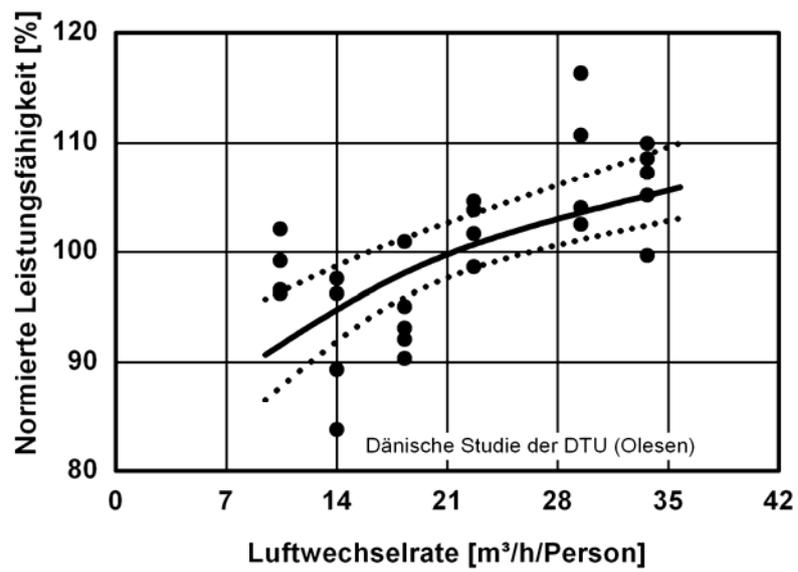


Bild 2: Größenordnung des Energiebedarfs von Klassenräumen im Verlaufe der Jahre.



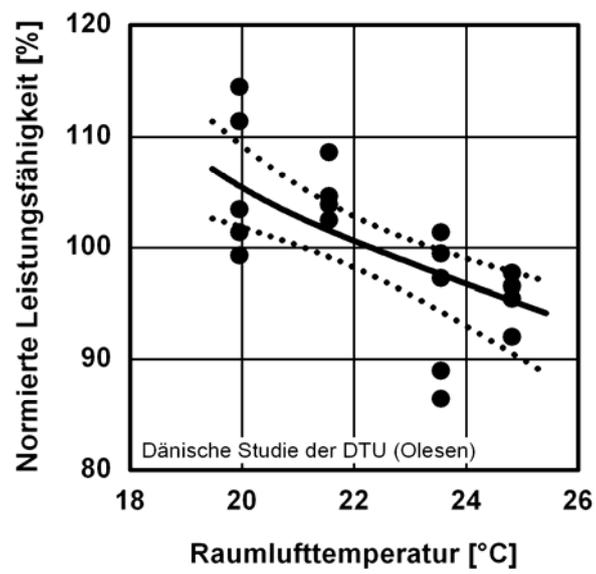


Bild 4: Einfluss der Raumlufttemperatur auf die normierte Leistungsfähigkeit von Schülern bei Leistungstests [Wargocki et al. 2006].

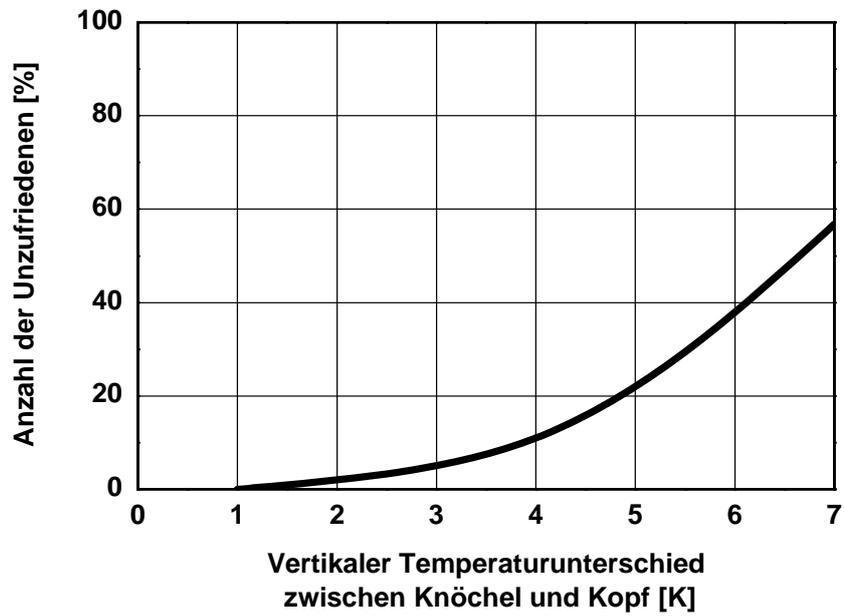


Bild 5: Anzahl der Unzufriedenen in einem Raum in Abhängigkeit des vertikalen Lufttemperaturunterschiedes zwischen unten (Bereich Fußknöchel) und oben (Kopfbereich) nach DIN EN ISO 7730.

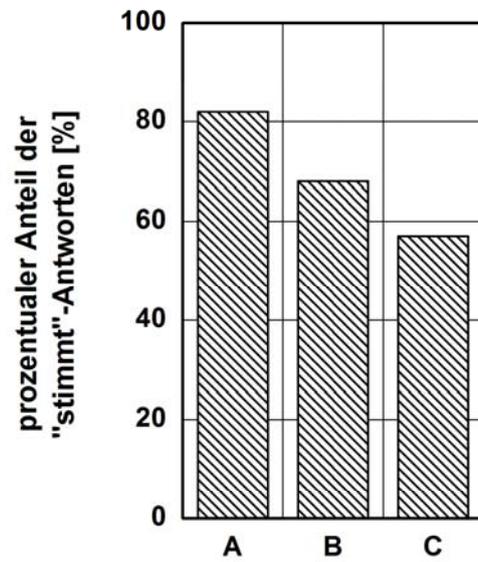


Bild 6: Prozentualer Anteil der richtigen Antwort ("stimmt") bei Schülertests in Klassenräumen mit unterschiedlichen Nachhallzeiten [Klatte et al. 2006].
A: < 0,65s
B: 0,65 bis 0,95 s
C: >0,95 s

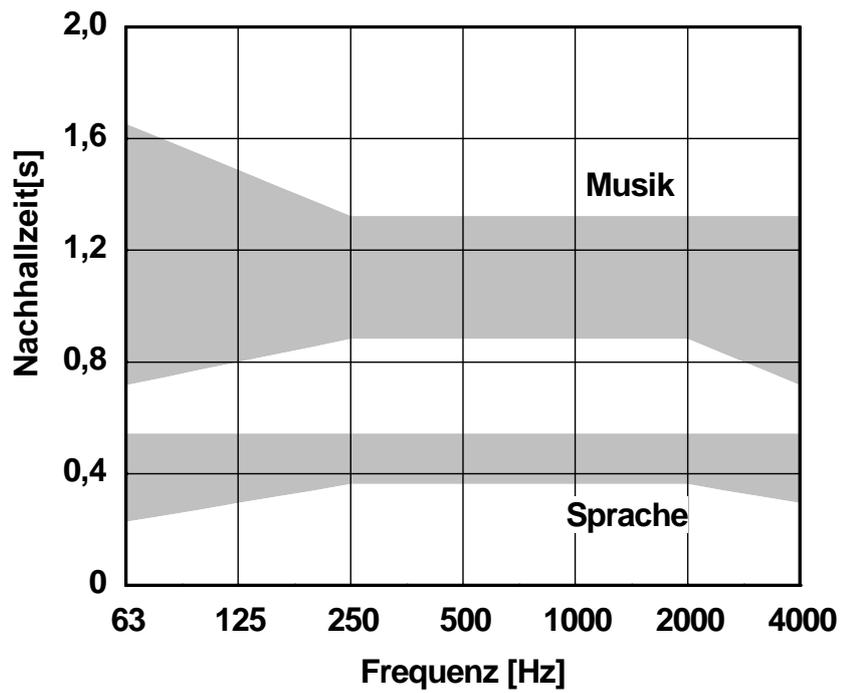


Bild 7: Empfohlene Nachhallzeiten in Räumen für Sprache und Musik in Abhängigkeit von der Frequenz.

Die Bereiche entsprechen den Angaben in DIN 18041.

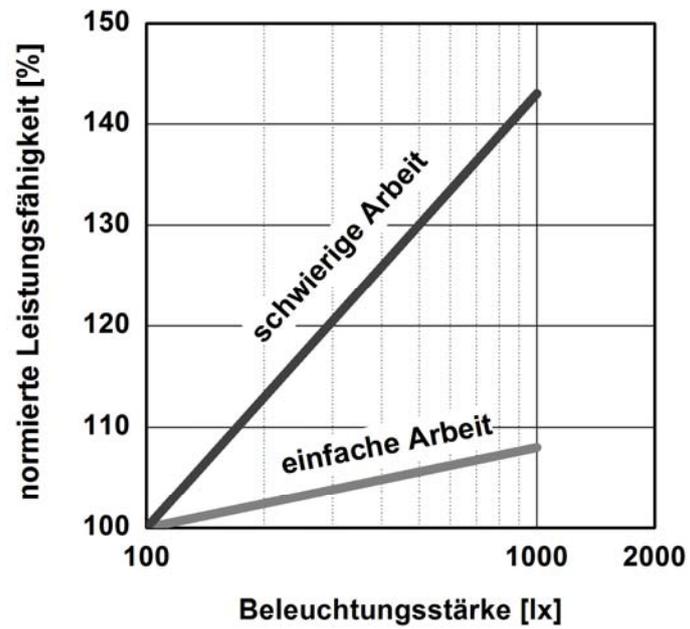


Bild 8: Abhängigkeit der normierten Leistungsfähigkeit von der Beleuchtungsstärke in einem Raum bei einfachen und schwierigen Sehaufgaben [Schierz 2004].

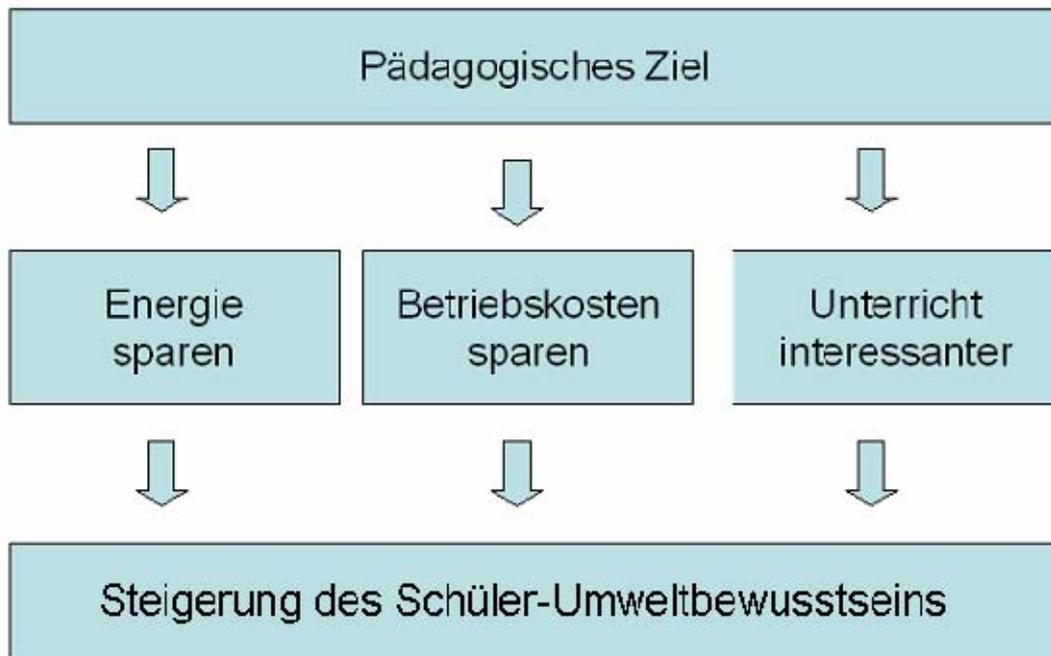


Bild 9: Schematische Darstellung der pädagogischen Wirkzusammenhänge bei der Steigerung des Schüler-Umwelt-Bewusstseins.



Bild 10 Luftbild des Gymnasiums Miesbachs zur Veranschaulichung der Lage des Baukörpers und der Fassadenorientierung. Der Baukörper des Schulgebäudes ist um 30° gegenüber der Nordrichtung gedreht, so dass bei den Bauteilen die Orientierung Nordwest, Nordost, Südwest und Südost zu unterscheiden sind.



Bild 11: Lage der untersuchten Räume im Gebäudekomplex des Gymnasium Miesbachs. (Markierung an Hand des Lageplan) Räume: 205, 207, 208, 211, N04, Aula.

Raum	Baujahr	Orientierung	Außenansicht	Innenansicht
205	1964	Süd-West		
207	1984	Nord-West		
208	1984	Nord-West		
211	1974	Süd-Ost		
N04	1993	Süd-Ost		
Aula	1993	Süd-West		

Bild 12: Fotografische Aufnahmen der Außen- und Innenansichten der untersuchten Räume mit Angabe ihrer Orientierung und des Jahres ihrer Errichtung (Baujahr).



Bild 13: Fotografische Ansicht der Wetterstation des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Holzkirchen. Aufgrund der örtlichen Nähe zum Gymnasium Miesbach sind diese meteorologischen Daten für die Auswertung herangezogen worden.



Bild 14: Fotografische Ansicht der Messvorrichtung zur Bestimmung der Raumklimakenngößen in den Klassenräumen. Um die Raumklimaparameter (Temperatur, Feuchte, Strömungsgeschwindigkeit) in verschiedenen Höhen bestimmen zu können, sind die Messsonden entlang eines vertikalen Mastes verschoben worden.



Bild 15: Fotografische Ansicht des CO²-Sensors, der zur Messung des Kohlendioxidgehaltes der Raumluft in den Schulräumen verwendet wurde. Der Sensor ist an den gleichen Mast befestigt worden, an dem die übrigen Raumklimakennwerte befestigt wurden (vgl. Bild 14).



Bild 16: Fotografische Ansicht der Wärmebildkamera, mit welcher die thermographischen Photos gemacht wurden.



Bild 17: Fotografische Aufnahme der sog. Blower-Door-Messanlage, die zur Luftwechselformung in den untersuchten Räumen verwendet wurde.



Bild 18: Fotografische Ansicht des Beleuchtungsstärkemessgerätes. Das Gerät besitzt einen Sensor (rechts oben), der in die erforderliche Position, meist horizontal in Tischhöhe, gebracht wird.

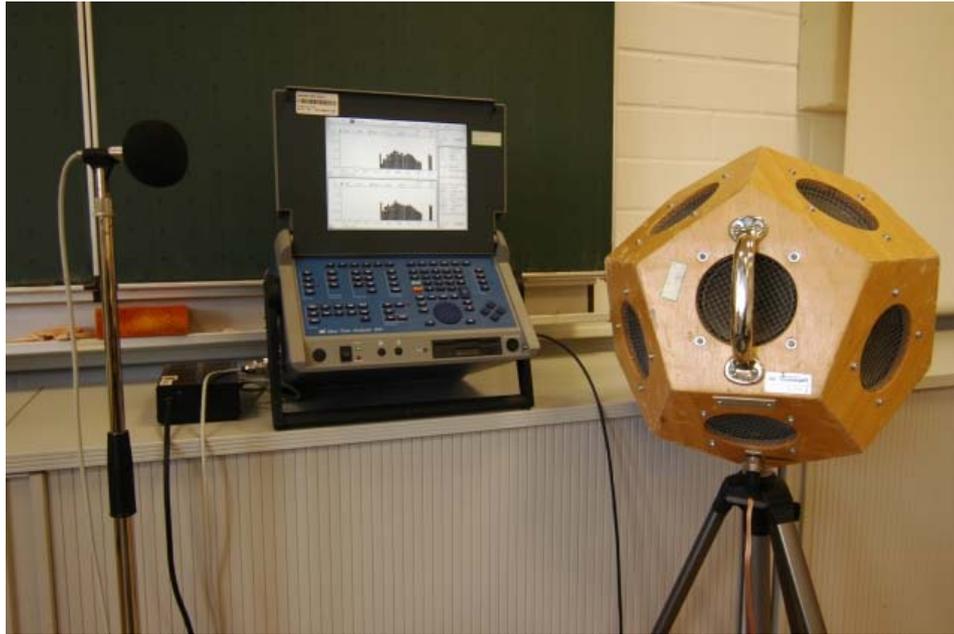


Bild 19: Messvorrichtung zur Ermittlung der Nachhallzeit in den Schulzimmern.-

Die Nachhallzeit wird bestimmt, indem man mittels eines Lautsprechers ein breitbandiges Rauschen aufgibt und dies plötzlich ausschaltet. Die Schalldruckpegelabnahme während des Ausklings wird gemessen.

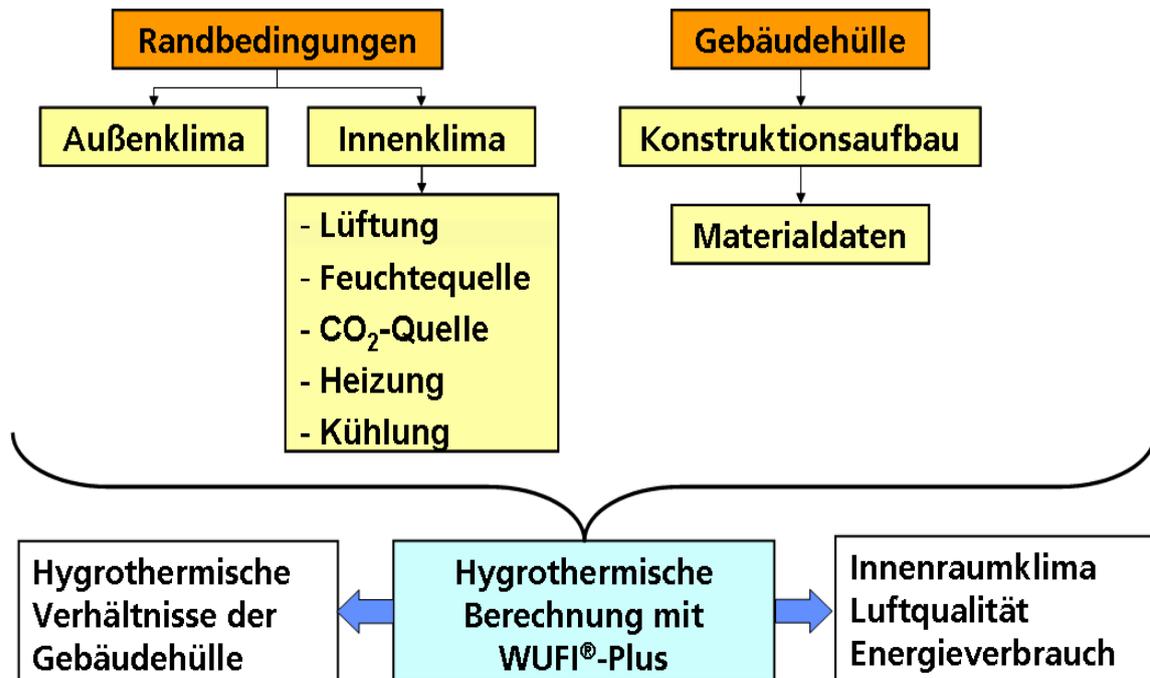


Bild 20: Ablaufschema, wie Berechnungen mit dem Rechenprogramm WUFI-Plus vorgenommen werden.

Man legt (li. im Bild) die Randbedingungen fest und gibt die Materialdaten (re.) vor. WUFI-Plus berechnet daraus die thermohygrischen Raumklimagrößen und den Heizenergiebedarf. Ein großer Vorteil besteht darin, dass auf diese Weise rechnerisch relativ schnell die Auswirkungen verschiedener Varianten ermittelt werden können.

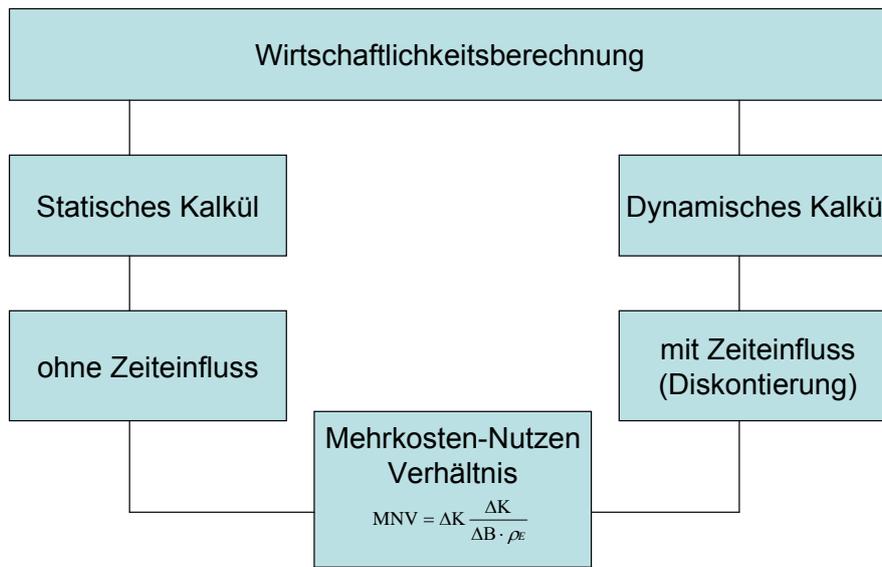


Bild 21: Grundsatzschema zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit von Investitionsmaßnahmen zur Energieeinsparung.

Wirtschaftlichkeitsberechnungen können nach Kalkülen erfolgen (re.). Beide Kalküle gehen auf das Mehrkosten-Nutzenverhältnis (MNV) zurück.

Einfache Tilgung (keine Zinsen)

ohne Energiepreissteigerung

Mehrinvestitionskosten:	ΔK
Betriebskosteneinsparung:	$\Delta B \cdot p_E$
Amortisationszeit:	$n = \Delta K / \Delta B \cdot p_E = MNV$

mit Energiepreissteigerung (Rate j)

Mehrinvestitionskosten:	ΔK
Betriebskosteneinsparung:	
1. Jahr:	$\Delta B \cdot p_E$
2. Jahr:	$\Delta B \cdot p_E \cdot (1 + j)$
3. Jahr:	$\Delta B \cdot p_E \cdot (1 + j)^2$
n-tes Jahr:	$\Delta B \cdot p_E \cdot (1 + j)^{n-1}$
Summe:	$\Delta B \cdot p_E \cdot \frac{(1 + j)^n - 1}{j}$

Amortisationszeit n :

$$n = \frac{\ln(MNV - j + 1)}{\ln(1 + j)}$$

Bild 22: Kalkulationsbeispiel für die Ermittlung der Amortisationszeit von Energieeinsparmassnahmen ohne (statisch kalkuliert) und mit Energiepreissteigerungen (dynamische Kalkulation).

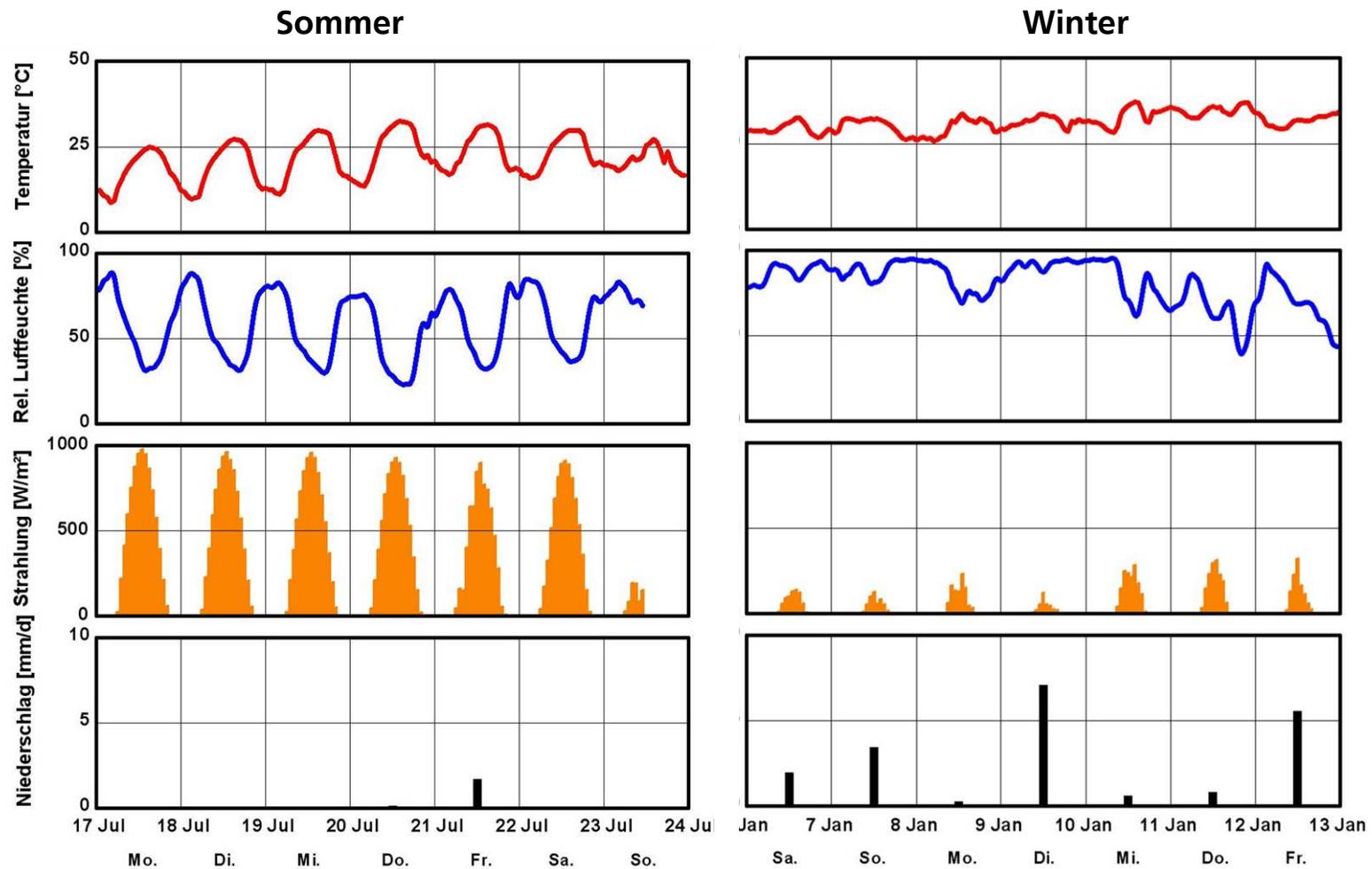


Bild 23: Zeitlich Verläufe der Temperatur und relativen Feuchte der Außenluft, der Globalstrahlungsintensität und des Niederschlags während einer beispielhaften Woche im Sommer und Winter, gemessen im Fraunhofer-Institut Holzkirchen (Luftlinie ca. 11 km von Miesbach entfernt).

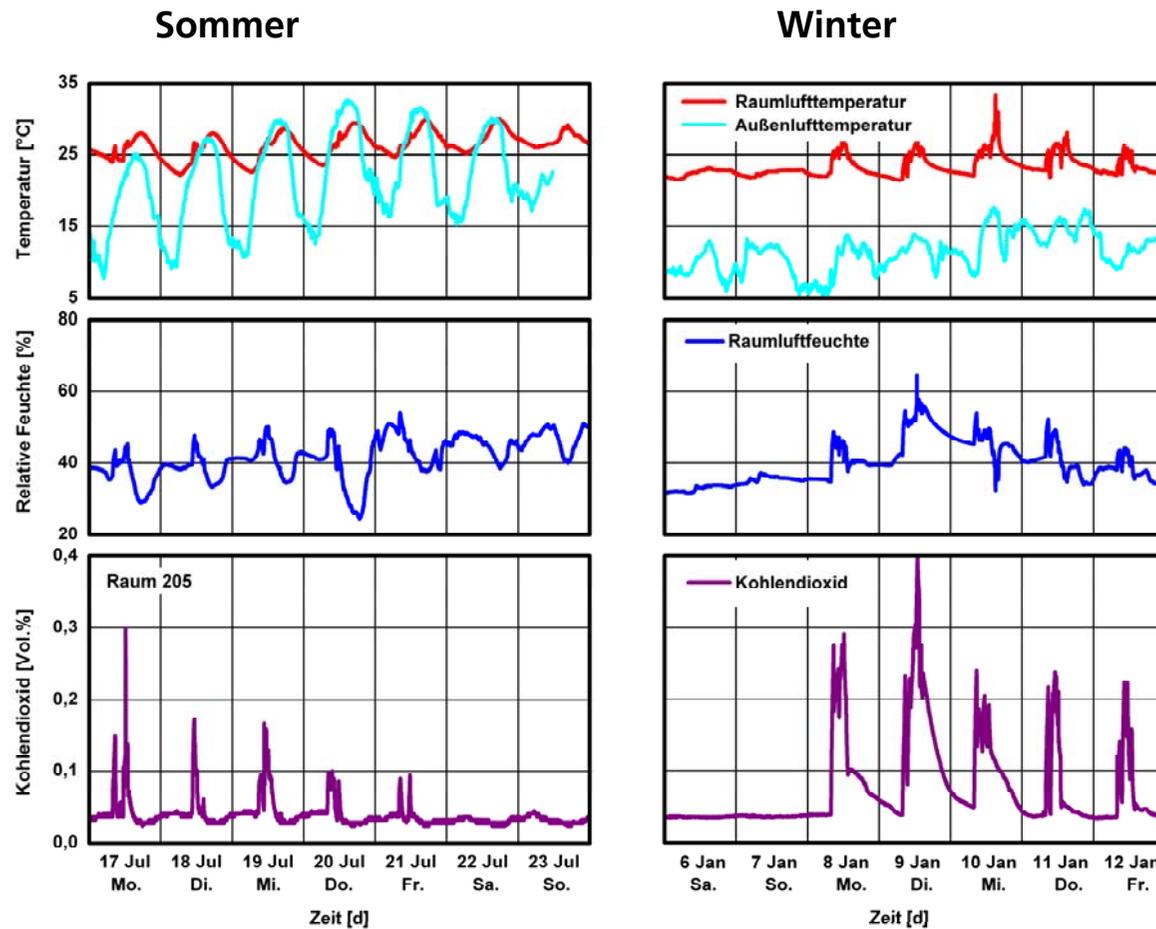


Bild 24: Zeitliche Verläufe der Lufttemperatur, relativen Feuchte und CO²-Konzentration in einem exemplarischen Klassenraum) während der jeweils einwöchigen Sommer- und Wintermessperiode. In den oberen Diagrammen ist zu Vergleichszwecken die Außenlufttemperatur mit eingezeichnet. Klassenzimmer: 205

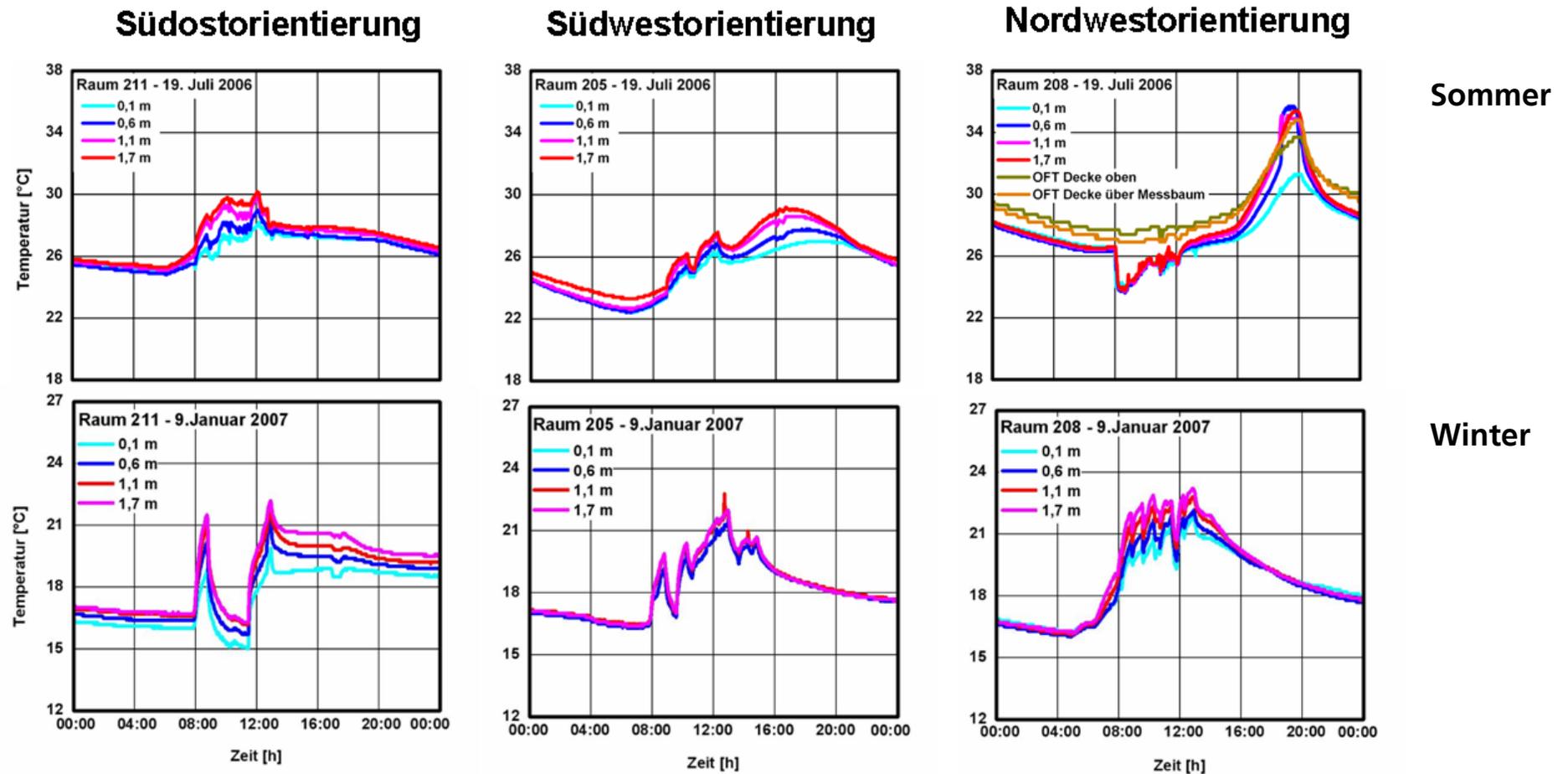


Bild 25: Gegenüberstellung der tageszeitlichen Verläufe der Raumlufttemperatur in verschiedenen Raumhöhen während eines typischen Sommer-(oben) und Wintertages (unten) in Klassenräumen verschiedener Orientierung.
 Raum 221: Südost
 Raum 205: Südwest
 Raum 208: Nordwest

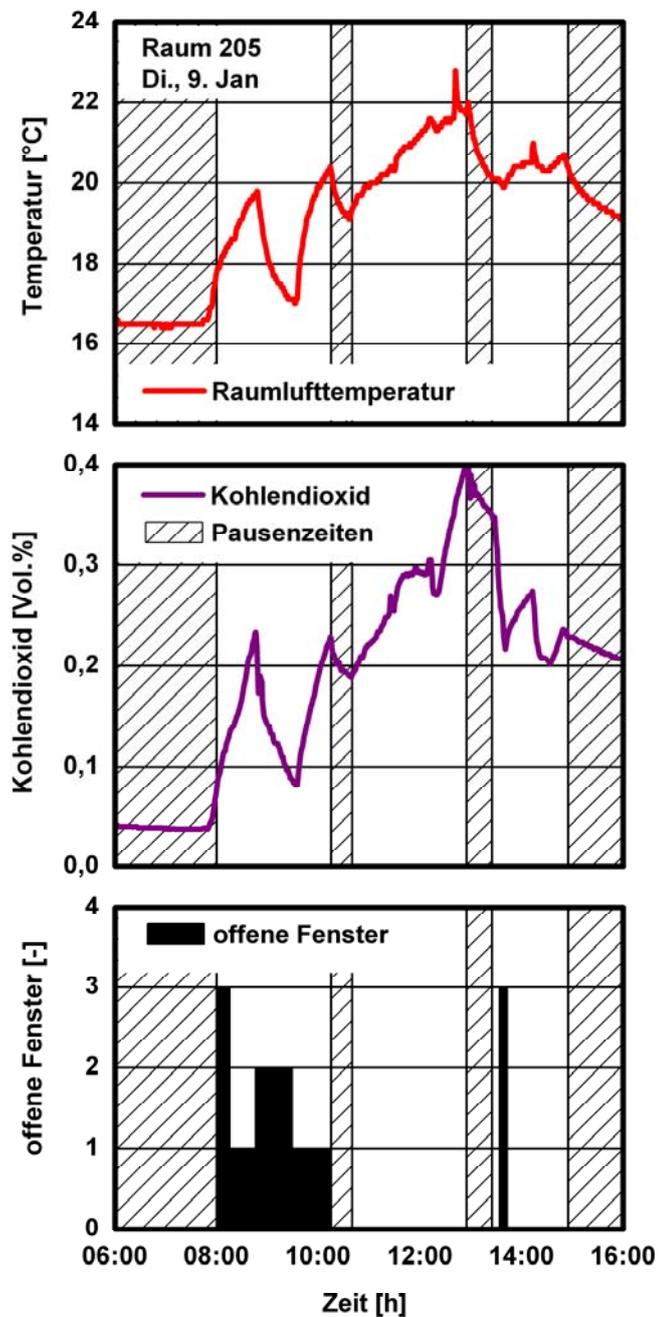


Bild 26: Tageszeitliche Verläufe der Raumlufthtemperatur, der CO²-Innenkonzentration und der Fensteröffnungszeiten in einem Klassenraum während eines Wintertages.

Zugrunde gelegte Daten
 Raum 205
 Schraffur: Belegungszeiten des Raumes
 Schwarzer Bereich: Fensteröffnung

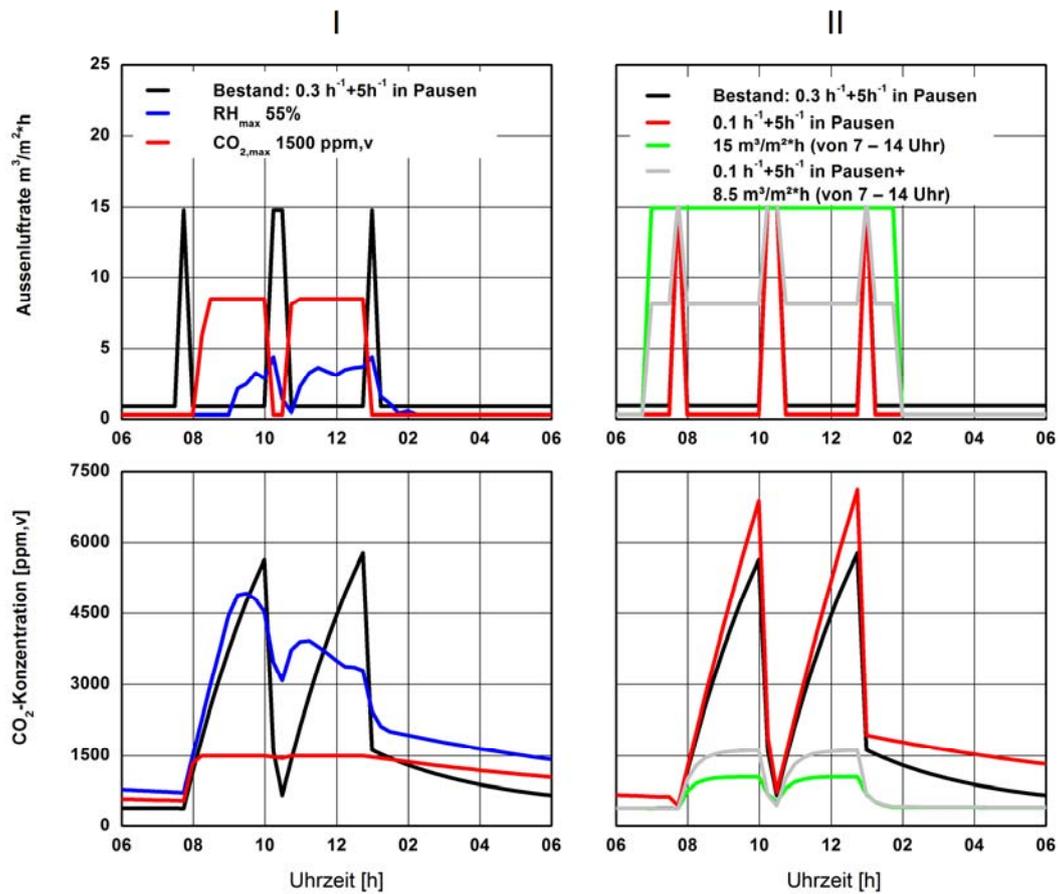


Bild 27: Berechnete tageszeitliche Verläufe der CO₂-Konzentration im Raum mit Angabe der Außenluft rate bei verschiedenen Lüftungsstrategien I und II.

Links (Strategie I)

- Bestand: 0,3 h⁻¹ Grundlüftung; 5,0 h⁻¹ Pausenlüftung
- Lüftung so, dass die relative Luftfeuchte 55% nicht übersteigt.
- Lüftung so, dass der CO₂-Gehalt 1500 ppm nicht übersteigt.

Rechts (Strategie II)

- energetische Sanierung, aber gleiches Lüftungsverhalten
- von 7 bis 14 Uhr 16m³/m²h
- Grundlüftung 0,1 h⁻¹; 5,0h⁻¹ Pausenlüftung; von 7 bis 14 Uhr 8,5 m³/m²h

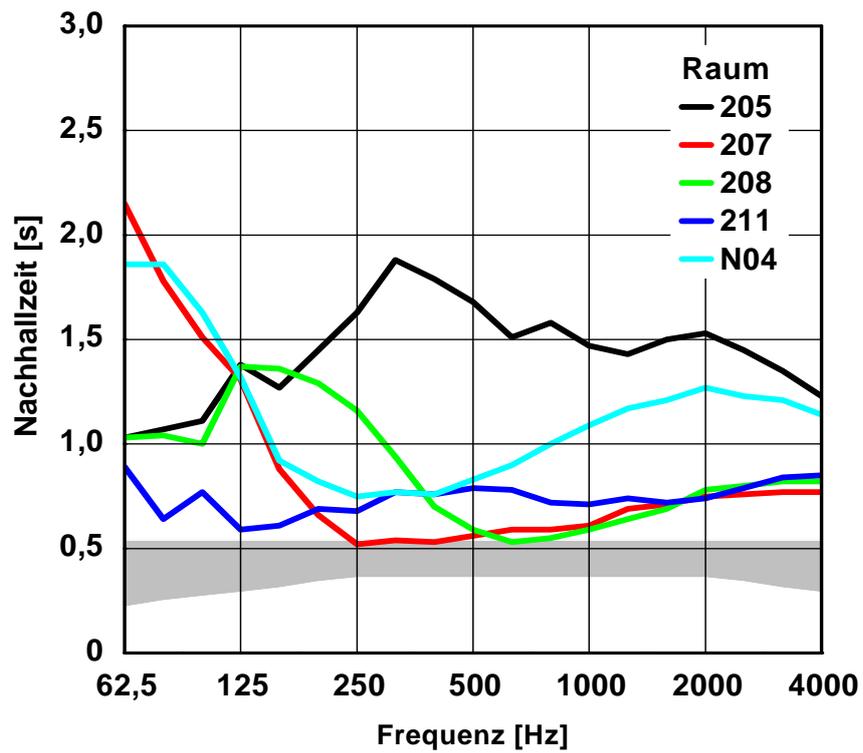


Bild 28: Frequenzabhängige Nachhallzeiten, die in den einzelnen Klassenräumen gemessen wurden. Zum Vergleich ist schraffiert der Bereich, der für die Sprache empfohlenen Nachhallzeiten gemäß Anforderung eingezeichnet.

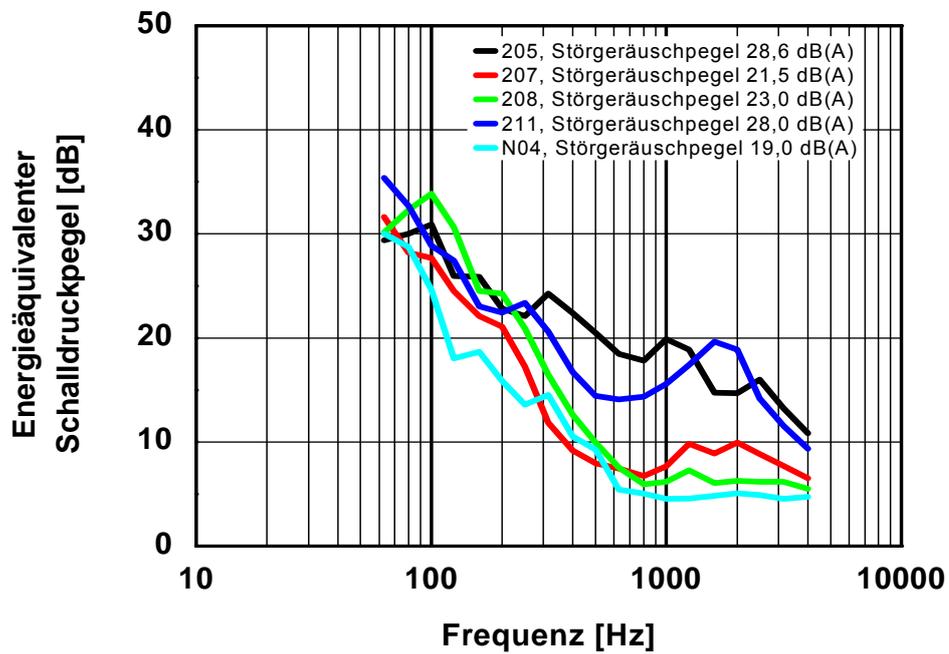


Bild 29: Gemessener Schalldruckpegel in den Klassenräumen bei geschlossenen Fenstern in Abhängigkeit von der Frequenz.

Der Raum 211 befindet sich in dem zur Straße orientierten Gebäudeteil.

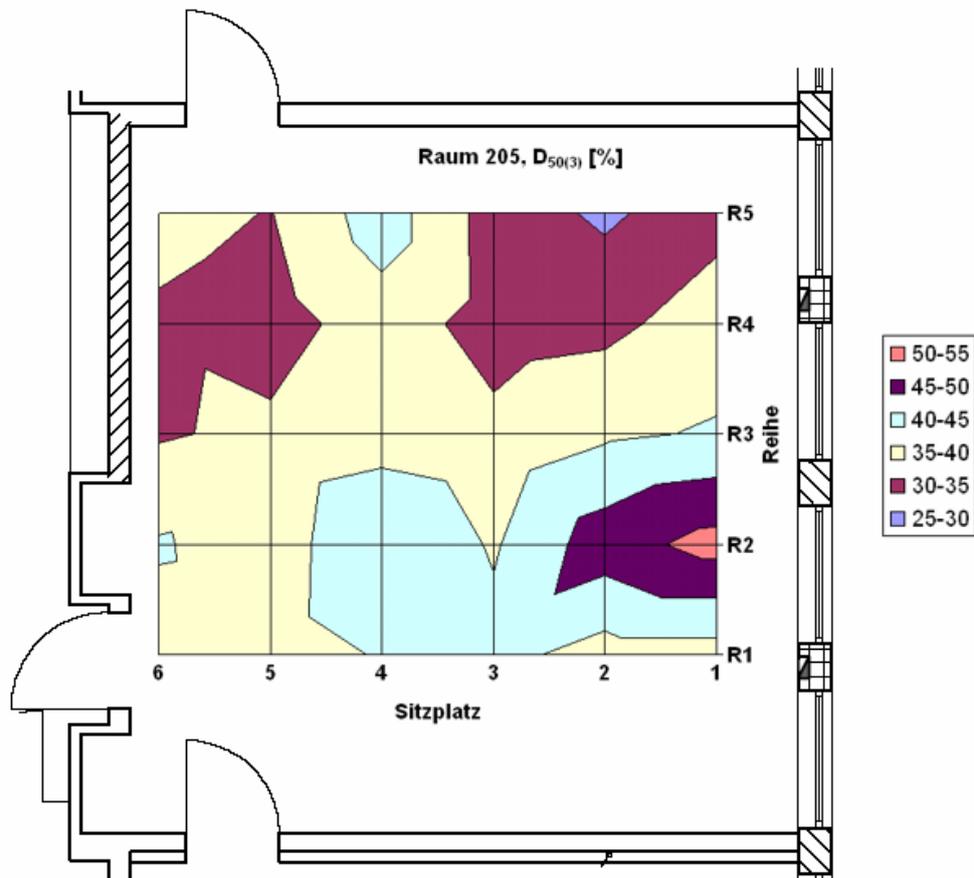


Bild 30: Verteilung des Deutlichkeitsgrades innerhalb eines Klassenzimmers (Raum 211).



Bild 31: Fotoaufnahme (oben) und Thermographieaufnahme (unten) der Fassade vom Nordflügel des Gymnasiums.

Zeitpunkt: Januar 2007 (morgens vor Sonnenaufgang)
Außenlufttemperatur: 3 bis 6 °C
Vorausgegangene Nacht: innen keine Nachtabsenkung

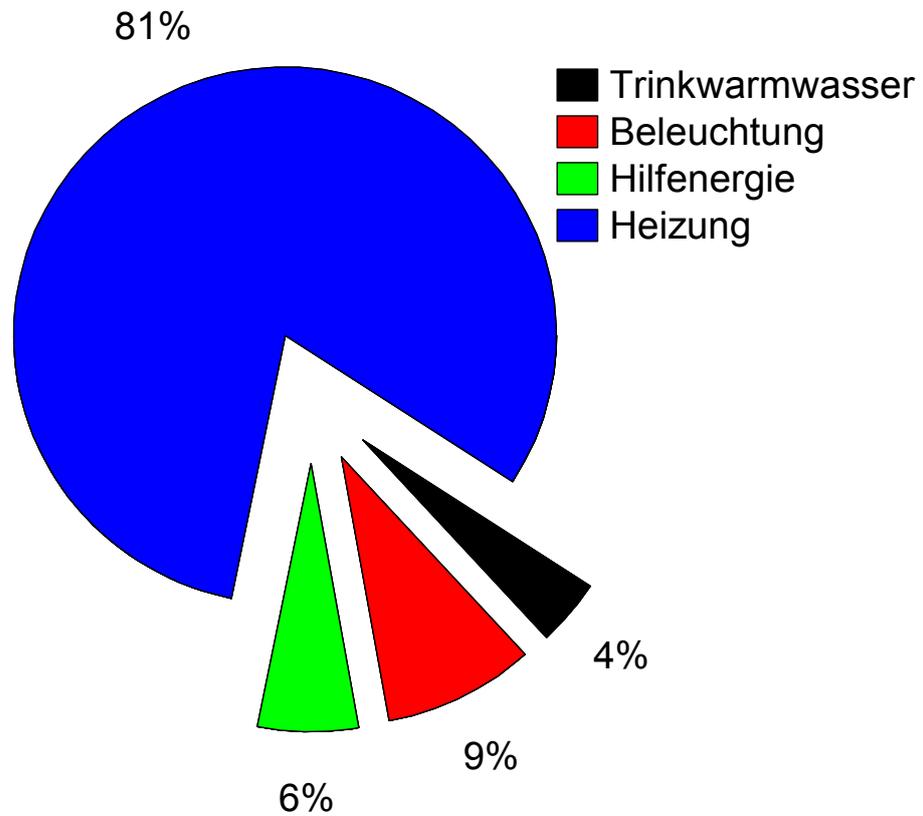


Bild 32: Beiträge der einzelnen Energieanteile zum heizwertbezogenen Energieendbedarfs nach DIN V 18599 für den Gebäudekomplex des Gymnasiums Miesbach.

Den mit Abstand größten Beitrag am Endenergiebedarf von etwa 80 % macht die Beheizung aus. Hier liegen beim Bestandsgebäude die größten Einsparpotenziale hinsichtlich des Endenergiebedarfs.

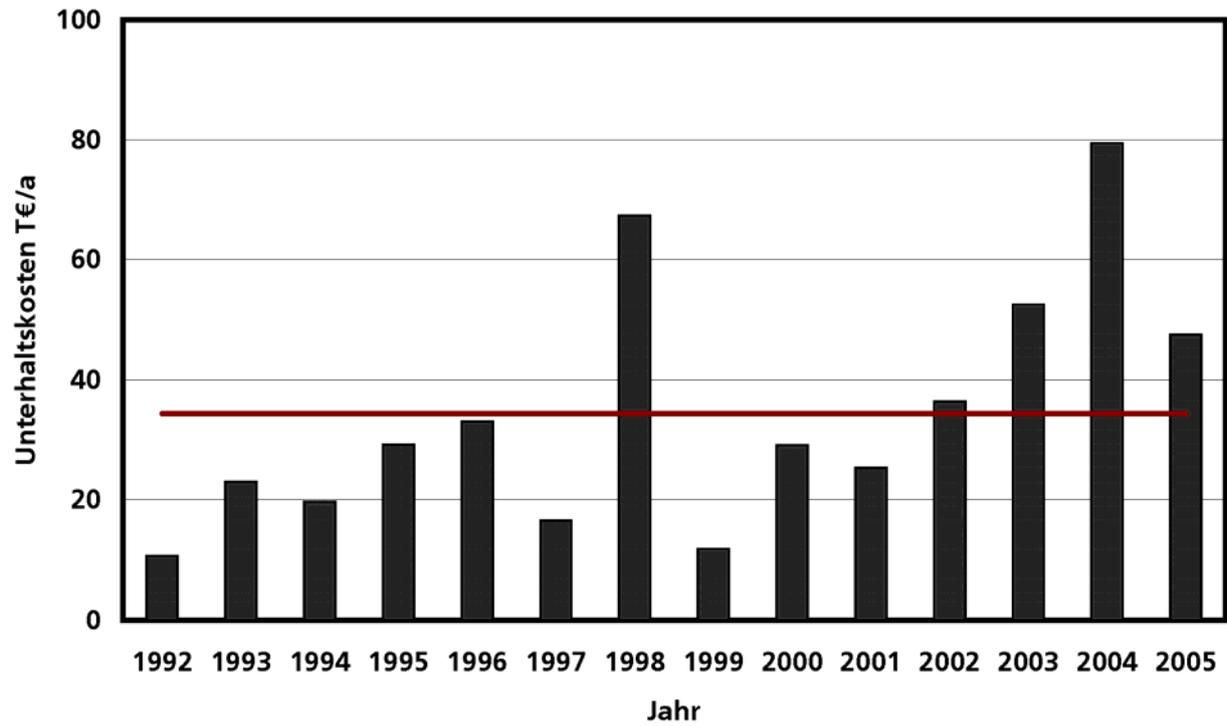


Bild 33: Zusammenstellung der Unterhaltsaufwendungen für die Instandhaltung des Gymnasiums in den Jahren 1992 bis 2005 nach Angaben des Schulträgers.

Der eingezeichnete Mittelwert beträgt 34 T€/a.

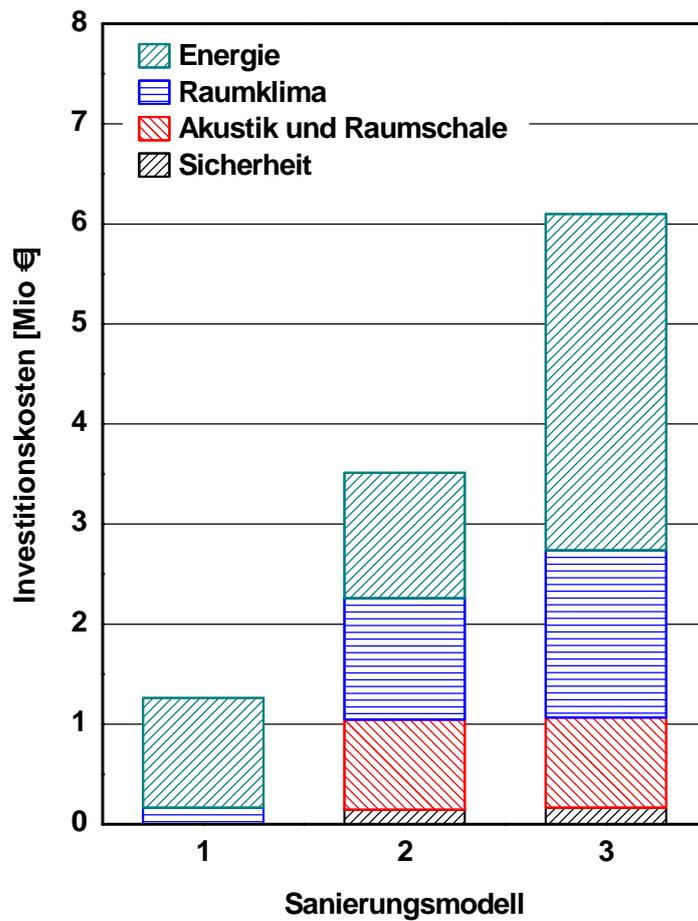


Bild 34: Erforderliche Investitionskosten bei den drei vorgestellten Sanierungsmodellen, jeweils aufgeteilt nach Kosten für die Verbesserung der Sicherheit, des Raumklimas und Energieeinsparung.

Bei den Modellen 2 und 3 sind zusätzlich die Kosten für raumakustische Verbesserungen bzw. für die Erneuerung der Raumschließungsbeuteile enthalten.

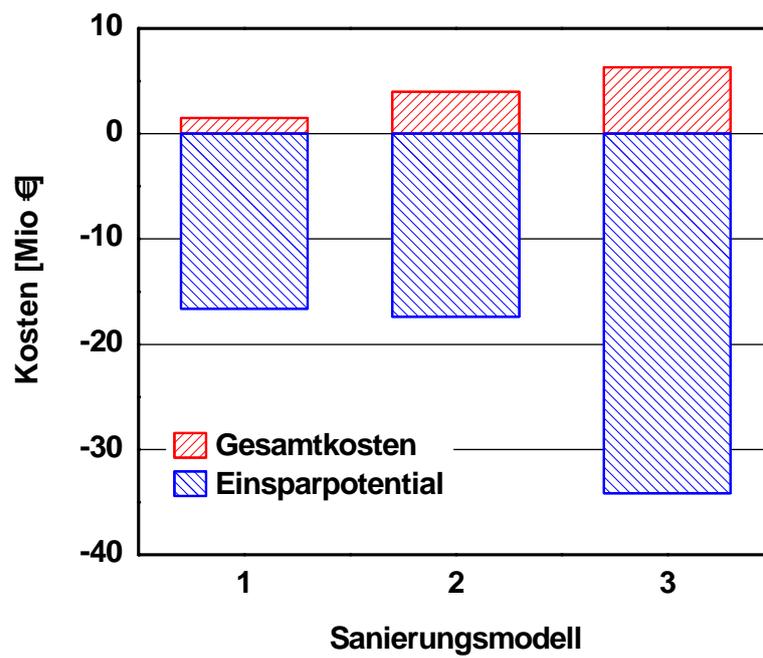


Bild 35: Gegenüberstellung der Investitionskosten und der erreichbaren Energiekosteneinsparung (bis 2020) bei den drei vorgestellten Sanierungsmodellen.

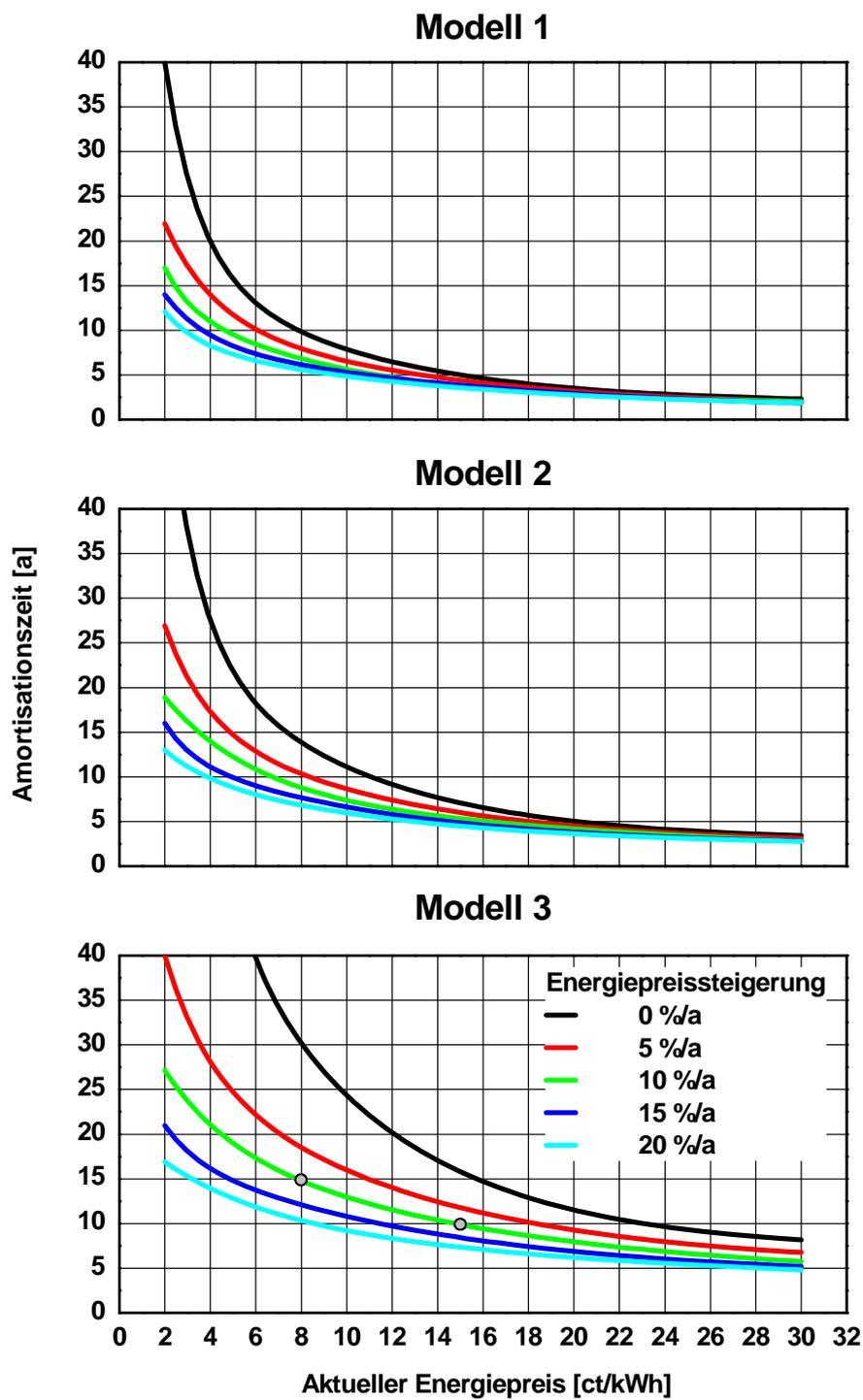


Bild 36: Amortisationszeiten für die bei den drei Sanierungsmodellen anfallenden Investitionskosten in Abhängigkeit vom jeweiligen (aktuellen) Energiepreis und von der Energiepreissteigerung (dynamisch kalkuliert).

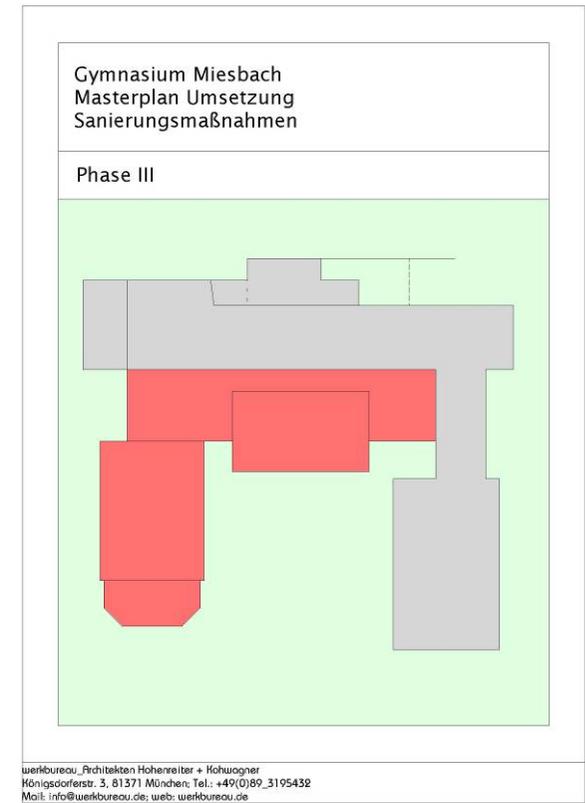
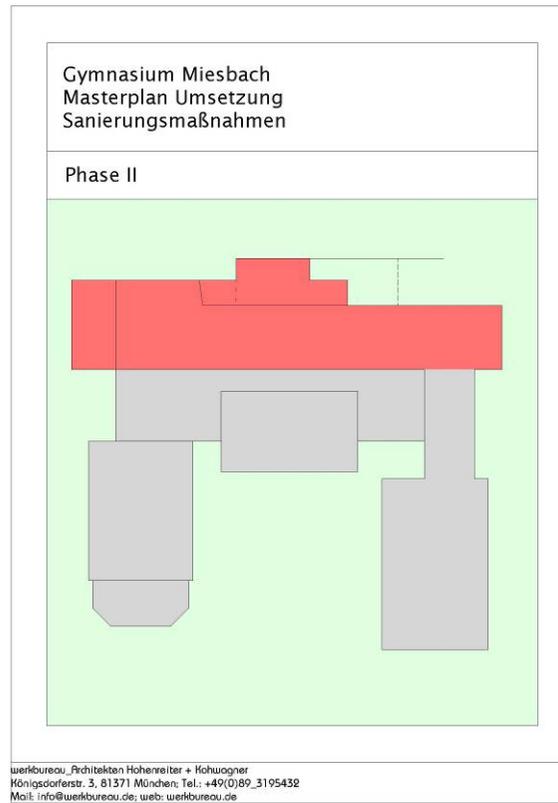
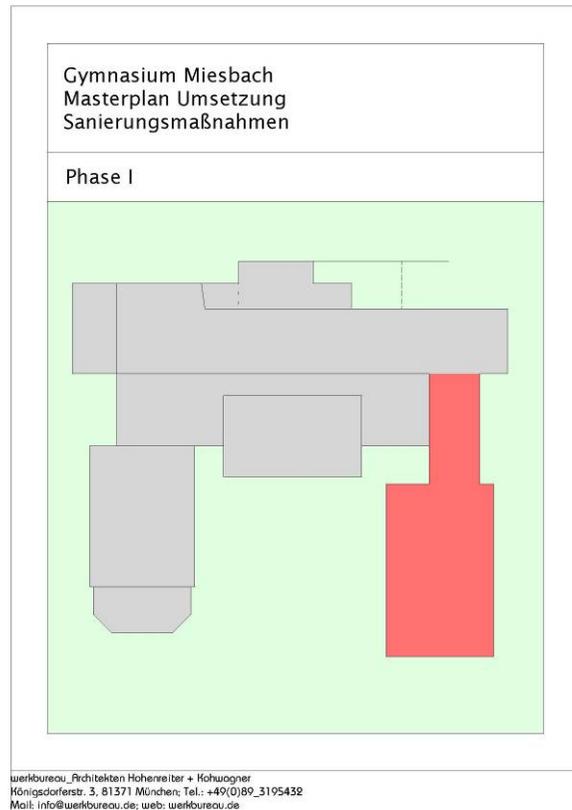


Bild 37: Schematisierter Musterplan für die in drei Phasen umzusetzenden Sanierungsmaßnahmen beim Gymnasium Miesbach.

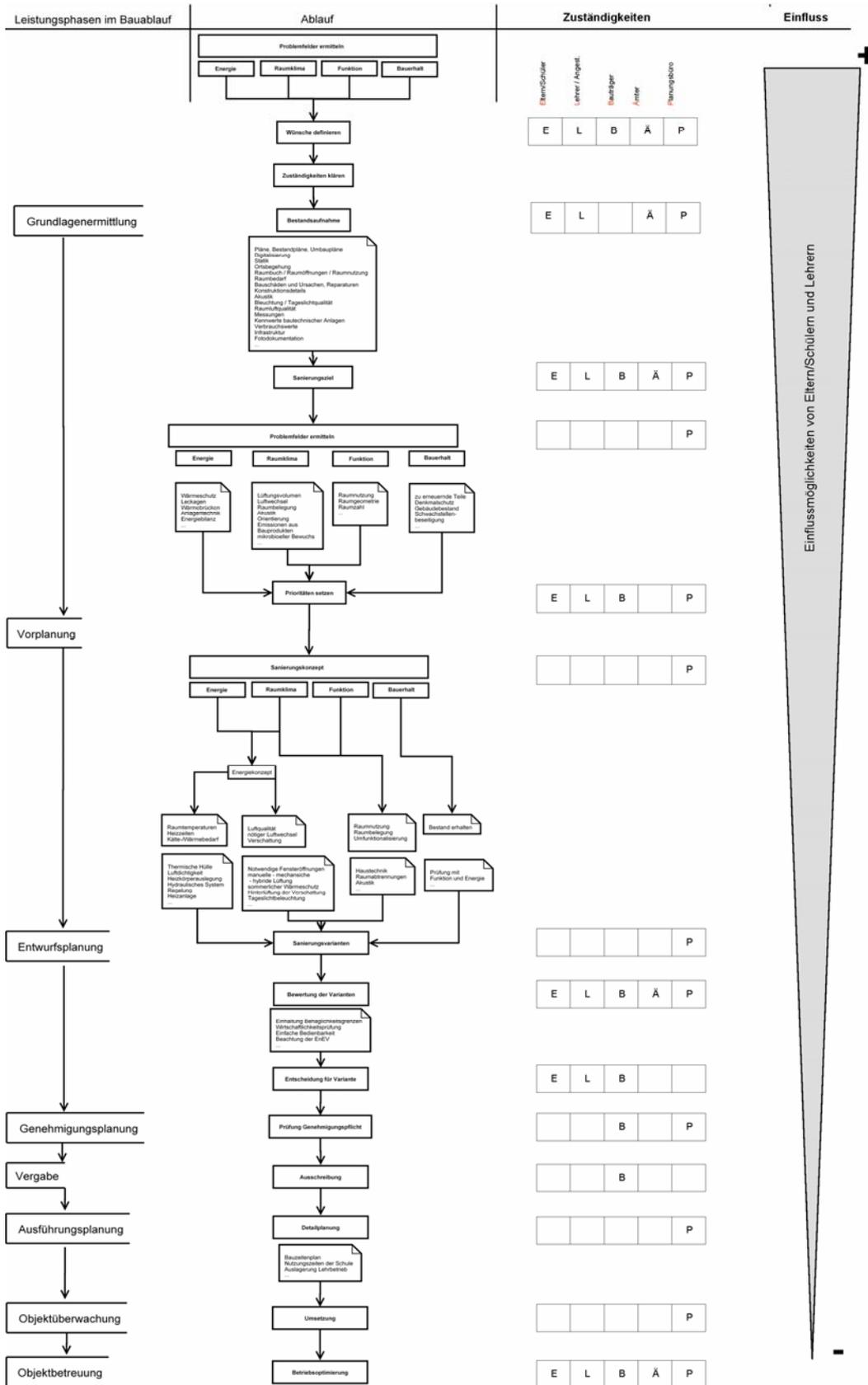


Bild 38: Ablaufschema/Vorgehensweisen im Sanierungsfall