

Schulstiftung im Bistum Osnabrück

# **Evaluierung der modellhaften Sanierung des Klassentraktes Angelaschule Osnabrück**

Abschlussbericht des Projektes 28527

gefördert durch die

Deutsche Bundesstiftung Umwelt

von Georg Schomaker, Stiftungsdirektor

Osnabrück, Juli 2013

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>28527</b>	Referat	<b>24/0</b>	Fördersumme	<b>50.000 €</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Evaluierung der modellhaften Sanierung des Klassentraktes Angelaschule Osnabrück</b>			
<b>Stichworte</b>		Energie, Sanierung			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>39 Monate</b>	<b>15.05.2010</b>	<b>15.08.2013</b>			
Zwischenberichte					
<b>Bevolligungsempfänger</b>		Schulstiftung im Bistum Osnabrück Domhof 2 49074 Osnabrück		Tel	0541-318-189
				Fax	0541-318-188
				Projektleitung Georg Schomaker	
<b>Kooperationspartner</b>		Angelaschule Osnabrück Bremer Energie Institut, Bremen Ostendorf & Partner, Ibbenbüren Jacobi & Richter, Osnabrück Stephanswerk Wohnungsbaugesellschaft mbH, Osnabrück Dip.-Ing. Martin Lindenborn, Osnabrück Bischöfliches Generalvikariat Osnabrück			
<b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b>					
<p>Die modellhafte energetische Sanierung des Klassentraktes der Angelaschule Osnabrück nach dem Leitbild der CO<sub>2</sub>-Neutralität wurde durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit auf Beschluss des Deutschen Bundestages gefördert und in 2010 umgesetzt. Das hier beschriebene DBU-Förderprojekt verfolgt das Ziel, wissenschaftlich abgesicherte Erkenntnisse aus der Sanierung zu gewinnen, diese der Öffentlichkeit zu kommunizieren und Material für Nachahmer zur Verfügung zu stellen.</p> <p>Darüber hinaus ist diese Maßnahme auch integraler Bestandteil der Umweltbildung an der Angelaschule.</p>					
<b>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</b>					
<p>Ein wesentliches Ziel der Sanierung des Klassentraktes der Angelaschule war die Erhaltung der Außenfassade, der typischen Stahlbetonskelett-Klinkerfassade aus den 70er Jahren, die in den nördlichen Regionen weit verbreitet ist. Unklar war, wie sich die notwendige Innendämmung auf das Raumklima der Klassenräume und das wärmetechnische Verhalten des Gebäudes auswirkt. Um ein energetisch optimiertes Ergebnis zu erreichen, wurde ein integrierter Planungsprozess durchgeführt. Im Rahmen von mehrtägigen Workshops berieten alle Beteiligten (Bauherr, Architekt, Ingenieur Elektro, Ingenieur Heizung/Sanitär/Lüftung, Nutzer, Energieberater etc.) gemeinsam, um die Ziele und die optimalen Lösungsansätze zu finden, u. a. mit dem Ziel einer 80%igen CO<sub>2</sub>-Einsparung.</p> <p>Eine intensive Bestandsaufnahme, Erfassung und ggf. Berechnung von Verbrauchs- und Energiedaten war Ausgangspunkt für zukünftige Messungen und Vergleichsberechnungen. Schon frühzeitig war klar, dass die Überprüfung der Ergebnisse in Form einer Evaluierung, wie sie im Rahmen des hier beschriebenen Projektes stattfand, wesentlicher Bestandteil des Prozesses sein sollte. Als externe Partner für die Evaluierung konnte das Bremer Energieinstitut gewonnen werden. Die Messpunkte, die in einem vorangegangenen Forschungsprojekt des Fraunhofer Instituts gesetzt wurden, wurden in die Evaluierung einbezogen. Die laufenden Ergebnisse wurden miteinander analysiert, Szenarien zur Optimierung bedacht und die Handlungsschritte konsequent umgesetzt. Der Hausmeister fungiert verstärkt als „Energiemanager“. Die Nutzer wurden durch gezielte schriftliche Befragungen und Gespräche involviert; Mängel konnten beseitigt werden bzw. im Dialog die Hinweise erklärt werden.</p>					
<small>Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <a href="http://www.dbu.de">http://www.dbu.de</a></small>					

## ***Ergebnisse und Diskussion***

Die langjährige vertrauensvolle Zusammenarbeit der Nutzer (insbesondere der Lehrerinnen und Lehrer) mit dem Bauherrn und den lokalen Fachplanern war eine gute Voraussetzung für den offenen Dialog mit dem Bremer Energieinstitut während der Evaluationsphase.

Die laufenden Messwerte sowie die Rückmeldungen vor Ort wurden analysiert und diskutiert, um dann die erforderlichen Handlungsschritte einzuleiten.

Bei der Modernisierung von Schulen geht es auch um Energieeinsparung, aber eben auch um eine Verbesserung der Lernsituation. Hierbei sind Lüftung, Beleuchtung und Temperaturen wichtige Faktoren. Auch bei hoher Energieeinsparung kann man nicht immer davon ausgehen, dass sich die Modernisierung allein aus der Energieeinsparung bezahlt macht: Zu hoch ist in der Regel der Nachholbedarf in Bezug auf die Luftqualität und andere Parameter der Behaglichkeit.

Das zweijährige Monitoring an der Angelaschule hat gezeigt, dass die Raumluftsituation und die Beleuchtungsqualität deutlich verbessert und gleichzeitig Energie und Energiekosten eingespart werden können. Gegenüber dem unsanierten Zustand wurden der Primärenergieverbrauch und damit die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen um 80 % reduziert. Dank der Lüftungsanlage wird der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft in den Betriebszeiten auch im Winter um etwa 1.000 ppm gehalten. Im unsanierten Zustand wurden im Winter regelmäßig CO<sub>2</sub>-Gehalte von über 3.000 ppm gemessen.

Es hat sich auch gezeigt, dass man mit heutiger Messtechnik wieder neue Ansätze zur laufenden weiteren Verbesserung der Anlageneinstellungen gewinnt. Was die Praxis braucht sind neue Dienstleistungen, die dazu dienen, das Beste aus den installierten Anlagen herauszuholen. Dies können jedoch weder Planer noch Errichter unbezahlt leisten.

## ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Die Homepage der Angelaschule sowie ein eigens eingerichtetes Weblog zum Projekt hat während der Planungs- und Umsetzungsphase die gesamte Maßnahme ausführlich dokumentiert.

In den Jahrbüchern der Angelaschule ist das Projekt beschrieben worden.

Auf der „Woche der Umwelt 2012“ in Berlin sowie beim Stiftertag 2012 in Osnabrück wurde die Öffentlichkeit informiert. Diverse Artikel in der Regional- und Kirchenpresse sind erschienen. Auch hat die Fachpresse über das Vorhaben sowie die Ergebnisse berichtet. Zudem fanden verschiedene Präsentationstermine in der Schule statt.

## ***Fazit***

Das ambitionierte Ziel der 80%igen CO<sub>2</sub>-Reduktion wurde im Berichtszeitraum noch überschritten. Damit wurde ein konkreter Beitrag zum Klimaschutz geleistet.

Die Motivation zum verantwortungsbewussten Umgang mit den Ressourcen war in einem mehrjährigen Prozess beim Betreiber und den Nutzern gelegt. Die Kombination von innovativer Wärmedämmung und optimiertem Betrieb der haustechnischen Anlage hat bei hoher Akzeptanz der Nutzer vor Ort den Erfolg gebracht. Durch die intensive Begleitung in den ersten Betriebsjahren wurde die Anlage nunmehr optimal eingestellt.

Die Befragung der Lehrerinnen und Lehrer hätte unter wissenschaftlichen Aspekten sicherlich noch optimiert werden können.

Aus diesem Evaluationsprozess hat der Bewilligungsempfänger sowie das Bistum Osnabrück für andere Bauvorhaben profitiert und wertvolle Impulse für die Klimaschutzinitiative geleistet.



## **Evaluierung der modellhaften Sanierung des Klassentraktes Angelaschule Osnabrück**

Abschlussbericht des Projektes 28527 gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

### **Inhaltsverzeichnis**

01. Titelblatt: Evaluierung der modellhaften Sanierung des Klassentraktes Angelaschule Osnabrück
02. Projektkennblatt der DBU Aktenzeichen 28527
03. Inhaltsverzeichnis
04. Zusammenfassung
05. Einleitung: Auf dem Weg zur ökologischen Schule...
06. Hauptteil: Evaluierung der modellhaften Sanierung
07. Fazit
08. Anhänge
  - 08.01. Flyer für den Stand der Angelaschule zur „Woche der Umwelt 2012“
  - 08.02. Bericht des Bremer Energieinstitutes
  - 08.03. Muster des Fragebogens für die Lehrerinnen und Lehrer
  - 08.04. Publikation HLH – Mitgleiderausgabe des VDI für technische Gebäudeausstattung 06/2013



**Evaluierung der modellhaften Sanierung des Klassentraktes Angelaschule Osnabrück**

Abschlussbericht des Projektes 28527 gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

**Zusammenfassung**

Der Klassentrakt der Angelaschule Osnabrück mit 18 Allgemeinen Unterrichtsräumen wurde nach intensiver Planung von Mai bis Oktober 2010 ganzheitlich saniert. Das Vorhaben wurde im Rahmen der Klimaschutzinitiative der Bundesregierung als modellhafte Sanierung nach dem Leitbild der CO<sub>2</sub>-Neutralität bei Gesamtkosten von Euro 2,7 Mio. mit Euro 785.000 gefördert. Mindestens 70% der CO<sub>2</sub>-Emissionen mussten zukünftig vermieden werden. Umfangreiche Wärmedämmung, moderne energieeffiziente Technologien und erneuerbare Energien wurden innovativ verknüpft. Die Räume sollten gestalterisch, funktional und raumklimatisch optimiert werden, um die Nutzerzufriedenheit auf Dauer deutlich zu verbessern. Dabei sollte die Außenfassade des Schulgebäudes aus den 70er Jahren mit den Klinkern möglichst erhalten werden.

Dieses – planerisch aufwändige – Gesamtvorhaben ist ein wichtiger Baustein im Rahmen der Energieoffensive der Schulstiftung im Bistum Osnabrück.

Bereits im integrierten Planungsprozess wurde vereinbart, dass eine intensive Begleitung nach der Bauphase notwendig und sinnvoll ist. Wir konnten die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gewinnen, die Evaluation der modellhaften Sanierung zu fördern. Wir haben das renommierte Bremer Energie Institut mit der wissenschaftlichen Begleitung und Erfolgskontrolle der energetischen Sanierung für einen Zeitraum von zwei Jahren beauftragt. Das „neutrale“ Institut hat den Ausgangszustand sowie den modernisierten Zustand ausführlich und mit Detailangaben beschrieben. Ziel des Förderprojektes war, wissenschaftlich abgesicherte Erkenntnisse aus der energetischen Sanierung zu gewinnen, diese der Öffentlichkeit zu kommunizieren sowie Material für Nachahmer zur Verfügung zu stellen. Das Projekt ist integraler Bestandteil der Umweltbildung an der Angelaschule (mehrfach ausgezeichnete „Umweltschule in Europa“).

Während der Phase der Evaluation wurden umfangreiche Messungen und Berechnungen durchgeführt und gemeinsam analysiert. Schulträger, Verantwortliche der Schulgemeinschaft sowie die involvierten Planer standen im regelmäßigen und konstruktiven Dialog mit den Akteuren aus dem Bremer Energie Institut. An die guten Erfahrungen aus dem integrierten Planungsprozess konnte nahtlos angeknüpft werden. Neben den Gesprächen wurden auch die Nutzer befragt. Optimierungsbedarf hinsichtlich Raumtemperatur, Luftqualität und Beleuchtung wurden erhoben. Sonstige Anregungen und konstruktive Rückmeldungen waren ausdrücklich gewünscht. Aufgezeigte Mängel wurden geprüft, Handlungsalternativen bedacht und – sofern möglich – stets sehr zeitnah behoben oder dialogisch geklärt. Dies hat zu einer gestiegenen Zufriedenheit im Lehrerkollegium geführt. Der fachkundige Hausmeister als „Energiemanager“ hat im Zusammenspiel mit allen Beteiligten eine bedeutende Position. Das gelebte Nutzerverhalten ist bekanntlich ein wesentlicher Garant – und damit unverzichtbar – für die Erzielung von Energieeinsparungen.

Das seinerzeitige ambitionierte Ziel zur Reduktion von CO<sub>2</sub> konnte noch übertroffen werden. Gegenüber dem unsanierten Altzustand konnte in beiden Jahren eine Energieeinsparung von über 80 % erzielt werden. Damit konnte mit diesem geförderten Modellvorhaben ein konkreter Beitrag zum Klimaschutz geleistet werden. Auch die Luftqualität konnte signifikant verbessert werden. Die Untersuchungen zu einzelnen Unterrichtsräumen werden in der Studie kommentiert.

Über das Bauvorhaben sowie die Ergebnisse wurde in einem eigens eingerichteten Weblog auf der Homepage der Angelaschule kontinuierlich berichtet. In verschiedenen Publikationen wurde auf das Projekt der Evaluierung eingegangen bzw. bei Veranstaltungen präsentiert.

Die regelmäßige Überprüfung der Messwerte mit der Nachjustierung der Einstellungen der technischen Gebäudeausstattung sowie die Möglichkeit der Rückmeldungen der Nutzer zur zeitnahen Mängelbeseitigung trägt einerseits zur Optimierung der Energieverbräuche und andererseits zur Akzeptanz der Nutzer bei.

## **Evaluierung der modellhaften Sanierung des Klassentraktes Angelaschule Osnabrück**

Abschlussbericht des Projektes 28527 gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

### **Einleitung: Auf dem Weg zur ökologischen Schule...**

Für das Förderprojekt haben wir zu Beginn der Evaluierung folgende Ziele definiert:

1. Wissenschaftlich abgesicherte Erkenntnisse aus der energetischen Sanierung in einem Zeitraum von zwei Jahren zu gewinnen,
2. diese der Öffentlichkeit mit verschiedenen Zielgruppen zu kommunizieren und
3. Material für Nachahmer (insbesondere Schulträger) zur Verfügung zu stellen.

Die wissenschaftliche Begleitung durch das renommierte Bremer Energie Institut geht damit deutlich über unsere Möglichkeiten als Schulträger in Zusammenarbeit mit den involvierten Fachleuten hinaus. Die ganzheitliche und ökologische Sanierungsplanung erfordert die Optimierung aller umfassenden Parameter des Bauens. Diese Studie kann hierzu einen Beitrag für zukünftige Vorhaben vieler Schulträger leisten. Die Förderung von Innovationen im Bereich der energetischen Gebäudesanierung ist ein besonderes Anliegen der DBU.

#### Ausgangslage:

Im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung der Gebäudesituation wurde planmäßig von Mai bis Oktober 2010 der Klassentrakt der Angelaschule Osnabrück mit 18 identischen Allgemeinen Unterrichtsräumen nebst Nebenräumen als „Leuchtturmprojekt“ nach dem Leitbild der CO<sub>2</sub>-Neutralität mit einem Kostenaufwand von rd. 2,4 Mio. Euro – davon rd. 1,6 Mio. Euro Eigenleistungen – saniert. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit hat seinerzeit die bauliche Umsetzung als Modellvorhaben gefördert. Wir haben bei der integralen Planung sowohl den Klimaschutz (Umweltentlastung, Energiekosteneinsparung) als auch die Nutzeransprüche (leistungsfördernde Luftqualität, Akustik, Beleuchtung) durch optimiert eingesetzte Technologien berücksichtigt. Wo immer technisch möglich und wirtschaftlich vertretbar wurden Baustoffe nachhaltiger Herkunft eingesetzt.

Projekt-/Schulträger: Schulstiftung im Bistum Osnabrück  
(Selbständige kirchliche Stiftung mit öffentlicher Rechtspersönlichkeit)  
Domhof 2 in 49074 Osnabrück  
Projektverantwortlicher:  
Georg Schomaker, Stiftungsdirektor  
Tel.: 0541 318-189; Fax: 0541 318-188  
E-Mail: g.schomaker@bistum-os.de  
www.schulstiftung.org

Als Schulträger sind wir unter anderem verantwortlich für die Schulgebäude im Verbund der Stiftungsschulen. Die Schulstiftung wurde 2001 gegründet. Zweck der öffentlichen Stiftung nach kirchlichem Recht ist die „Bildung und Erziehung von Kindern und Jugendlichen zu christlicher Lebensgestaltung und Weltverantwortung auf der Grundlage des katholischen Glaubens“. Seit August 2007 wurde die Schulträgerschaft übernommen; derzeit befinden sich

insgesamt 18 Schulen aus den Regionen Osnabrück, Grafschaft Bentheim, Emsland und Twistringen sowie Bremen im Verbund der Stiftung.

Projektschule: Angelaschule Osnabrück  
Staatlich anerkanntes Gymnasium in Trägerschaft der Schulstiftung  
Bramstraße 41a in 49090 Osnabrück  
Ansprechpartner:  
Karl Große Kracht, Oberstudiendirektor  
Tel.: 0541 61094-0 Fax: 0541 683699  
E-Mail: angelaschule@t-online.de  
www.angelaschule-osnabrueck.de

Die Angelaschule mit über 100-jähriger Tradition ist ein vierzünftiges Gymnasium. Über 1.000 Schülerinnen und Schüler aus Osnabrück – Stadt und Landkreis – werden unterrichtet. Zur Schule und zum Kloster gehört ein landschaftlich reizvoller Park, der von der Gemeinschaft sehr geschätzt wird. Die Angelaschule ist ausgezeichnete Umweltschule in Europa.

Kooperationspartner: Bremer Energie Institut  
College Ring 2, 28759 Bremen  
Projektleiter:  
Dr.-Ing. Klaus-Dieter Clausnitzer  
Tel.: 0421-200-4888; Fax: 0421-200-4877  
E-Mail: clausnitzer@bremer-energie-institut.de  
www.bremer-energie-institut.de

heute:  
Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Material-  
forschung  
Wiener Straße 12, 28359 Bremen  
Tel.: 0421-2246-0, Fax: 0421-2246-300  
E-Mail: info@ifam.fraunhofer.de  
www.ifam.fraunhofer.de

Die beteiligten Planer, die Stephanswerk Wohnungsbaugesellschaft mbH, das Ing.-Büro Ostendorf und Partner, das Ing.-Büro Jacobi & Richter sowie weitere Experten haben die Evaluierung begleitet.

#### Rückblick:

Am 1. Juli 2005 hat das Bistum Osnabrück (seinerzeit Schulträger) einen Förderantrag bei der DBU gestellt und für das Vorhaben „Modellhafte energieeffiziente Schulgebäudesanierung und ökologische Weiterentwicklung eines wertvollen Schulparks im Rahmen der „Innovationsoffensive für Deutschland“ – Konzeptionsphase“ (DBU-AZ: 23386) einen Betrag in Höhe von Euro 125.000 erhalten. Damit wurden drei Bereiche an der Angelaschule in Osnabrück-Haste fokussiert:

1. einen ersten Beitrag für eine „energieeffizientere Schule“ zu leisten,
2. die ökologische Weiterentwicklung des Parks des Ursulinenklosters zu konzipieren und mit Einzelprojekten die Realisierung zu beginnen und
3. die Umweltbildung im Rahmen eines pädagogischen Konzeptes zu verstärken.

Seit dieser Zeit haben wir umfangreiche Konsequenzen auf dem zukunftsorientierten Weg zur ökologischen Schule gezogen.

### Kontext: Energieoffensive der Schulstiftung

Im Rahmen einer Energieoffensive des Bistums Osnabrück werden folgende Schwerpunkte bei den Stiftungsschulen seit dem Jahr 2007 gesetzt:

1. Einsatz von Photovoltaik auf Schuldächern: seit 2008 wurden diverse Anlagen installiert.
2. Heizungsmodernisierung: Bisher wurden 10 Anlagen durch neue energieeffizientere ausgetauscht bzw. modernisiert (teilweise Nutzung alternativer Energien: BHKW´s, Pellets-Heizkessel). Mit dem Einsatz moderner Gebäudeleittechnik ist nun ein zentrales Controlling im Betrieb.
3. Energetische bauliche Maßnahmen: Sondermittel des Bistums wurden und werden für die Schulsanierung auf Basis eines erarbeiteten Klimaschutzkonzeptes bereitgestellt und Drittmittel gezielt und effizient eingesetzt.

### Modellhafte Sanierung des Klassentraktes:

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit in Berlin hat als „Leuchtturmprojekt“ nach dem Leitbild der CO<sub>2</sub>-Neutralität einen Zuschuss in Höhe von Euro 785.438 bewilligt. Wenn sich die Schule als ein Ort der Erziehung und Weitergabe von Werten an die nachfolgende Generation versteht, dann sollte auch die Qualität eines Schulgebäudes ausdrücken, welchen Stellenwert die heutige Gesellschaft und die Kirche der Bildung und Erziehung beimisst.

Eine Verbesserung des Raumklimas in Schulen kann grundsätzlich zur Steigerung der Lern- und Lehrfähigkeit von Schülern und Lehrern beitragen. Daher wurde dieser Punkt im Rahmen der modellhaften Sanierung neben der vereinbarten CO<sub>2</sub>-Reduktion besonders berücksichtigt. Zu den Einflussfaktoren dieses so genannten „Indoor Environment“ zählen: Thermische Behaglichkeit, Luftqualität (CO<sub>2</sub>-Konzentration in den Unterrichtsräumen), Bau- und raumakustische Verhältnisse und Tages- sowie Kunstlichtqualität.

### Evaluierung:

Mit dem Abschluss der Arbeiten zur modellhaften Sanierung sollte das innovative Vorhaben nicht beendet sein. Wir haben die umfangreichen baulichen Maßnahmen innerhalb von zwei Jahren mit wissenschaftlicher Begleitung kritisch gewürdigt und die Zufriedenheit der Nutzer, also insbesondere der Schülerinnen und Schüler als auch der Lehrerinnen und Lehrer in einem Prozess untersucht.

Das Projekt zur Evaluierung wurde unter Beteiligung aller Akteure (Träger, Baufachleute, Schule, Bremer Energieinstitut) ausführlich besprochen und durchgeführt.



**Evaluierung der modellhaften Sanierung des Klassentraktes Angelaschule Osnabrück**

Abschlussbericht des Projektes 28527 gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

**Hauptteil: Evaluierung**

Die wissenschaftliche Begleitung erfolgte durch das renommierte Bremer Energie Institut aus Bremen. Nach einer intensiven Vorbereitung wurden folgende Schritte vereinbart:

1. Ermittlung des Ausgangszustandes durch eine Zusammenfassung der von der Schulstiftung und den Kooperationspartnern zusammengestellten Unterlagen
2. Bewertung des energetischen Zustands nach erfolgter Sanierung auf Basis eines von der Schulstiftung bereitgestellten Energieausweises
3. Zusammenstellung der Kosten für die Sanierung des Klassentraktes
4. Ermittlung und Dokumentation über verbleibende Schwachstellen
5. Erstellung einer ersten Dokumentation und Diskussion mit allen Beteiligten
6. Bewertung des Energieverbrauchs nach einem Jahr nach der Sanierung
7. Bereitstellung eines Fragebogens zur Befragung von Nutzern
8. Erstellung eines Zwischenberichtes und Diskussion mit allen Beteiligten
9. Bewertung des Energieverbrauchs nach dem zweiten Jahr nach der Sanierung
10. Wissenschaftlicher Abschlussbericht und Erstellung von Publikationen.

Die Autoren Dip.-Ing. Max Fette und Dr.-Ing. Klaus-Dieter Clausnitzer vom Bremer Energie Institut haben auftragsgemäß einen Abschlussbericht „Wissenschaftliche Begleitung und Erfolgskontrolle der energetischen Modernisierung der Angelaschule in Osnabrück“ vorgelegt. Der ausführliche wissenschaftliche Bericht ist integraler Bestandteil des Abschlussberichtes. Nach der Einleitung wird der Ausgangszustand ausführlich beschrieben und abschließend bewertet. Im dritten Teil werden der modernisierte Zustand, insbesondere der Wärmeschutz sowie die Versorgung mit Heizenergie und Warmwasser sowie Lüftung und Beleuchtung, beschrieben sowie die Bau- und Baunebenkosten aufgeführt. Die ausführliche Auswertung der Messwerte sowie die Bestimmung von Kosten-Nutzen-Relationen sowie Akzeptanz wird im vierten Kapitel behandelt. Abschließend wird das Gesamtvorhaben zusammengefasst und bewertet.

Das Ergebnis der Sanierung ist eindrucksvoll und hat dabei die seinerzeitigen Erwartungen noch leicht übertroffen: durch die Modernisierung wird über 80 Prozent weniger Kohlendioxid freigesetzt und der gesamte Energieverbrauch konnte um 80 Prozent verringert werden! Der Anteil regenerativer Energien konnte spürbar erhöht werden. Der Wärmeschutz für dieses Gebäude hat sich stark verbessert. Für die Nutzer gibt es nun eine sehr gute Lichtqualität. Die Raumlufttemperaturen haben sich gegenüber dem Altbestand stark verbessert. An sehr warmen Sommertagen lag die Innentemperatur teilweise hoch; es besteht aber Optimierungsmöglichkeit durch veränderte Betriebsweise der Lüftungsanlage in der Nacht. Der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft hat nun gute Werte und konnte signifikant verbessert werden.

Während der mehrjährigen Planung der modellhaften Sanierung, während der Durchführung sowie während der Evaluationszeit gab es eine ständige und vertrauensvolle Kommunikation zwischen dem Schulträger, der Schule sowie den vielen involvierten Fachleuten.

Der Erhebungsbogen zur Optimierung der technischen Anlagen des Klassentrakts der Angeschule Osnabrück wurde allen Lehrerinnen und Lehrern zweifach zur Beantwortung vorgelegt. Dabei wurde vor allem gefragt, welche Mängel es bezüglich der Beheizung, Beleuchtung und Belüftung gibt. Darüber hinaus gab es aufgrund der vertrauensvollen Zusammenarbeit stets zeitnah eine Rückmeldung zu dem möglichen Optimierungsbedarf. Die langjährige Auseinandersetzung mit den energetischen Herausforderungen sowie die vielen konkreten Maßnahmen an der Angeschule haben dazu wesentlich beigetragen.

Die Rückmeldungen wurden gesammelt und individuell in der Arbeitsgruppe ausgewertet. Konstruktive Hinweise wurden dankbar aufgegriffen und ein vermerkter festgestellter Mangel in angemessener Zeit behoben.

Bezüglich der Tafelbeleuchtung gab es unterschiedliche Ansichten. Durch den Einsatz neuer Techniken wird dieses Thema bald der Vergangenheit angehören, da zukünftig verstärkt interaktive Boards bzw. Beamer zum Einsatz im Unterricht kommen.

Bei der angemessenen Höhe der Innen-Temperatur in den Klassenräumen gab es mehrfach unterschiedliche Empfindungen; dies deckt sich mit anderen Erhebungen im Rahmen der Energieoffensive der Schulstiftung im Bistum Osnabrück. Durch eine Richtlinie wurde die Ober- und Untergrenze festgelegt.

Teilweise wurde ein zu starker Luftzug in den Allgemeinen Unterrichtsräumen moniert. Durch technische Optimierungen konnte teilweise Abhilfe geleistet werden; teilweise gab es aber auch unterschiedliche persönliche Empfindungen.

Nach der erfolgreichen Sanierung haben sich die Nutzer schnell an das gute Raumklima im Klassentrakt gewöhnt und als Standard empfunden. Nur im direkten Vergleich zu nicht-sanieren Gebäuden wurde der verbesserte Zustand der räumlichen Situation ausdrücklich hervorgehoben. Die Messergebnisse in einzelnen Unterrichtsräumen hat einige Lehrerinnen und Lehrer positiv beeindruckt; die Visualisierung von Ergebnissen ist dauerhaft möglich und soll temporär durchgeführt werden.

Die eindrucksvollen Ergebnisse des Bremer Energie Instituts wurden in der Fachzeitschrift HLH in der Ausgabe 06/2013 publiziert.

## **Evaluierung der modellhaften Sanierung des Klassentraktes Angelaschule Osnabrück**

Abschlussbericht des Projektes 28527 gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

### **Fazit**

Das Förderprojekt hatte folgende Ziele:

1. Wissenschaftlich abgesicherte Erkenntnisse aus der energetischen Sanierung in einem Zeitraum von zwei Jahren zu gewinnen.
2. Diese der Öffentlichkeit mit verschiedenen Zielgruppen zu kommunizieren.
3. Material für Nachahmer zur Verfügung zu stellen.

Der wissenschaftliche Bericht aus dem Hause Bremer Energie Institut hat ausführlich über das Vorhaben sowie die hervorragenden Ergebnisse kritisch berichtet. Mit dem Einsatz innovativer Technik und Wärmedämmung sowie einem umweltorientierten Nutzerverhalten sind erhebliche Einsparungen beim Energieverbrauch zu realisieren. Dies schont dauerhaft die Umwelt. Auch das Raumklima zum Lernen und Leben lässt sich signifikant verbessern.

Verschiedene Zielgruppen wurden über die Öffentlichkeitsarbeit über das Vorhaben sowie die Ergebnisse informiert. Die lokale Presse sowie die Kirchenzeitung haben über das innovative Projekt mehrfach berichtet. Auch die Fachpresse hat die Untersuchung aufgegriffen. Auf der „Woche der Umwelt 2012“ war die Angelaschule präsent vertreten. Auch beim Stiftertag 2012 in Osnabrück wurde das Evaluationsprojekt vorgestellt.

Sämtliche Daten wurden im Internet veröffentlicht; interessierte Personen können sich jederzeit informieren. Die Schulgemeinschaft war in das mehrjährige Vorhaben involviert. Verschiedene Gruppen haben sich vor Ort über das Projekt erkundigt. Innerhalb des Bistums wurde das Vorhaben in verschiedenen Gremien vorgestellt.

Aufgrund der individuellen Gegebenheiten müssen die Verantwortlichen (in der Regel sind die Schulträger Kommunen) für die sanierungsbedürftigen Schulgebäude eigene Lösungen entwickeln. Klimaschutz wird zunehmend bei den Kommunen als wichtige Aufgabe verstanden. Die zukunftsfähige Realisierung ist selbstverständlich auch abhängig von den finanziellen Möglichkeiten der Kommunen.

Die konstruktiv kritische mehrjährige Begleitung nach der erfolgten Sanierung hat zu weiteren Optimierungen beim Klassentrakt der Angelaschule Osnabrück geführt. Die „Nachsorge“ im Rahmen eines modernen Gebäudemanagements nach Modernisierung von Gebäuden sowie die frühzeitige Involvierung der Nutzer bei Sanierungsmaßnahmen ist fester Bestandteil in der Arbeit der Schulstiftung. Partizipative Prozesse bilden eine wichtige Grundlage für das Gelingen von Umweltschutzmaßnahmen. Aus Kostengründen wird allerdings bei der Schulstiftung auf eine externe Begleitung teilweise verzichtet. Bei einem anderen Vorhaben der Schulstiftung wurde die Möglichkeit geschaffen, dass ein Student über die Evaluierung nach einer Gebäudesanierung seine Bachelor-Arbeit schreibt. Kreative und zugleich finanzierbare Lösungen für Optimierungen sind für die Zukunft zu suchen. Eine gezielte Förderung durch Umweltstiftungen und Umweltvereine in diesem Bereich wäre

sicherlich eine zusätzliche Motivation für die Durchführung.

Die mittelständigen Handwerker, die lokalen Planer und die Schulstiftung haben von der wissenschaftlichen Begleitung während der Phase der Evaluation sowie dem harmonischen und partizipatorischen Prozess während der gesamten Dauer profitiert und mehrere konkrete Hinweise für Folgeprojekte erhalten. Die Angelaschule wurde als Lernort begriffen.

Faxantwort Telefax 0541|9633-190

Name	
Vorname	
Firma	
Anschrift	
Telefon	Telefax
E-Mail	

**Zu welcher Zielgruppe würden Sie sich zählen?**

Bitte ankreuzen

- |   |   |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> Politik Verwaltung     | <input type="checkbox"/> Forschung Hochschule |
| <input type="checkbox"/> Wirtschaft Unternehmen | <input type="checkbox"/> Bildungseinrichtung  |
| Mitarbeiterzahl <input type="text"/>            | <input type="checkbox"/> Umweltverband        |
| <input type="checkbox"/> Medien                 | <input type="checkbox"/> sonstige             |
| <input type="checkbox"/> Privat                 |   |

**Ich möchte mit Ihnen in Kontakt bleiben und habe Interesse an Informationen über die Deutsche Bundesstiftung Umwelt**

- Förderleitlinien|Informationen zur Antragstellung
- Aktuelle DVD mit Förderleitlinien, Projektdatenbank, Jahresbericht etc.
- Aktueller Jahresbericht (einmalig)
- Jahresbericht (regelmäßige Zusendung)
- Monatlich erscheinender Newsletter DBU aktuell per Post  per E-Mail
- Kurzinformationen zur DBU und zum ZUK
- Informationen zum Deutschen Umweltpreis
- Publikationsliste der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
- Informationen zur internationalen Fördertätigkeit der DBU (in englischer Sprache)
- Informationen zu den Stipendienprogrammen der DBU
- Informationen zu Ausstellungen im ZUK
- Einladungen zu Veranstaltungen im ZUK

## DBU – Wir fördern Innovationen

Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) ist eine der größten Stiftungen in Europa. Sie fördert innovative beispielhafte Projekte zum Umweltschutz. Die DBU unterstützt Projekte aus den Bereichen Umwelttechnik, Umweltforschung und Naturschutz, Umweltkommunikation sowie Umwelt und Kulturgüter.

Allgemeine Voraussetzungen für eine Förderung sind die folgenden drei Kriterien:

- Innovation
- Modellcharakter
- Umweltentlastung



Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt setzt bei ihrer Förderfähigkeit insbesondere auf den produkt- und produktionsintegrierten Umweltschutz. Im Mittelpunkt der Förderung stehen kleine und mittlere Unternehmen.

### Herausgeber

Deutsche Bundesstiftung Umwelt  
An der Bornau 2  
49090 Osnabrück  
Telefon 0541|9633-0  
info@dbu.de  
www.dbu.de

### Verantwortlich

Dr. Markus Große Ophoff  
Zentrum für  
Umweltkommunikation  
der DBU gGmbH (ZUK)

### Text und Redaktion

Verena Menz (ZUK)

### Englische

Zusammenfassung  
Antoinette Bismark (ZUK)

### Gestaltung

Helga Kuhn (ZUK)

### Druck

STEINBACHER DRUCK  
GmbH, Osnabrück

### Ausgabe

23386\_23991-21|12  
WdU ID 506

Gedruckt mit ÖkoPLUS-Druckfarben ohne Mineralöle auf einem Papier, das zu 100 % aus Altpapier hergestellt wurde und mit dem »Blauen Engel« zertifiziert ist.

## Angelaschule Osnabrück - Ecological redesign of school building and park

Energy-efficient renovation of the school building, ecological redesign of the park and the integration of these activities into the lessons - large shoes to fill for the Angelaschule, a Gymnasium under the auspices of the school foundation of the Diocese of Osnabrück. Though, the project is a success: since 2006, the school is restored by and by, involving partners from the church and local authorities, the Fraunhofer Institute for Building Physics as also various parent, student and teacher initiatives. The gym, the auditorium and a classroom wing appear in renewed splendor.

### Energy consumption significantly reduced

The class wing got an inside insulation from ecological materials. A new ventilation system in the ceiling of the classrooms regulates both temperature and air intake. An elaborate light control and a sunscreen provide an ideal learning environment. The measures reduced the energy consumption of the building significantly, leading to less carbon-dioxide emissions by over 70%.

A barefoot path, a ropes course, a traditional orchard and a »Green Classroom« make the five-acre park both a learning and a living environment. Even in the curricula of the various school subjects, the themes of ecology and sustainability are firmly anchored. Because of its strong commitment, the Angelaschule has received several awards, such as becoming »Environmental School in Europe« and »Agenda 21-School«, as well as getting the »Eco-Schools Award«.

## Angelaschule Osnabrück: Ökologische Umgestaltung von Schulgebäude und Park





Ökologische Sanierung von Park und Gebäude sowie Einbettung der Maßnahmen in den Unterricht, dafür steht die Angelaschule in Osnabrück.

## Ganzheitliches Konzept

Energieeffiziente Sanierung des Schulgebäudes, ökologische Umgestaltung des Parks und Einbettung der Maßnahmen in den Schulunterricht, so lautete die »Aufgabenstellung« für die Angelaschule, ein Gymnasium in der Trägerschaft der Schulstiftung des Bistums Osnabrück.

Die Lösung der Aufgabe gelang: Seit dem Jahr 2006 wird die Angelaschule Stück für Stück saniert. An dem groß angelegten Projekt sind neben kirchlichen und kommunalen Partnern sowie dem Fraunhofer Institut für Bauphysik (Holzkirchen) auch verschiedene Eltern-, Schüler- und Lehrer-Initiativen beteiligt. Die Turnhalle, die Aula und ein Klassentrakt, die aus den 1960er- und 1970er- Jahren stammen, wurden bereits saniert oder generalüberholt.

## Energieverbrauch deutlich gesenkt

Der sogenannte Klassentrakt – das Gebäude, in dem sich ein Großteil der Klassenräume befindet – erhielt eine Innendämmung mit ökologischen Baustoffen. Von außen betrachtet blieb die Klinkerfassade unverändert. Eine neue Lüftungsanlage unter der Zimmerdecke der Klassenräume regelt sowohl die Raumtemperatur als auch die Luftzufuhr, wobei für eine optimale Wärmenutzung auch die Körperwärme der Gebäudenutzer berücksichtigt wird.

Eine ausgefeilte Lichtsteuerung und ein Sonnenschutz komplettieren die für eine ideale Lernatmosphäre konzipierte Gebäudeausstattung. Durch die Maßnahmen wurde der Energieverbrauch des Gebäudes deutlich gesenkt, sodass sich der Kohlendioxid-Ausstoß um über 70 Prozent reduziert.



Der Naturpark wurde als Lebensraum bewahrt und als Lernraum für die Schulgemeinschaft erschlossen.



Natur erleben mit allen Sinnen auf dem Barfußpfad

## Park als Lern- und Lebensraum

Im fünf Hektar großen Schulpark mit altem Baumbestand wurden ein kleiner Flusslauf und ein See ökologisch saniert und zahlreiche seltene Tiere angesiedelt. Ein Barfußpfad, ein Seilgarten, eine Streuobstwiese und ein »Grünes Klassenzimmer« machen den Park auch für die Schülerinnen und Schüler zu einem Lern- und Lebensraum. In den Curricula der einzelnen Schulfächer sind die Themen Ökologie und Nachhaltigkeit fest verankert.

Außerdem wurde ein Umweltmusical eingeübt und bei regelmäßigen Umwelt-Aktionstagen realisieren Schüler, Eltern und Lehrer handwerkliche Projekte, die vorher

in Arbeitsgruppen geplant wurden. Wegen ihres großen Engagements wurde die Schulgemeinschaft wiederholt ausgezeichnet, beispielsweise als »Umweltschule in Europa« und »Agenda 21-Schule« sowie mit dem »Eco-Schools-Award«.

### Projektthema

**Modellhafte energieeffiziente Schulgebäudesanierung und ökologische Weiterentwicklung eines wertvollen Schulparks im Rahmen der »Innovations-offensive für Deutschland« – Konzeption, wissenschaftliche Begleitforschung**

### Projektdurchführung

**Schulstiftung im Bistum Osnabrück**  
Domhof 2  
49074 Osnabrück  
Telefon 0541|318-189  
g.schomaker@bistum-os.de  
www.schulstiftung.org

### Kooperationspartner

**Angelaschule Osnabrück**  
angelaschule@t-online.de  
www.angelaschule-os.de

Max Fette, Klaus-Dieter Clausnitzer

## Wissenschaftliche Begleitung und Erfolgskontrolle der energetischen Moder- nisierung der Angelaschule in Osnabrück

**Abschlussbericht**

Auftraggeber:

Schulstiftung Bistum Osnabrück

Mai 2013



**Autoren:**

**Bremer Energie Institut**

Dipl.-Ing. Max Fette

Dr.-Ing. Klaus-Dieter Clausnitzer

**Ansprechpartner:**

Dipl.-Ing. Max Fette

Bremer Energie Institut

College Ring 2 / Research V

28759 Bremen

Tel.: +49 (0) 421 / 200 - 4871

Fax: +49 (0) 421 / 200 - 4877

Email: [Fette@bremer-energie-institut.de](mailto:Fette@bremer-energie-institut.de)



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>7</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>9</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>11</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>13</b>
1.1 Hintergrund .....	13
1.2 Ziele der Wissenschaftlichen Begleitung .....	14
1.3 Aufgaben .....	14
1.4 Methodik.....	15
<b>2 Ausgangszustand .....</b>	<b>16</b>
2.1 Baubeschreibung und Nutzung .....	16
2.2 Wärmeschutz .....	19
2.3 Versorgung mit Heizenergie.....	23
2.4 Raumlufttemperaturen .....	24
2.5 Lüftung und Luftqualität .....	25
2.6 Beleuchtung .....	28
2.7 Energieverbrauch / -bedarf.....	30
2.8 Historische Energie- und Betriebskosten.....	34
2.9 Zusammenfassung und Bewertung des unmodernisierten Zustands .....	35
<b>3 Modernisierter Zustand.....</b>	<b>37</b>
3.1 Baubeschreibung und Nutzung .....	37
3.2 Wärmeschutz .....	37
3.3 Versorgung mit Heizenergie und Warmwasser .....	43
3.4 Lüftung und Luftqualität .....	47
3.5 Beleuchtung .....	50
3.6 Energiebedarf lt. Energieausweis .....	54
3.7 Bau- und Baunebenkosten .....	56
<b>4 Untersuchungen zum sanierten Zustand.....</b>	<b>58</b>
4.1 Strom- und Wärmeverbrauch .....	58
4.2 Vergleich des Energieverbrauchs mit Referenzobjekten .....	66
4.3 Abschätzung des Anteils von einzelner Maßnahmen an der Energieeinsparung .....	67
4.4 Energiekosten nach der Sanierung .....	71
4.5 Vergleich des Strom- und Gasverbrauchs vor und nach der Sanierung.....	72
4.6 Vergleich der Energiekosten vor und nach der Sanierung.....	75
4.7 Vergleich der CO <sub>2</sub> -Emissionen vor und nach der Sanierung .....	76
4.8 Andere Messwerte.....	77

4.9	Bestimmung von Kosten–Nutzen–Relationen .....	87
4.10	Akzeptanz.....	92
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Bewertung des modernisierten Zustands .....</b>	<b>93</b>
5.1	Schwachstellen.....	94
5.2	Empfehlungen für zukünftige Bauvorhaben.....	95
<b>6</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>96</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Lageplan .....	16
Abbildung 2	Luftbild des Gebäudekomplexes Angelaschule .....	17
Abbildung 3	Ausgangszustand: Südwestansicht Klassentrakt .....	18
Abbildung 4	Ausgangszustand: Südwestansicht Klassentrakt mit Eingangssituation .....	18
Abbildung 5	Ausgangszustand: Grundriss Klassentrakt, Kellergeschoss .....	19
Abbildung 6	Ausgangszustand: Detail Flachdach .....	20
Abbildung 7	Ausgangszustand: Aufbau Außenwand mit Verblendschale .....	20
Abbildung 8	Ausgangszustand: Details Stahlbetonstütze und Heizungsniische ....	21
Abbildung 9	Ausgangszustand: Außenwand mit Verklinkerung u. 2 cm Luftschicht .....	21
Abbildung 10	Ausgangszustand: Aluminiumfenster Treppenhaus .....	22
Abbildung 11	Ausgangszustand: PVC-Fenster der Sanitärräume .....	22
Abbildung 12	Ausgangszustand: Detail Kellerdecke .....	23
Abbildung 13	Ausgangszustand: Schnittstelle Nahwärmenetz / Unterverteilungsnetz im Heizraum .....	24
Abbildung 14	Ausgangszustand: Temperaturverlauf, Raumluftfeuchte und CO <sub>2</sub> -Gehalt .....	26
Abbildung 15	Ausgangszustand: Raumklima in einem Klassenraum in einer Winterwoche .....	27
Abbildung 16	Ausgangszustand: Typische Deckenleuchten in den Klassenräumen	29
Abbildung 17	Ausgangszustand: Beleuchtung in Fluren .....	29
Abbildung 18	Ausgangszustand: Typische Wandleuchte mit opaler Abdeckung im Treppenhaus .....	30
Abbildung 19	Energiebedarfsausweis unmodernisierter Zustand .....	33
Abbildung 20	Detail Anschluss Dach / Außenwand .....	38
Abbildung 21	Modernisierter Zustand, Ansicht von Nordosten .....	39
Abbildung 22	Neues 3-Scheiben-Fenster mit integriertem Sonnenschutz .....	39
Abbildung 23	Modernisierungszustand: Neue Fenster .....	40

Abbildung 24	Süd-West-Ansicht mit Windfängen und neuer Treppenhausverglasung.....	40
Abbildung 25	Detail Anschluss Kellerdecke / Außenwand.....	41
Abbildung 26	Detail Anschluss Außenwand / Innenwand.....	42
Abbildung 27	Detail Anschluss Innenwand an Außenwand .....	43
Abbildung 28	Systemskizze Heizungsanlage, ohne Darstellung der Wärmerückgewinnung und ohne Darstellung des Redundanz- bzw. Ergänzungssystems Nahwärme.....	44
Abbildung 29	Wandheizung vor dem Einputzen.....	46
Abbildung 30	Elektrischer Durchlauferhitzer in einem Putzmittelraum .....	47
Abbildung 31	Lage der Lüftung im Gebäude (Schnitt) .....	48
Abbildung 32	Lüftungskanal mit Zuluftauslass .....	49
Abbildung 33	Überstromöffnung Klassenraum zum Flur.....	50
Abbildung 34	Neue Klassenraumbeleuchtung mit hocheffizientem Spiegelraster und T 16-Lampen.....	52
Abbildung 35	Tafelbeleuchtung: Leuchtstofflampe mit speziellem Reflektor .....	52
Abbildung 36	Treppenhausbeleuchtung, Wandleuchte mit Leuchtstoff-Ringlampe	53
Abbildung 37	Energieausweis für den modernisierten Zustand.....	55
Abbildung 38	Anteil der Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle an der Endenergieeinsparung .....	71
Abbildung 39	Ausgangszustand: Temperatur, Raumluftfeuchte und CO <sub>2</sub> -Gehalt...	78
Abbildung 40	Raumlufttemperatur, Jahr 2, Raum 203 .....	79
Abbildung 41	Raumlufttemperatur, Winterwoche.....	80
Abbildung 42	Raumlufttemperatur, Sommerwoche.....	80
Abbildung 43	CO <sub>2</sub> -Gehalt, Jahr 2, Raum 203 .....	82
Abbildung 44	CO <sub>2</sub> -Gehalt, Winterwoche, Raum 203 .....	83
Abbildung 45	CO <sub>2</sub> -Gehalt, Winterwoche 2, Raum 203 .....	84
Abbildung 46	CO <sub>2</sub> -Gehalt, Sommerwoche 2, Raum 203 .....	85
Abbildung 47	Relative Luftfeuchtigkeit, Jahr 2, Raum 003 .....	86
Abbildung 48	Relative Luftfeuchtigkeit, Winterwoche, Raum 003.....	86
Abbildung 49	Relative Luftfeuchtigkeit, Sommerwoche, Raum 003 .....	87

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Zustand 2008: Endenergiebedarf nach Zonen .....	31
Tabelle 2	Zustand 2008: Arten des Energiebedarfs .....	31
Tabelle 3	Zustand 2008: Energiebedarf nach Energieträgern .....	32
Tabelle 4	Ausgangszustand: U-Werte der Bauteile .....	35
Tabelle 5	U-Werte der modernisierten Bauteile .....	37
Tabelle 6	Übersicht neue Beleuchtungsanlage.....	54
Tabelle 7	Energetisch relevante Baukosten.....	57
Tabelle 8	Strom-Zählerstände und Verbrauch.....	60
Tabelle 9	Strom-Zählerstände und Verbrauch Klassenräume .....	61
Tabelle 10	Wärmemengen-Zählerstände und Wärmeverbrauch Klassentrakt.....	62
Tabelle 11	Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe.....	63
Tabelle 12	Zusammenfassung Strom und Wärmeverbrauch .....	64
Tabelle 13	Witterungsbereinigte Strom- und Wärmeverbräuche.....	65
Tabelle 14	Witterungsbereinigter Primärenergieverbrauch nach Energieträgern	66
Tabelle 15	Varianten zur Abschätzung des Anteils von einzelnen Maßnahmen an der Energieeinsparung .....	68
Tabelle 16	Gegenüberstellung von End- und Primärenergiebedarfen verschiedener theoretischer Sanierungsvarianten .....	68
Tabelle 17	Abschätzung der Energieeinsparung durch verschiedene theoretische Maßnahmen an der Gebäudehülle.....	69
Tabelle 18	Energiekosten nach der Sanierung .....	72
Tabelle 19	Vergleich Ausgangszustand (verschiedene Baselines) mit modernisiertem Zustand (Durchschnitt Jahr 1 und Jahr 2).....	74
Tabelle 20	Reduktion des End- und Primärenergiebedarfes .....	75
Tabelle 21	Vergleich Energiekosten vor und nach der Sanierung.....	76
Tabelle 22	CO <sub>2e</sub> -Emissionen vor und nach der Sanierung .....	77
Tabelle 23	Statische Amortisationszeit mit verschiedenen Annahmen .....	88
Tabelle 24	Angenommene Energiepreiserhöhung.....	90
Tabelle 25	Geschätzte reale Energiepreise Energiepreiserhöhung .....	90
Tabelle 26	Barwerte der umgesetzten Maßnahmen und Betriebskosten .....	91

Tabelle 27      Übersicht unsanierter / sanierter Zustand..... 93

## Abkürzungsverzeichnis

BHKW	Blockheizkraftwerk
C	Celsius
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxyd
d	Dicke
el	elektrisch
K	Kelvin
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
lx	Lux
MWh	Megawattstunde
th	thermisch
UG	Untergeschoss (Kellergeschoss)
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient in W/(m <sup>2</sup> *K)
W	Watt
WMZ	Wärmemengenzähler



# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

Die Schulstiftung im Bistum Osnabrück ist seit 2007 Träger von derzeit 18 katholischen Schulen aus den Regionen Bremen, Osnabrück und Emsland. Sie wird durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt dabei gefördert, Erfahrungen aus der ökologischen Sanierung eines Klassentraktes der Angelaschule Osnabrück der Allgemeinheit zur Verfügung zu stellen. Die Modernisierung der Angelaschule ist kein singuläres Projekt: Im Rahmen einer „Energieoffensive“ der Schulstiftung werden in den Jahren 2007 bis 2012 bei den Stiftungsschulen folgende Schwerpunkte gesetzt:

1. Einsatz von Photovoltaik auf Schuldächern: Neben zwei bereits vor 2007 installierten PV-Anlagen wurden mit Kooperationspartnern seit 2008 sieben zusätzliche installiert. Weitere sollen folgen.
2. Heizungsmodernisierung: Bis 2010 wurden zwölf Anlagen ausgetauscht bzw. modernisiert. Dabei erfolgte teilweise eine Nutzung alternativer Energien oder es wurden BHKW eingesetzt.
3. Energetische bauliche Maßnahmen: Hierfür wurden bzw. werden Sondermittel bereitgestellt und erfolgreich Drittmittel akquiriert.

Ein Schwerpunkt wurde auf die Angelaschule gesetzt. Diese Schule ist ein vierzügiges staatlich anerkanntes Gymnasium. Über 1.000 Schülerinnen und Schüler aus Osnabrück – Stadt und Landkreis – werden unterrichtet. Zur Schule und zum angrenzenden Kloster gehört ein landschaftlich reizvoller Park, der von der Schulgemeinschaft sehr geschätzt wird. Im Rahmen eines Förderprojektes mit der Deutschen Bundesstiftung Umwelt wurden seit 2006 drei Bereiche fokussiert:

1. Einen Beitrag für eine energieeffizientere Schule zu leisten,
2. Die ökologische Weiterentwicklung des Parks des Ursulinenklosters zu konzipieren und mit Einzelprojekten die Realisierung zu beginnen,
3. Die Umweltbildung im Rahmen eines pädagogischen Konzeptes zu stärken.

Aufgrund der Bewertung der einzelnen Gebäudebestände wurde eine Gesamtkonzeption entwickelt. Im Dezember 2006 lag das umfangreiche Ergebnis vor. Im ersten Schritt wurde 2007 der Aula- und Musiktrakt saniert sowie von 2008 bis 2009 notwendige Arbeiten im schulisch genutzten Klostertrakt sowie im Turnhallegebäude fortgesetzt.

Seit 2010 wurden an der Angelaschule mit finanzieller Unterstützung durch das Bundesministerium für Umwelt Energie sparende Maßnahmen vorgenommen. Die Konzep-

tion sah vor, das so genannte Klassentraktgebäude umfangreich zu modernisieren, den Energiebedarf drastisch zu reduzieren und den verbleibenden Wärme- und Kältebedarf weitgehend mit regenerativen Energien zu decken. Dabei soll der verbliebene Heizwärmebedarf einerseits durch ein Flächenheizsystem mit geringer Betriebstemperatur sowie durch eine Lüftungsanlage gedeckt werden. Das Bündel der Maßnahmen soll nach der durchgeführten Sanierung dauerhaft zu einer signifikanten CO<sub>2</sub>-Reduzierung im Rahmen des definierten Klimaschutzzieles führen.

Die Baumaßnahmen begannen Mitte Mai 2010 und endeten im Wesentlichen im Oktober 2010.

## 1.2 Ziele der Wissenschaftlichen Begleitung

Mit der wissenschaftlichen Begleitung werden folgende Ziele verfolgt:

1. Gewinnung wissenschaftlich abgesicherter Erkenntnisse aus der energetischen Sanierung, um andere Schulen ggf. auf ähnliche oder noch verbesserte Weise modernisieren zu können,
2. die Erkenntnisse der Öffentlichkeit zu kommunizieren,
3. Material für Nachahmer zur Verfügung zu stellen.

Die wissenschaftliche Begleitung verfolgt bewusst das Ziel, Erkenntnisse aus den ersten beiden Jahren der Betriebszeit der neuen Anlagen auszuwerten. Während sich die Gebäude- und Technikplaner nach Fertigstellung eines Gebäudes naturgemäß anderen Aufgaben widmen müssen, bleibt die wissenschaftliche Begleitung noch zwei Jahre „am Ball“. Diese Vorgehensweise ist der Erkenntnis geschuldet, dass bei komplexen Modernisierungen nach Fertigstellung noch Einregulierungsarbeiten vorgenommen werden müssen und sich die tatsächliche Einsparung erst nach ein bis zwei Jahren offenbart. Gerade eine Betrachtung unter Berücksichtigung der tatsächlich eingesparten Folgekosten ist jedoch für potenzielle Nachahmer wichtig, um Klimaschutzmaßnahmen in den jeweiligen Gremien der Institutionen und bei den finanzierenden Stellen besser durchsetzen zu können; aber auch, um eventuelle Fehlentwicklungen zu erkennen. Wir danken der Deutschen Bundesstiftung Umwelt dafür, dass sie diese Wissenslücken erkannt hat, ihre Beseitigung für maßgeblich hält und unsere Arbeit ermöglicht, denn die wissenschaftliche Begleitung geht weit über das hinaus, was ein Schulträger mit eigenen Kräften zu leisten vermag. Die Erkenntnisse dienen der Allgemeinheit.

## 1.3 Aufgaben

Das Bremer Energie Institut hat die wissenschaftliche Begleitung des Projekts übernommen. Es wurden die folgenden Arbeitsbereiche abgedeckt:

1. Ermittlung des Ausgangszustands / Detaillierung der Forschungsfragen,
2. Begleitung und Dokumentation der Modernisierungsphase,
3. Erfolgskontrolle nach dem ersten Jahr,
4. Erfolgskontrolle nach dem zweiten Jahr.

## 1.4 Methodik

Zur Durchführung der Aufgaben wurden folgende Methoden eingesetzt:

1. Dokumentenanalyse,
2. Literaturrecherche,
3. Internetrecherche,
4. Ingenieurwissenschaftliche Auswertungen.

## 2 Ausgangszustand

Die folgenden technischen Angaben beruhen auf dem [BMU Antrag, o.J.], wenn nicht anders angegeben.

### 2.1 Baubeschreibung und Nutzung

Die Angelaschule ist im Norden Osnabrücks, im Ortsteil Haste, an der Bramstraße gelegen.

Die Schule gliedert sich in zwei Hauptbereiche, vgl. Abbildung 1 und Abbildung 2. Es handelt sich zum einen um die alte Klosterschule mit anschließendem Erweiterungsbau von 1965. Als geschlossener Gebäudekomplex grenzen die beiden Gebäude das Schulgelände zur Bramstraße hin ab. Zum anderen handelt es sich um zwei rückwärtig gelegene Gebäude, das Aulagebäude und den Klassentrakt. Diese befinden sich als jeweils freistehende Gebäudekörper auf dem rückwärtig südlich gelegenen Schulgelände. Die Thomas-Morus-Schule, ebenfalls in Trägerschaft der Schulstiftung im Bistum Osnabrück, ist auf der nördlichen Seite der Bramstraße gelegen und in einem Energieverbund mit der Angelaschule Osnabrück verbunden.

Abbildung 1 Lageplan

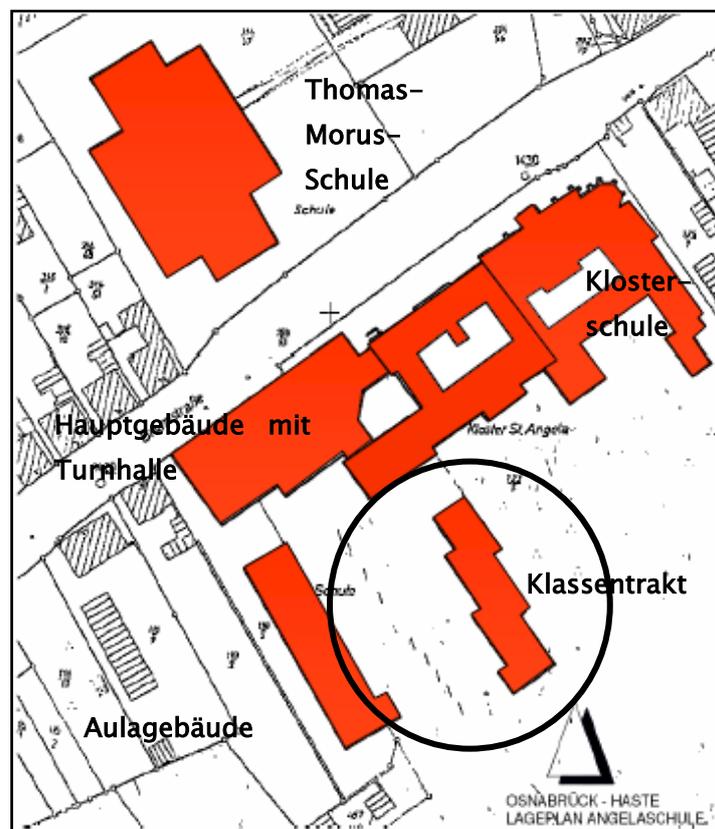


Abbildung 2 Luftbild des Gebäudekomplexes Angelaschule



Der untersuchte Klassentrakt der Angelaschule wurde 1965 als Stahlbetonskelettbau mit einer Verblendschale aus Klinkern erbaut. Es handelt sich bei dem Flachdachgebäude um einen frei stehenden dreigeschossigen Baukörper in Nordwest-Südost-Ausrichtung. Er gliedert sich in drei gestaffelt angeordnete Gebäudeteile.

Abbildung 3 Ausgangszustand: Südwestansicht Klassentrakt



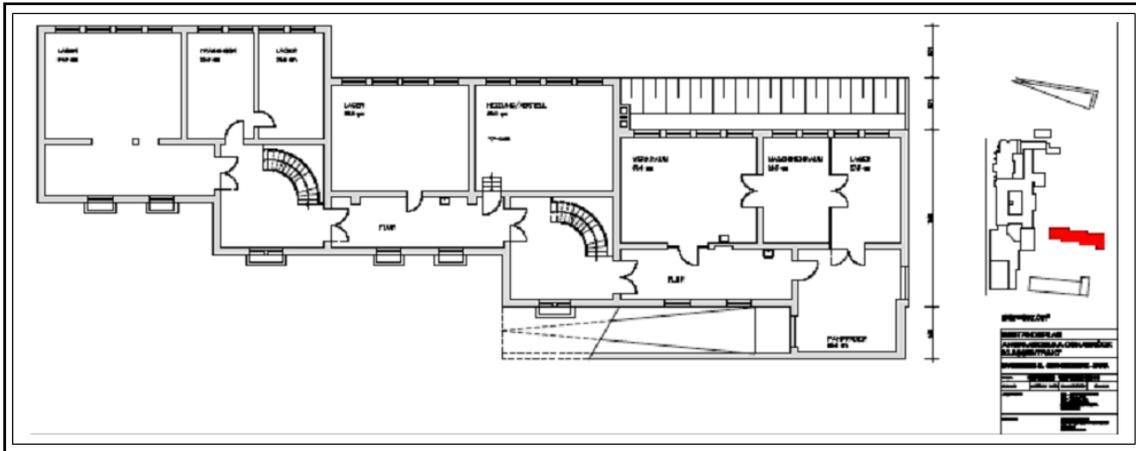
Abbildung 4 Ausgangszustand: Südwestansicht Klassentrakt mit Eingangssituation



Das Gebäude verfügte über insgesamt 18 Klassenräume ähnlicher Bauart von ca. 55,0 m<sup>2</sup> bis 56,5 m<sup>2</sup> bei einer Raumhöhe von 3,17 m; sie sind allesamt nach Nordosten ori-

entiert. Im Kellergeschoss wurde lediglich ein Raum als Werkraum genutzt, alle anderen Räume dort waren Lager, Abstell- und Haustechnikräume.

**Abbildung 5** Ausgangszustand: Grundriss Klassentrakt, Kellergeschoss



Im Ausgangszustand waren die Klassenräume, die Kellerräume und die Flure beheizt: Das Treppenhaus war sowohl zum Keller als auch zu den Fluren hin offen, so dass diese indirekt mitbeheizt wurden. [Ostendorf 2010 09 22]

Die Bruttogeschossfläche wurde mit ca. 2.670m<sup>2</sup> angegeben, die Nettogröße mit ca. 2.000 m<sup>2</sup>. Davon entfallen ca. 1.200 m<sup>2</sup> auf die Klassen- bzw. Nebenräume.

Die Klassenräume wurden in den Unterrichtszeiten zu Unterrichtszwecken genutzt; darüber hinaus gelegentlich für Elternabende. In der Vergangenheit wurde der Klassentrakt nur an ein bis zwei Tagen im Jahr für außerschulische Veranstaltungen genutzt.

Somit konnte die Nutzungszeit nach [DIN V 18599-10: 2007-2] pro Jahr auf ca. 200 Nutzungstage bzw. 1.400 Stunden pro Jahr abgeschätzt werden.

## 2.2 Wärmeschutz

### 2.2.1 Dach

Das Flachdach bestand aus der 20 cm starken Rohdecke und lediglich 6 cm dicken Korkdämmplatten und Bitumenabdichtung. Zum Innenraum hin schloss eine 1,5 cm dicke Putzmörtelschicht aus Kalkzement die Decke ab. Der U-Wert dieses Bauteils betrug rechnerisch 0,63 W/(m<sup>2</sup>K), jedoch war die Dämmschicht stark durchfeuchtet. Dadurch war der tatsächliche U-Wert bedeutend schlechter einzustufen.

Abbildung 6 Ausgangszustand: Detail Flachdach



## 2.2.2 Außenwände

Die Außenwände bestanden aus dem tragenden Betonskelett und Ausfachungen aus Kalksandstein auf der Innenseite, einer ruhenden Luftschicht von 2 cm und einer Verblendschale aus einem ockerfarbenen Klinker. Hier betrug der U-Wert 1,13 W/(m<sup>2</sup>K). Die Stahlbetonkonstruktion mit einer 4 cm dicken Dämmschicht aus innen angebrachten Holzwolle-Leichtbauplatten und einer 1,5 cm dicken Putzschicht wies einen U-Wert von 0,97 W/(m<sup>2</sup>\*K) auf. Ein ähnlicher Wert (0,92 W/(m<sup>2</sup>\*K)) galt für die Heizungsrisen. Diese verfügten nur über eine leichte Dämmung mit Holzwolleleichtbauplatten.

Abbildung 7 Ausgangszustand: Aufbau Außenwand mit Verblendschale

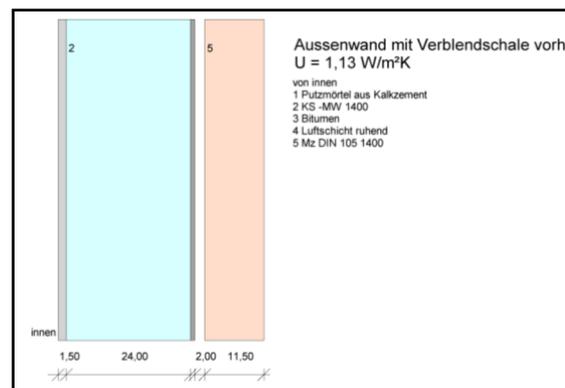


Abbildung 8 Ausgangszustand: Details Stahlbetonstütze und Heizungs-nische

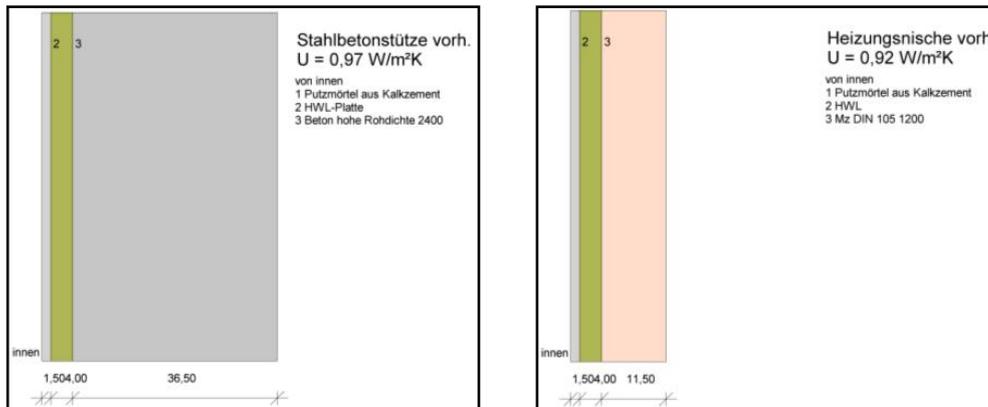


Abbildung 9 Ausgangszustand: Außenwand mit Verklinkerung u. 2 cm Luftschicht



### 2.2.3 Fenster und Außentüren

Ein Großteil der Fenster und alle Haupteingangstüren wurden 1983 ausgetauscht; der U-Wert nach dem Austausch betrug ca. 3,0 W/(m²K). Es kamen verschiedene Rahmenarten zum Einsatz: PVC und Aluminium. In den Flurbereichen und in den sanitären Anlagen waren noch die ursprünglichen, einfach verglasten Holzfenster und Glasbausteine vorhanden, hier lagen die U-Werte bei bis zu 4,7 W/(m²K). Die Außentüren waren Aluminiumrahmentüren mit Glasausfachungen.

Der Sonnenschutz bestand aus Fenstervorhängen.

Abbildung 10 Ausgangszustand: Aluminiumfenster Treppenhaus



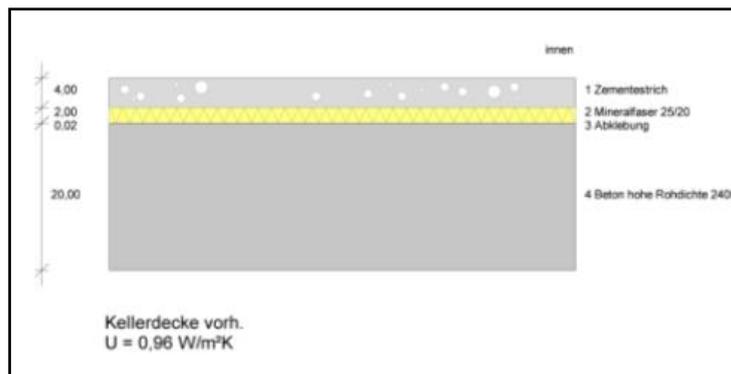
Abbildung 11 Ausgangszustand: PVC-Fenster der Sanitärräume



## 2.2.4 Kellerdecke

Die Kellerdecken waren Stahlbetondecken,  $d = 20 \text{ cm}$ , mit  $2 \text{ cm}$  Trittschalldämmung und  $4 \text{ cm}$  Zementestrich. Der U-Wert betrug  $0,96 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Abbildung 12 Ausgangszustand: Detail Kellerdecke



## 2.3 Versorgung mit Heizenergie

Die Heizenergieversorgung für die Schule wurde bereits im Jahr 2009 kurz vor der 2010 erfolgten Modernisierung des Klassentraktes umgestellt.

Im Ausgangszustand Anfang 2010 verfügte der Klassentrakt über keine eigenständige Heizungsanlage [BMU Antrag, o.J. S. B-7]. Er wurde über eine Heizungsanlage aus dem benachbarten Klostergebäude versorgt. Die ursprünglich dort vorhandene Kesselanlage (Erdgas) wurde 2009 saniert. Dabei wurden 28 Jahre alte Standard-Gaskessel gegen Brennwertkessel ausgetauscht. In diesem Zuge wurde die Nennleistung um ca.  $500 \text{ kW}$  auf ca.  $1,4 \text{ MW}$  reduziert.

Im Ausgangszustand befand sich die Kesselanlage der Angelaschule darüber hinaus im Wärmeverbund mit dem Angelakloster und der benachbarten Thomas-Morus-Schule. An der Thomas-Morus-Schule sind ein Pflanzenöl-BHKW mit einer Leistung von ca.  $200 \text{ kW}_{\text{th}}$  und ein Gasbrennwertkessel mit einer Leistung von ca.  $625 \text{ kW}$  installiert. Insgesamt ist im Wärmeverbund laut [Ostendorf 2010 10 20] eine thermische Leistung von ca.  $2.300 \text{ kW}$  verfügbar.

Auch der Klassentrakt war an den Wärmeverbund angeschlossen. Demzufolge wurde ein Teil der benötigten Heizwärme durch das Pflanzenöl-BHKW gedeckt. Dieses BHKW lief in der Grundlast; die Fachplaner gehen davon aus, dass dieses BHKW ca. 30 bis 35 % der Jahresheizarbeit erbracht hat [Ostendorf 2010 09 22].

Die Anbindung des Klassentraktes an das Heizsystem erfolgte im Ausgangszustand über eine Nahwärmeleitung. Die Nahwärmeleitung vom Klostergebäude mündete im Heizraum des Klassentraktes (UG) in das Verteilnetz des Klassentrakts.

Die Systemtemperaturen der Heizungsverteilung betragen 70°C / 55°C (Vorlauf / Rücklauf). Die Heizungsverteilungen stammten aus dem Jahr 1965 und waren größtenteils unter Putz verlegt. Zum Teil waren sie in den Außenwänden verlegt. Die Dämmqualität dürfte dem Baujahr entsprochen haben. Es handelte sich um eine Warmwasser-Pumpenheizung mit zwei unregulierten Umwälzpumpen. Seit 2009 erfolgte im Zuge der Sanierung der Heizungsanlage nun eine Außentemperaturregelung.

Als Heizflächen waren Stahlradiatoren-Heizkörper in Heizkörpernischen vorhanden.

Zur Regelung der Raumtemperaturen wurden 2-K-Thermostatventile eingesetzt. Diese konnten vor Ort bedient werden. Eine Strang-Regelung der Beheizung einzelner Klassen außerhalb der Schulzeit war nicht möglich, es konnten nur alle Klassen gleichzeitig beheizt werden.

**Abbildung 13** Ausgangszustand: Schnittstelle Nahwärmenetz / Unterverteilungsnetz im Heizraum



Eine zentrale Warmwasserbereitung war nicht vorhanden. An insgesamt drei Waschtischen bzw. Ausgussbecken gab es 10-l-Übertischgeräte (Elektro). Zusätzlich gab es einen 80 l-Warmwasserbereiter (Elektro) für Werkräume.

## 2.4 Raumluf temperatures

Die Raumluf temperatures wurden über zwei Jahre durch Messungen des Fraunhofer Instituts für Bauphysik in einem repräsentativen Klassenraum analysiert. Es zeigten

sich hohe tages- und jahreszeitliche Schwankungen. Im Sommer herrschten unangenehm hohe Temperaturen bis zu 34°C, die sich auch durch Fensterlüftung nicht verringern ließen. Im Winter hingegen konnte die Heizung morgens den leeren Klassenraum nur bis maximal 17°C aufheizen. Erst nachdem der Raum wieder genutzt wurde, stiegen die Temperaturen während der Belegungszeit langsam auf maximal 20° C an, vgl. [IBP, o.J.]

## 2.5 Lüftung und Luftqualität

CO<sub>2</sub> ist ein Gas, das unter anderem durch die menschliche Atmung entsteht. In der normalen Außenluft beträgt der CO<sub>2</sub>-Gehalt ca. 300 bis 350 ppm<sup>1</sup>. In typischen Klassenräumen kann der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft auf Werte bis ca. 5.000 ppm steigen. In der Norm DIN 1946 -2 wird dagegen als hygienischer Höchstwert für die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Aufenthaltsräumen 1.500 ppm genannt. Zwischen dem CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft und der sensorischen Beurteilung der Luftqualität besteht ein Zusammenhang. Höhere CO<sub>2</sub>-Werte als 1.500 ppm führen u.a. zur Beeinträchtigung der Konzentrationsfähigkeit. Gerade in Schulen ist es deshalb wichtig, dass stets eine Versorgung mit Frischluft stattfindet. Die Fensterlüftung ist dafür wenig geeignet.

Im unmodernisierten Zustand war im Klassentrakt keine maschinelle Lüftung vorhanden. Die Lüftung erfolgte ausschließlich über Infiltration durch Undichtigkeiten und Fensterlüftung. Da im Winter die Raumlufttemperaturen sowieso schon niedrig waren, wurde – wie Messungen zeigten – auch wenig über die Fenster gelüftet, vgl. [IBP, o.J.]. Hierdurch stiegen in den Wintermonaten die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in einem untersuchten typischen Klassenraum auf Werte, die 3.000 bis 5.000 ppm erreichten (vgl. Abb. 15). 50 % aller Messwerte während potenzieller Schulstunden in den Wintermonaten lagen über 1.350 ppm.

Die relative Luftfeuchte lag durchgängig zwischen 40 und 75 % r.F. und damit in einem für die menschliche Behaglichkeit normalen Bereich.

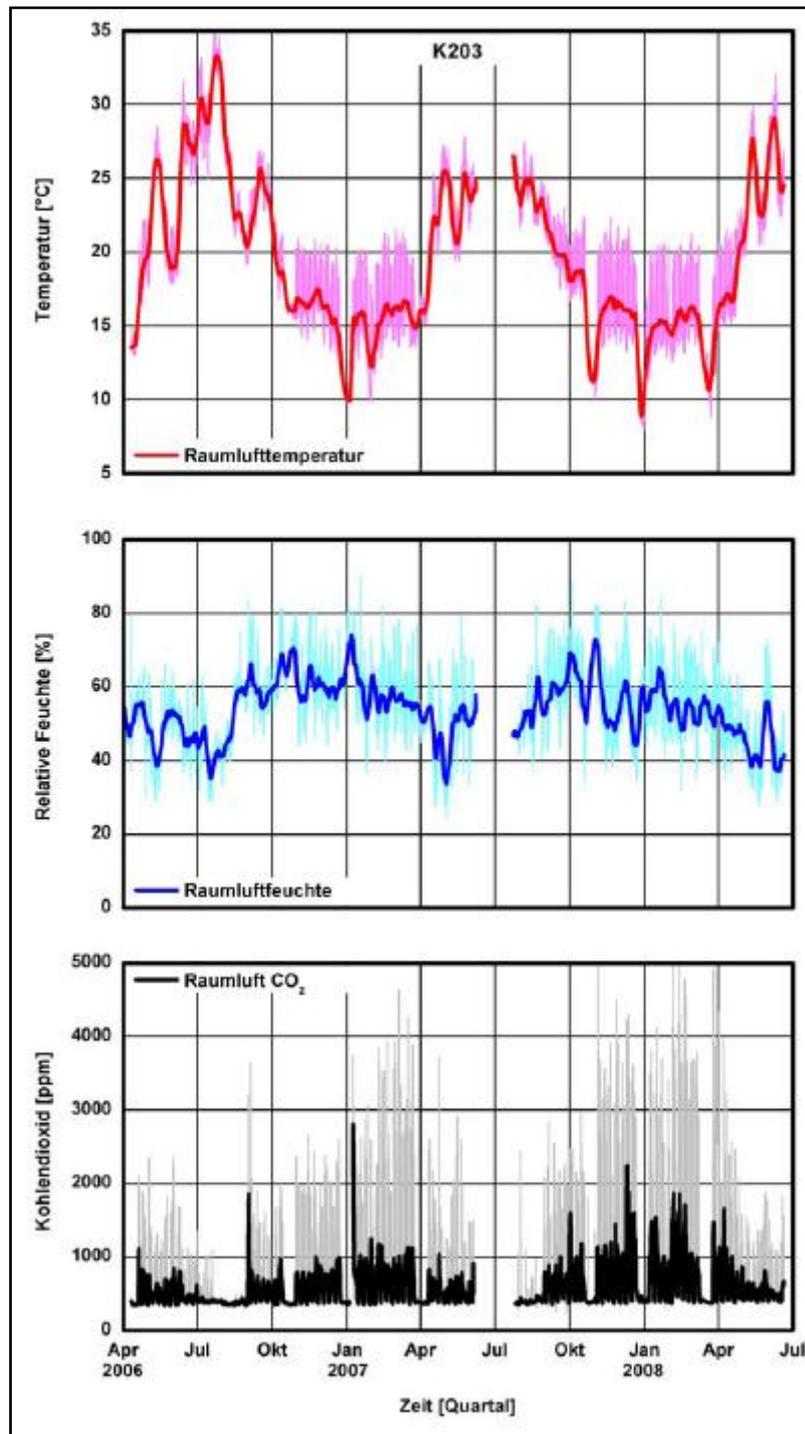
Auch für die Sanitärräume war keine maschinelle Lüftung vorhanden.

---

<sup>1</sup> Das entspricht 0,03 bis 0,035 %. 1 % = 10.000 ppm

**Abbildung 14 Ausgangszustand: Temperaturverlauf, Raumluftfeuchte und CO<sub>2</sub>-Gehalt**

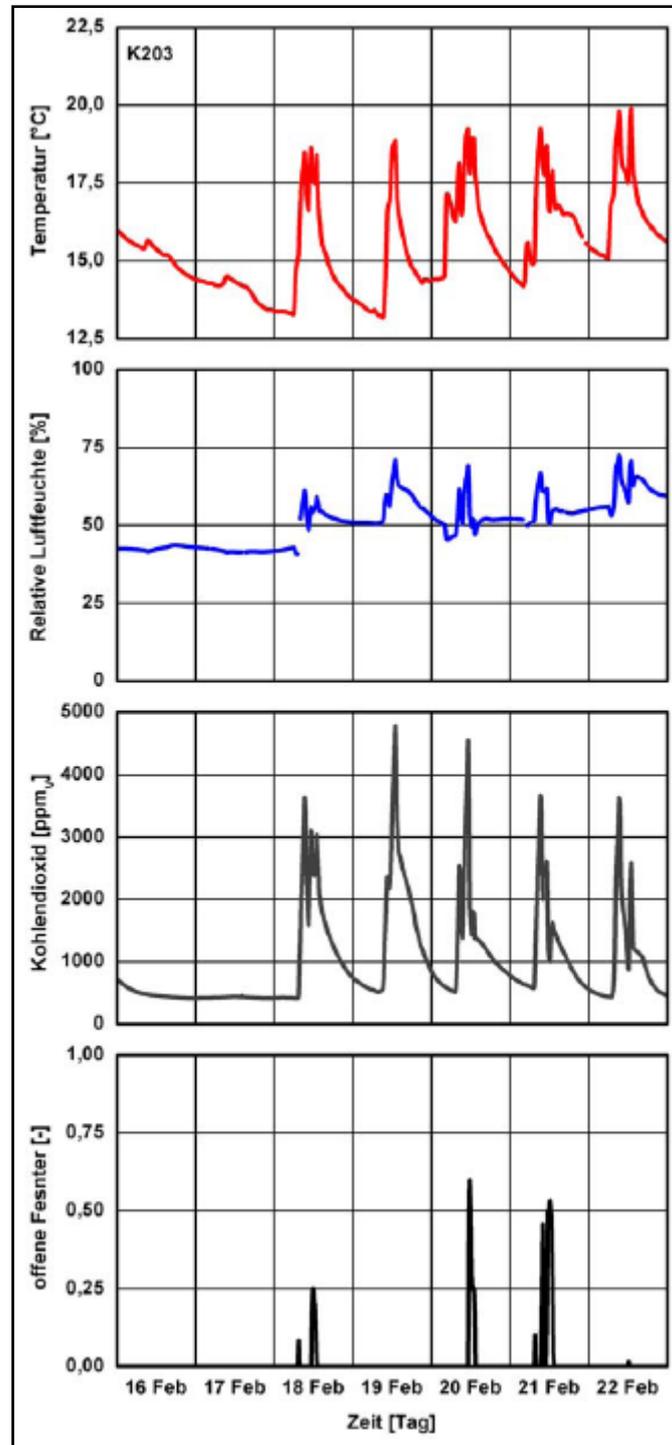
Temperatur und Feuchte als 15-Minuten-Mittelwerte (dünne Linie) und gleitendes Wochenmittel (dicke Linie). CO<sub>2</sub> als 15-Minuten-Mittelwerte und als gleitendes Tagesmittel, gemessen im Klassenraum K203 von April 2006 bis Juli 2008



Quelle: [IBP, o.J.], S. 46

Abbildung 15 Ausgangszustand: Raumklima in einem Klassenraum in einer Winterwoche

Mittelwerte über 15 Minuten, gemessen im Klassenraum K203 des Klassentraktes, 16. bis 22. Februar 2008



Quelle: [IBP, o.J.], S. 47

## 2.6 Beleuchtung

Alle Klassenräume, Flure und Sanitärräume hatten Fenster.

Für die ergänzende künstliche Beleuchtung in den Klassenräumen kamen je 8 einfache Wannenleuchten mit Prismenabdeckung ohne Blendungsbegrenzung zum Einsatz, sie waren jeweils mit 2 x 58 W Leuchtstofflampen bestückt. Die Leuchten waren mit konventionellen Vorschaltgeräten (KVG), Leuchtstofflampen (T 36) und PCB-haltigen Kondensatoren ausgestattet. Eine separate Tafelbeleuchtung war nicht vorhanden. Die erforderliche Beleuchtungsstärke von 300 lx wurde eingehalten. Insgesamt kamen 144 Leuchten in den Klassenräumen zum Einsatz. Dies ergibt eine Gesamtleistung von 21,6 kW; unter Berücksichtigung des Gleichzeitigkeitsfaktors von 0,9 verbleiben 19,44 kW.

Bei den Fluren kamen 16 runde Wannenleuchten mit opaler Abdeckung mit Ringröhren T36, 40 W, und konventionellen Vorschaltgeräten zum Einsatz. Die Gesamtleistung betrug hier unter Einbeziehung des Gleichzeitigkeitsfaktors von 0,9 nun 0,79 kW.

Die Treppenhäuser waren mit 12 Wandleuchten mit opaler Abdeckung T 26, 18 W, und KVG beleuchtet. Die Anschlussleistung unter Berücksichtigung des Gleichzeitigkeitsfaktors von 1,0 betrug 0,3 kW.

Die Flure und Treppenhäuser (Fluchtwege) waren mit 17 lx bis 40 lx nicht ausreichend beleuchtet, außerdem fehlten in den Treppenhäusern Rettungszeichen- und Sicherheitsleuchten.

Ansonsten gab es noch Außenbeleuchtung, 10 Glühlampen à 75 W, sowie Leuchten für das Kellergeschoss unterschiedlicher Art. Hierbei handelte es sich um 43 Leuchten mit Leuchtmitteln von 70 bis 150 W.

Zur Steuerung der Beleuchtung gab es in den Klassenräumen nur jeweils einen Ein-Aus-Schalter.

Auch in den Fluren und Treppenhäusern sowie im Keller war keine differenzierte Beleuchtungssteuerung vorhanden.

Die gesamte elektrische Anschlussleistung für die Beleuchtung unter Berücksichtigung der Gleichzeitigkeitsfaktoren betrug rd. 22 kW.

Abbildung 16 Ausgangszustand: Typische Deckenleuchten in den Klassenräumen



Abbildung 17 Ausgangszustand: Beleuchtung in Fluren



Abbildung 18 Ausgangszustand: Typische Wandleuchte mit opaler Abdeckung im Treppenhaus



## 2.7 Energieverbrauch / -bedarf

### 2.7.1 Energieverbrauch

Der Energieverbrauch eines Gebäudes wird auf der Basis der Abrechnung von Heizungs-, Warmwasser-, Lüftungsanlagen- und Beleuchtungskosten berechnet.

Der Energieverbrauch für den Klassentrakt im Ausgangszustand liegt nicht in Form von Messwerten vor, weil kein Zwischenzähler für den Klassentrakt installiert war. Deshalb mussten die Verbrauchswerte geschätzt werden.

Für die Beleuchtung wurde der Stromverbrauch vom Elektro-Fachplaner auf 23.765 kWh/a abgeschätzt [BMU Antrag, o.J.] S. D-25.

### 2.7.2 Energiebedarf

Der Energiebedarf gibt die nach technischen Regeln berechnete, jährlich benötigte Energiemenge für Heizung, Lüftung, Warmwasserbereitung und Beleuchtung an. Er wird unter Standardklima- und Standardnutzungsbedingungen errechnet.

Von den Fachplanern liegen unterschiedliche Schätzungen des Energiebedarfs vor.

Nach [BMU Antrag, o.J.] S. C-29 beträgt der Energiebedarf für Raumwärme ca. 395.000 kWh/a. Aufgrund der Fläche von 2.670 m<sup>2</sup> ergibt sich daraus eine Bedarfskennzahl „Heizenergie“ von 148,1 kWh/(m<sup>2</sup>\*a).

An anderer Stelle im [BMU Antrag, o.J.] Seite C-52 wird der Endenergiebedarf auf der Basis von Berechnungen nach DIN V 18599 angegeben. Die dort genannten Zahlen zeigen die Tabelle 1, Tabelle 2 und Tabelle 3. Bei diesen Tabellen muss berücksichtigt werden, dass sie sich auf den Zustand im Jahr 2008 beziehen, also den Zustand *vor* Erneuerung der Heizanlage im Jahr 2009 und auch das Pflanzenöl-BHKW nicht berücksichtigen. Auf den Versorgungszustand Anfang 2010 – vor Modernisierung des Klassentraktes – bezogene Werte liegen nicht vor.

**Tabelle 1 Zustand 2008: Endenergiebedarf nach Zonen**

Zone		RLT	Beleuchtung	Warmwasser	Heizung	Summe
	m <sup>2</sup>	kWh/(m <sup>2</sup> a)				
Klassenzimmer	1.105	0	15,1	0	313,6	328,7
Flure, Treppenhäuser	621	0	15,8	0	330,7	346,5
Sanitäre Anlagen	124	0	35,5	0	559,0	594,5
<b>Summe Gebäude</b>	<b>1.849</b>	<b>0</b>	<b>16,6</b>	<b>0</b>	<b>335,7</b>	<b>352,4</b>

Quelle: [BMU Antrag, o.J.], Seite C-52

**Tabelle 2 Zustand 2008: Arten des Energiebedarfs**

	RLT	Beleucht.	Warmwasser	Heizung	Summe
	kWh/(m <sup>2</sup> a)				
Nutzenergiebedarf	0	16,7	0	225,0	241,7
Endenergiebedarf (Brennwertbezogen)	0	16,7	0	338,4	355,1
Primärenergiebedarf (Heizwertbezogen)	0	45,1	0	339,8	384,9

Quelle: [BMU Antrag, o.J.], Seite C-52.

Tabelle 3 Zustand 2008: Energiebedarf nach Energieträgern

Energieträger	Prozessbereich	Endenergiebedarf (bei Wärme: Brennwert)	Umrechnungsfaktor Brennwert in Heizwert	Umrechnungsfaktor Endenergie in Primärenergie $F_P$	Primärenergiebedarf (bei Wärme: Heizwert) $Q_P$
		kWh/a			kWh/a
Erdgas	Heizwärme	620.846	1/1,11	1,10	615.252
Strom-Mix	Beleuchtung	30.899	1	2,70	83.428
Strom-Mix	Hilfsenergie	4.796	1	2,70	12.949
Summe		656.541			711.629

Quelle: [BMU Antrag, o.J.], Seite C-53

Nach [Lindenborn 2010 10 13] werden im Energieausweis für den unmodernisierten Zustand im Jahr 2008 folgende Werte genannt: Endenergie Heizung: 341,4 kWh/(m<sup>2</sup> a), Endenergie Beleuchtung 16,7 kWh/(m<sup>2</sup> a); in der Summe 358,1 kWh/(m<sup>2</sup> a). Der Primärenergiebedarf gesamt wird dort mit 388 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) angegeben.

Aus den Angaben in Tabelle 2 ergibt sich für die Fläche von 1.849 m<sup>2</sup> ein Primärenergiebedarf von 384,8 kWh/(m<sup>2</sup> a).

Die Jahresheizarbeit im Ausgangszustand (2009) wurde nach Angaben der TGA-Fachplaner [Ostendorf 2010 09 22] zu 30 bis 35 % durch das Pflanzenöl-BHKW, der Rest durch Erdgasbrennwertkessel erbracht.

Die folgende Abbildung zeigt den Energiebedarfsausweis für den unmodernisierten Zustand. Quelle: [Lindenborn 2010 10 13]. Zu beachten ist, dass im Energieausweis von einer Fläche von 1.850 m<sup>2</sup> ausgegangen wird.

Abbildung 19 Energiebedarfsausweis unmodernisierter Zustand

## ENERGIEAUSWEIS

für Nichtwohngebäude  
gemäß den §§ 16 ff. Energieeinsparverordnung (EnEV)

**Berechneter Energiebedarf des Gebäudes**

Bramstr.41  
Modellhafte Schulgebäudesanierung St. Angela

2

### Primärenergiebedarf „Gesamtenergieeffizienz“

CO<sub>2</sub>-Emissionen<sup>1)</sup> [kg/(m<sup>2</sup>·a)]

**Dieses Gebäude**  
388 kWh/(m<sup>2</sup>·a)

**Anforderungen gemäß EnEV<sup>2)</sup>**

Primärenergiebedarf

Ist-Wert **388** kWh/(m<sup>2</sup>·a) Anforderungswert **150** kWh/(m<sup>2</sup>·a)

Mittlere Wärmedurchgangskoeffizienten  eingehalten

Sommerlicher Wärmeschutz (bei Neubau)  eingehalten

**Für Energiebedarfsberechnungen verwendetes Verfahren**

Verfahren nach Anlage 2 Nr. 2 EnEV

Verfahren nach Anlage 2 Nr. 3 EnEV („Ein-Zonen-Modell“)

Vereinfachungen nach § 9 Abs. 2 EnEV

### Endenergiebedarf

Energieträger	Jährlicher Endenergiebedarf in kWh/(m <sup>2</sup> ·a) für					Gebäude insgesamt
	Heizung	Warmwasser	Eingebaute Beleuchtung	Lüftung <sup>4)</sup>	Kühlung einschl. Befeuchtung	
Erdgas	338,8	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>338,8</b>
Strom-Mix	2,6	0,0	16,7	0,0	0,0	<b>19,3</b>

### Aufteilung Energiebedarf

[kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	Heizung	Warmwasser	Eingebaute Beleuchtung	Lüftung <sup>4)</sup>	Kühlung einschl. Befeuchtung	Gebäude insgesamt
Nutzenergie	224,6	0,0	16,7	0,0	0,0	<b>241,3</b>
Endenergie	341,4	0,0	16,7	0,0	0,0	<b>358,1</b>
Primärenergie	342,9	0,0	45,0	0,0	0,0	<b>387,9</b>

### Ersatzmaßnahmen<sup>3)</sup>

**Anforderungen nach § 7 Nr. 2 EEWärmeG**

Die um 15% verschärften Anforderungswerte sind eingehalten.

**Anforderungen nach § 7 Nr. 2 i. V. m. § 8 EEWärmeG**

Die Anforderungswerte der EnEV sind um  % verschärft.

Primärenergiebedarf

Verschärfter Anforderungswert  kWh/(m<sup>2</sup>·a)

Wärmeschutzanforderungen

Die verschärften Anforderungswerte sind eingehalten.

### Gebäudezonen

Nr.	Zone	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Anteil [%]
1	Klassenzimmer, Klassenzim	1.105	60
2	Flure, Treppenhäuser oder ä	621	34
3	Sanitäre Anlagen, Sanitärä	124	7

Weitere Zonen in Anlage

### Erläuterungen zum Berechnungsverfahren

Die Energieeinsparverordnung lässt für die Berechnung des Energiebedarfs in vielen Fällen neben dem Berechnungsverfahren alternative Vereinfachungen zu, die im Einzelfall zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Insbesondere wegen standardisierter Randbedingungen erlauben die angegebenen Werte keine Rückschlüsse auf den tatsächlichen Energieverbrauch. Die ausgewiesenen Bedarfswerte sind spezifische Werte nach der EnEV pro Quadratmeter beheizte/gekühlte Nettogrundfläche.

1) Freiwillige Angabe 2) bei Neubau sowie bei Modernisierung im Fall des § 16 Abs. 1 Satz 2 EnEV  
3) nur bei Neubau im Falle der Anwendung von § 7 Nr. 2 Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz 4) nur Hilfsenergiebedarf

Quelle: [Lindenborn 2010 10 13]

33

## 2.8 Historische Energie- und Betriebskosten

Für den Klassentrakt als einzelnes Gebäude liegen keine Energie- und sonstigen Betriebskosten vor. Deshalb muss auf Schätzungen zurückgegriffen werden.

### Schätzung 1:

Nach [BMU Antrag, o.J.], S. C-36, betragen die bisherigen verbrauchsgebundenen Kosten ca. 58.000 €/a. Es ist nicht klar, was in diesen Kosten inbegriffen ist: Handelt es sich nur um die Kosten für Raumwärme? Ist die Beleuchtung eingeschlossen?

### Schätzung 2:

Aus dem Energiebedarfsausweis (vergleiche Abbildung 19) ergibt sich ein Strombedarf für die Gebäudeinfrastruktur von  $19,3 \text{ kWh} / (\text{m}^2 \text{ a}) \times 1.850 \text{ m}^2 = 35.705 \text{ kWh} / \text{a}$ . Mit dem Strompreis von 17,7 ct / kWh<sup>2</sup> ergeben sich jährliche Stromkosten von ca. 6.320 €.

Bei einem Endenergiebedarf an Erdgas (Brennwert) von 338,8 kWh/(m<sup>2</sup> a) ergibt sich ein Gasbedarf von 376,6 kWh/(m<sup>2</sup> a) (unter Berücksichtigung der Übertragungsverluste). Daraus ergibt sich für das gesamte Gebäude ein Gasbedarf von 696.628 kWh/a. Mit dem Gaspreis von 0,054 €/kWh<sup>3</sup> ergeben sich Kosten von rund 37.600 € für Erdgas pro Jahr.

In der Summe ergeben sich bei dieser Betrachtungsweise für Strom und Gas historische Brennstoffkosten von ca. 43.940 € pro Jahr.

### Schätzung 3:

Die dritte Schätzung der Energiekosten beruht auf der in Kapitel 2.7.2 beschriebenen Bedarfskennzahl für Heizenergie von 148,1 kWh/ (m<sup>2</sup> a) laut [BMU Antrag, o.J.] S. C-29 mit der ebenfalls im BMU-Antrag verwendeten Fläche von 2.670 m<sup>2</sup>. Der Energiebedarf für Raumwärme wird mit 395.000 kWh/a angegeben. Dieses ergibt unter Berücksichtigung der Übertragungsverluste und des Kesselwirkungsgrades einen Gasverbrauch von 487.650 kWh/a (Brennwert). Die jährlichen Brennstoffkosten betragen somit  $487.650 \text{ kWh/a} \times 0,054 \text{ €/kWh} = 26.330 \text{ €/a}$ . Zusammen mit den in der zweiten Schätzung

<sup>2</sup> Der Strompreis im Jahr 2011 betrug 0,177 €/kWh (Rechnungssumme von 56.514,55 €, geteilt durch die bezogenen Strommenge von 318.947 kWh).

<sup>3</sup> Die Rechnungssumme (Rechnung für Dezember 2011) inkl. aller Abgaben und Steuern von €12.636 geteilt durch die bezogenen Gasmenge von 233.922 kWh ergibt einen Gaspreis von 5,4 Cent pro kWh (da der „Mess -/Abrechnungspreis“ von monatlich 23,61 € im Verhältnis sehr klein ist, wird hier vernachlässigt, dass er im Verhältnis zu dem Arbeitspreiskosten in den Sommermonaten einen größeren Anteil ausmacht)

ermittelten Stromkosten, betragen die historischen Gesamtkosten für Strom und Gas somit ca. 32.650 €/a.

## 2.9 Zusammenfassung und Bewertung des unmodernisierten Zustands

### 2.9.1 Wärmeschutz

Vor der Sanierung war die Außenhülle des Schulgebäudes als „energetisch schlecht“ zu bezeichnen. Zu den U-Werten liegen verschiedene Angaben der Planer vor. Diese sind in Tabelle 4 aufgeführt.

**Tabelle 4 Ausgangszustand: U-Werte der Bauteile**

Bauteil	U-Wert nach [Bestandsanalyse] in W/(m <sup>2</sup> K)	U-Wert nach [IBP o.J.], S. 65 in W/(m <sup>2</sup> K)
Flachdach, Rohdecke mit Korkdämmung, Putz	0,63	rechnerisch: 0,94 messtechnisch: 0,85
Außenwand (Gefach): Kalksandsteinwand mit Verklinkerung und Putz	1,13	rechnerisch: 0,91
Außenwand (Stützen) Tragende Betonkonstruktion mit Holzwohle-Leichtbauplatten und Putz	0,97	rechnerisch: 1,0 messtechnisch: 0,83
Außenwand (Heizungsnischen)	0,92	
Kellerdecke	0,96	
Sohlplatte	3,57	
Wand zum Erdreich	1,47	
Wand zum unbeheizten Raum	1,39	
Fenster	3,0 bis 4,7	2,5 -2,7

Die Außenwand war als ungedämmt zu bewerten, weil die ruhende Luftschicht keine ausreichende Dämmung darstellt und eine andere Dämmung nicht vorhanden war.

Bauphysikalische Probleme wie z.B. erhöhter Tauwasserausfall an den Wärmebrücken und in der Folge Schimmelbildung gab es nicht.

Sowohl die sommerliche Behaglichkeit (Überhitzung) als auch die winterliche Behaglichkeit (zu geringe Raumtemperaturen) für die Klassenräume des Ausgangszustands war als schlecht zu bezeichnen.

Der schlechte Wärmeschutz bewirkte einen hohen Energieverbrauch.

## 2.9.2 Heizung

Die Lage der Verteilleitungen in den Außenwänden (ungedämmt!) war als problematisch anzusehen. Die Raumtemperaturregelung durch veraltete Thermostatventile war nicht mehr zeitgemäß. Es fehlte zudem eine Regelung, die eine getrennte Beheizung nur einzelner Klassenräume ermöglichte. Dies schränkte die Nutzung stark ein bzw. führte zu übermäßigem Energieverbrauch.

Die im Ausgangszustand Anfang 2010 vorgefundene Versorgung mit Wärme aus einem Nahwärmeverbund auf der Basis von Erdgasbrennwertgeräten und Pflanzenöl war bereits verhältnismäßig gut. Allerdings war der Anteil fossiler Brennstoffe auf mittlere bis lange Sicht zu hoch: Es sollten noch mehr regenerative Brennstoffe eingesetzt werden.

## 2.9.3 Energieverbrauch und -kosten

Der Endenergieverbrauch für Heizung im Ausgangszustand, der im [BMU Antrag, o.J.] S. C-29 von den TGA-Planern ermittelt wurde, liegt mit 148 kWh/m<sup>2</sup>BGF pro Jahr deutlich höher als der durchschnittliche Verbrauch für Gymnasien, der in der einschlägigen Literatur mit 101 kWh/(m<sup>2</sup>BGF) pro Jahr angegeben wird [ages, 2007]. Noch deutlicher darüber liegt der nach DIN V 18599 berechnete Energiebedarf für Heizung, der mit 338,8 kWh/(m<sup>2</sup> a) angegeben wird, bzw. der in Schätzung 3 (siehe Schätzungen 1 bis 3 in Kapitel 2.8).

## 3 Modernisierter Zustand

### 3.1 Baubeschreibung und Nutzung

Die Grundrisse wurden mit nur geringen Änderungen beibehalten. Auch die Nutzung ist im modernisierten Zustand gleich wie die Nutzung im unmodernisierten Zustand.

Einzig bei den Kellerräumen gab es eine Änderung: Im modernisierten Zustand werden die Keller nicht mehr aktiv beheizt.

Nach [Göckel 2011 03 01] ergeben sich die folgenden nach DIN 277 berechneten Zahlen zu Flächen und Kubatur:

Gesamtfläche (Verkehrsfläche VF + Nutzfläche NF)                      2.154 m<sup>2</sup>

Gesamtvolumen umbauter Raum:    8.778 m<sup>3</sup>

### 3.2 Wärmeschutz

Die Tabelle 5 fasst die U-Werte der modernisierten Bauteile zusammen.

**Tabelle 5                      U-Werte der modernisierten Bauteile**

<b>Bauteil</b>	<b>U-Wert in W/(m<sup>2</sup>K)</b>
Flachdach	0,19
Außenwände	0,25 / 0,32
Außenwand (im Bereich ehemaliger Heizungs- nischen)	0,14
Kellerdecke	0,27 / 0,257 / 0,23
Sohlplatte	3,57
Wand zum Erdreich	0,28
Wand zum unbeheizten Raum	0,28
Fenster	1,1

Quelle: [Wärmeschutznachweis neu]

#### 3.2.1 Dach

Die alten Korkdämmplatten wurden entfernt. Stattdessen wurden zwei Lagen Dämmmaterial, Wärmeleitfähigkeit 035 W/(mK), d = 20 cm, aufgebracht.



**Abbildung 21** Modernisierter Zustand, Ansicht von Nordosten



### 3.2.3 Fenster und Außentüren

Die alten Fenster wurden durch hochdämmende 2+1-Fenster ersetzt. Diese bestehen aus Holz-Aluminiumprofilen und einer Dreifachverglasung. Innerhalb des Flügelrahmens wird zwischen der Isolierverglasung und dem äußeren, dritten Glas eine Verschattungsanlage geführt.

**Abbildung 22** Neues 3-Scheiben-Fenster mit integriertem Sonnenschutz



Die Glasbausteine wurden durch Fenster ersetzt. Der U-Wert der neuen Fenster wird mit  $1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  angegeben.

Vor die zwei Haupteingänge zu dem Klassentrakt wurde jeweils ein großzügiger Windfang gebaut.

**Abbildung 23** Modernisierungszustand: Neue Fenster



Quelle: [BMU Antrag, o.J.], Seite D-4

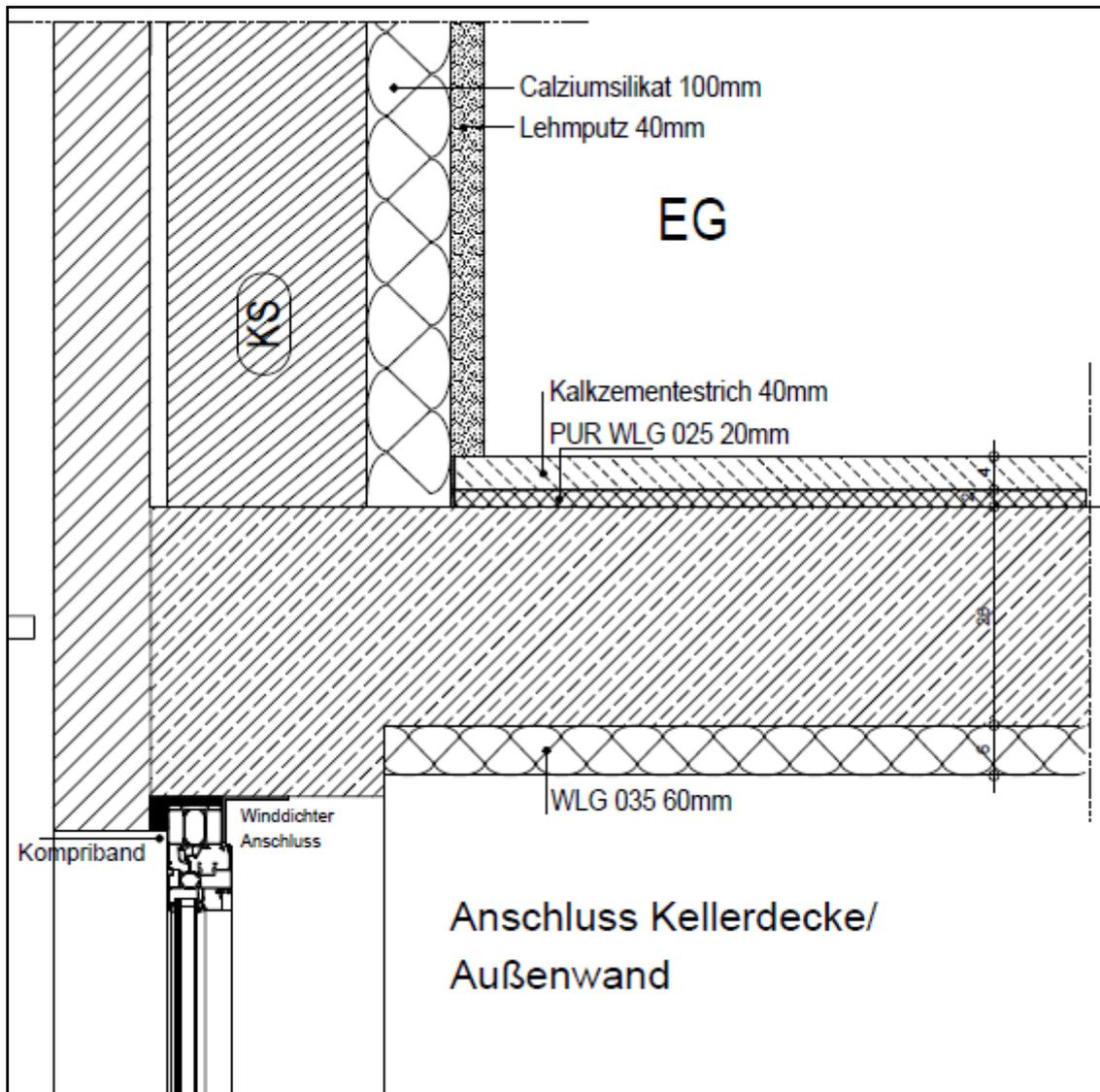
**Abbildung 24** Süd-West-Ansicht mit Windfängen und neuer Treppenhausverglasung



### 3.2.4 Kellerdecke

Auf der Oberseite der Kellerdecke wurde eine neue Wärmedämmschicht eingebaut (20 mm WL 025 W/(m K)), ebenso auf der Unterseite (60mm WL 035 W/(m K)).

Abbildung 25 Detail Anschluss Kellerdecke / Außenwand



Quelle: [Stephanswerk 2010]

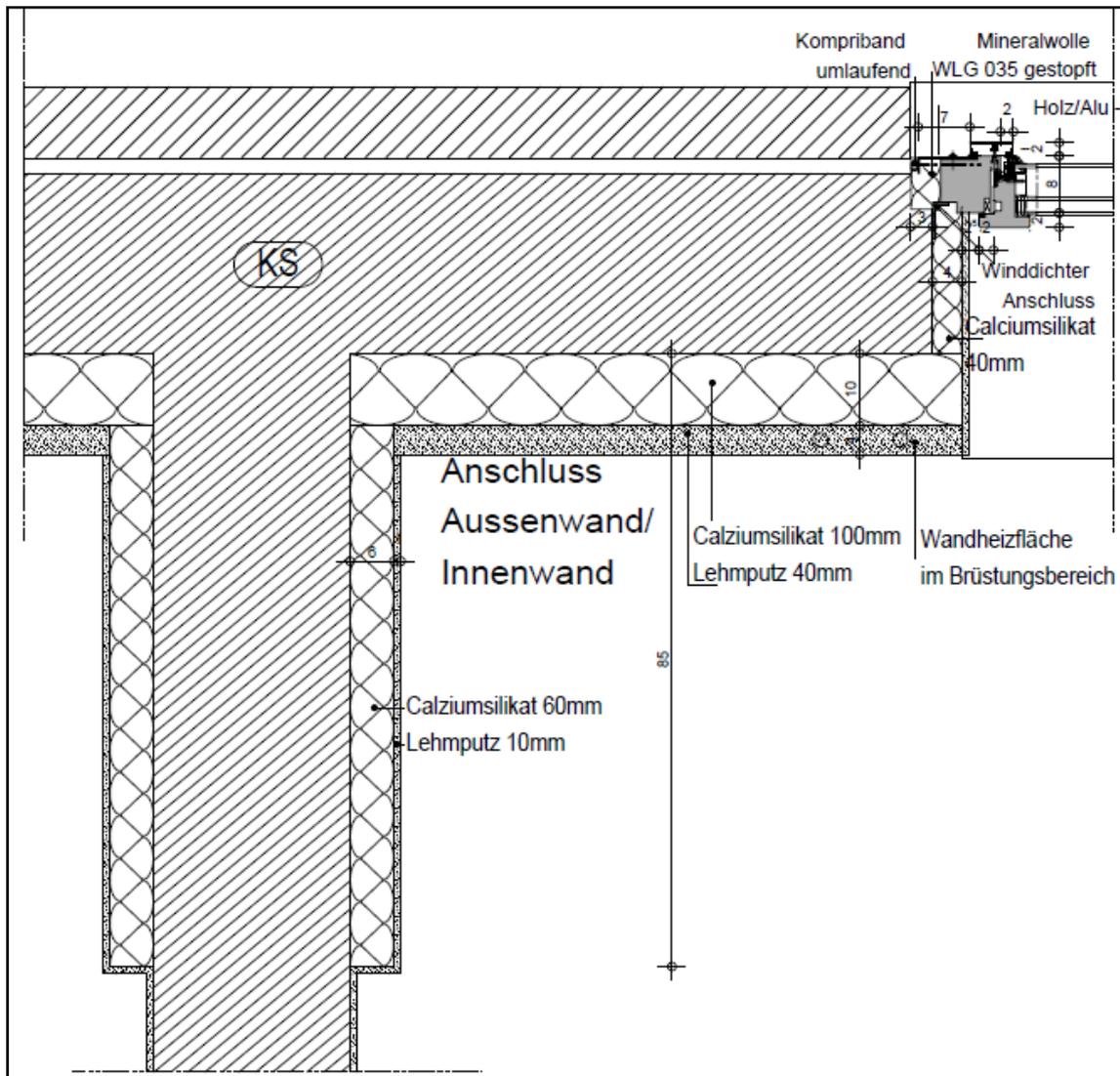
### 3.2.5 Wärmebrücken

Bei der Modernisierung wurde Wert darauf gelegt, vorhandene Wärmebrücken zu beseitigen.

1. An den Fensterlaibungen wurden 4 cm dicke Calciumsilikatplatten angebracht. [Stephanswerk 2010]

2. An den Geschossdecken wurde eine Deckendämmung parallel zu den Außenwänden in einer Tiefe von 75 cm angebracht. Die Dicke betrug 6 cm. [Stephanswerk 2010]
3. An den in die Außenwände einbindenden Innenwände wurde ebenfalls eine 6 cm dicke Wärmedämmung in einer Tiefe von 75 cm angebracht, siehe Abbildung 27. [Stephanswerk 2010]

Abbildung 26 Detail Anschluss Außenwand / Innenwand



Quelle: [Stephanswerk 2010]

Abbildung 27 Detail Anschluss Innenwand an Außenwand



### 3.3 Versorgung mit Heizenergie und Warmwasser

#### Wärmeerzeuger

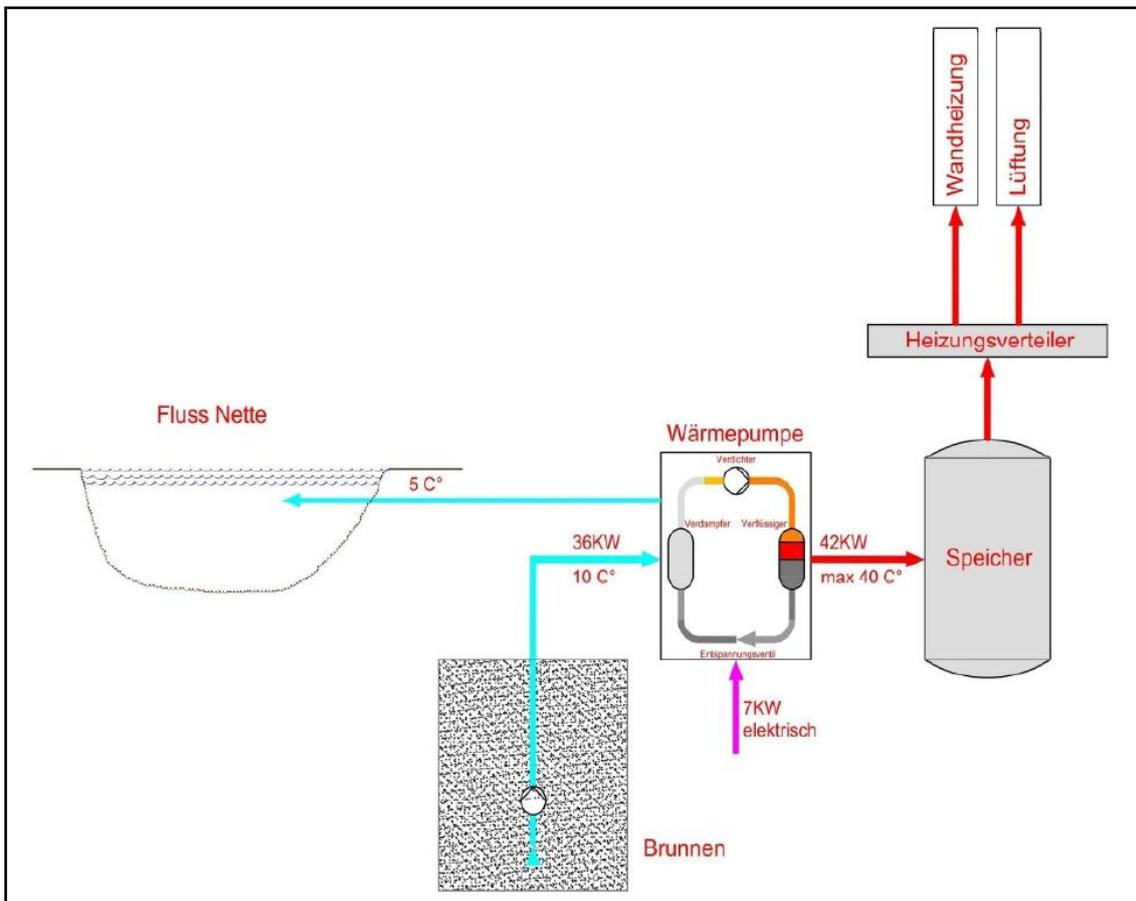
Im modernisierten Zustand soll die Beheizung des Klassentraktes vorrangig über eine Wärmerückgewinnung aus der Abluft sowie über eine Grundwasser-Wärmepumpe erfolgen. Nur für den Fall, dass diese Systeme bei bestimmten Witterungsverhältnissen oder Nutzungsbedingungen nicht ausreichen oder ausfallen, soll eine Wärmezufuhr über das bereits vorhandene Nahwärme-Heizsystem erfolgen. Ob dieses in der Praxis erreicht wird, ist Teil dieser Untersuchung.

#### *Wärmepumpe*

Bei der Wärmepumpenanlage handelt es sich um eine Wasser-Wasser-Wärmepumpe mit einer Leistung von ca. 44 kW. Auf der Primärseite (Kaltquellenseite) wird Wasser aus einem ca. 30 m tiefen Brunnen angesaugt. Die Grundwasserqualität im Bereich der Angelaschule wurde untersucht und als gut geeignet für eine Wasser-Wasser-Wärmepumpe beurteilt. Die durchschnittliche Grundwassertemperatur wird mit 10°C angegeben [Ostendorf 2010 10 20], siehe auch Abbildung 28. Nach dem Entzug von Wärme soll das entnommene Grundwasser mit einer Temperatur von ca. 5° C einem kleinen Bachlauf, der Nette, zugeführt werden.

Die Abbildung 28 zeigt eine Systemskizze der Wärmepumpenanlage.

Abbildung 28 Systemskizze Heizungsanlage, ohne Darstellung der Wärmerückgewinnung und ohne Darstellung des Redundanz- bzw. Ergänzungssystems Nahwärme



Quelle: [Angelaschule 2010 10 13]

### Abluft-Wärmerückgewinnung

Für die Wärmerückgewinnung aus der Abluft sind drei Anlagen vorgesehen.

### Ersatzsystem: Nahwärmeanschluss

Der vorhandene Nahwärmeanschluss des Wärmeverbundes mit der Thomas-Morus-Schule und dem Klostergebäude wurde nicht zurückgebaut. Er dient bei Ausfall der Wärmepumpe als Ersatzheizung.

### Wärmespeicherung

Es wurde ein Pufferspeicher von 2.500 l für die von der Wärmepumpe bereitgestellte Wärme installiert.

### **Wärmeverteilung**

Die Wärmeverteilung erfolgt über Umwälzpumpen, einerseits zu den Wandheizungen, andererseits zu den Lufterwärmern. Als Vorlauftemperatur ist im Normalfall 35° C vorgesehen, als Rücklauftemperatur 30° C. Es wurde eine drehzahlgeregelte Pumpe eingesetzt.

Die gut gedämmten horizontalen Verteilleitungen verlaufen unterhalb der Kellerdecke im unbeheizten Bereich. Die vertikale Verteilung erfolgt im beheizten Bereich. Die Verteilleitungen zu den Wandheizungen verlaufen raumseitig vor der gedämmten Wand.

### **Wärmeübergabe**

Die Wärmeübergabe erfolgt zum einen durch Wandheizungen, zum anderen durch Nachheizregister in den Lüftungsanlagen.

#### *Wandheizungen*

Außerhalb der Nutzungszeit (z.B. frühmorgens) wird zunächst Wärme durch die Wandheizung abgegeben. Hierfür sind Rohrleitungen („Heizschlangen“) unterhalb der Fenster in den Lehmputz der Außenwände eingearbeitet.

Die Wandheizungen (mit einer Fläche von jeweils ca. 8 m x 0,8m je Klassenraum) sind so ausgelegt, dass mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 40 °C eine Beheizung mit ca. 360 W je Klassenraum möglich ist, sie soll die folgenden zwei Funktionen erfüllen:

1. Erhöhung des Komforts an kalten Tagen unter 0°C Außentemperatur. Die einfallende Kältestrahlung durch das Fenster soll an kalten Außentagen über die Wandheizung kompensiert werden.
2. Falls die Räume in der kalten Jahreszeit unter 15°C abkühlen, findet in erster Sequenz die Beheizung über die Wandheizung statt. So wird auch elektrische Antriebsenergie am Lüftungsgerät eingespart.

Abbildung 29 Wandheizung vor dem Einputzen



Die Wandheizung erhält die Wärme von der Wärmepumpe (bzw. im Bedarfsfall vom Nahwärmesystem).

*Nachheizregister in der Zuluftzufuhr für jeden Klassenraum*

Für die Beheizung während der Nutzungszeit (nach der Aufheizphase) soll überwiegend die Abwärme der Schüler und der Beleuchtung verwendet werden. Bei einem durchschnittlichen Klassenraum von ca. 60 m<sup>2</sup> und 30 Schülern in einem gut gedämmten Gebäude ist zu erwarten, dass die Wärmeabgabe der Schüler und der künstlichen Beleuchtung zur Beheizung des Klassenraumes bis zu einer Außentemperatur von -5 C° ausreicht, wenn die Wandheizung die notwendigen 19 bis 20 C° zu Unterrichtsbeginn hergestellt hat.

Über drei Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung soll der Wärmeinhalt der „verbrauchten“ Luft zu ca. 90 % auf die Zuluft übertragen werden, die den Klassenräumen zugeführt wird. Während der Nutzungszeit soll daher keine weitere Heizenergie für den Klassentrakt benötigt werden. Näheres dazu siehe auch Kapitel 3.4.

Auch die Zuluft-Nacherhitzer werden über die Wärmepumpe gespeist (bzw. im Bedarfsfall über das Nahwärmesystem). Eine elektrische Nacherhitzung erfolgt nicht.

Die Leistung der Luftherwärmer wird mit jeweils 3,7 kW pro Klassenraum (bezogen auf 35 / 30° C) angegeben.

### *Regelungen*

Jeder Klassenraum erhielt ein Zonenventil. Damit ist eine individuelle Temperatursteuerung jedes einzelnen Klassenraums möglich. Auch ist es möglich, außerhalb der normalen Unterrichtsstunden einzelne Klassenräume getrennt zu beheizen.

### **Warmwasser**

Eine zentrale Warmwasserbereitung wurde nicht vorgesehen. Lediglich im Behinderten-WC und oberhalb der Ausgussbecken der Putzmittelräume gibt es dezentrale elektrische elektronisch geregelte Durchlauferhitzer, vgl. Abb. 31.

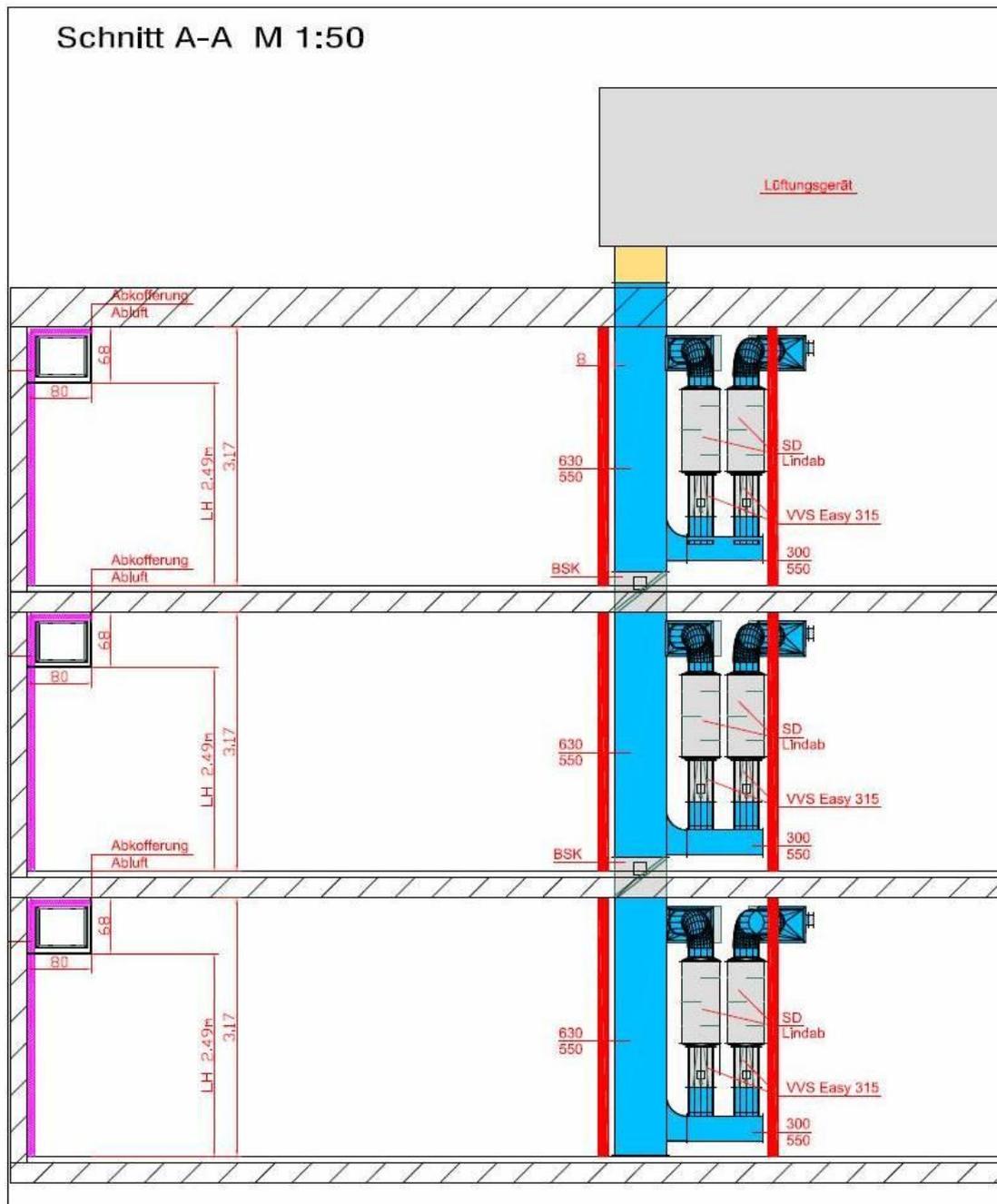
**Abbildung 30 Elektrischer Durchlauferhitzer in einem Putzmittelraum**



## 3.4 Lüftung und Luftqualität

Die Abbildung 31 zeigt einen Schnitt durch das Gebäude mit Darstellung der Lüftungsanlage.

Abbildung 31 Lage der Lüftung im Gebäude (Schnitt)



Quelle: [Ostendorf 2010 10 14]

Die Lüftung wurde folgendermaßen modernisiert:

1. Alle Klassenräume sowie die Sanitärräume werden über eine raumluftechnische Anlage (RLT) kontrolliert be- und entlüftet. Die Anlage wurde so dimensioniert, dass keine Stoßlüftung über die Fenster erforderlich ist. Um eine optimale Anpassung an die tatsächlichen Gegebenheiten (Belegung und Temperatur) zu er-

zielen, wurden alle Klassenräume mit einem CO<sub>2</sub>- und Raumtemperaturfühler ausgestattet. Ein Klassenraum wurde zusätzlich mit einem Feuchtefühler ausgestattet. Die Lüftungsanlage gestattet eine Anpassung der Luftmenge und der Luftkonditionierung an den Bedarf. Alles wird über eine Gebäudeleittechnik gesteuert. Die Luftmengen sind volumenvariabel. Die Luft wird den Räumen im Deckenbereich zugeführt. Zum Einsatz kommt eine Gruppenlüftungsanlage, die aus 3 Geräten für jeweils 6 Klassen besteht. Die Längen der Lüftungskanäle wurden durch die dezentrale Anordnung über je 6 Klassen minimiert. [Antrag BMU, o.J.], S. D-17.

**Abbildung 32** Lüftungskanal mit Zuluftauslass



2. Die Flure und Treppenhäuser werden über die Abluft aus den Klassenräumen „belüftet“ (Überstromöffnungen zwischen Klassenräumen und Fluren). Von den Fluren aus erfolgt eine Abströmung in das Treppenhaus. Dort wird direkt abgesaugt.

Abbildung 33 Überstromöffnung Klassenraum zum Flur



3. Sanitärräume: Diese erhielten aus hygienischen Gründen jeweils eine eigene Zu- und Abluftanlage. Diese ist jeweils mit einem Kreuzstromwärmetauscher ausgestattet.

Die ergänzende Beheizung der Klassenräume erfolgt über die Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Dabei wird ein Wärmerückgewinnungsgrad von 90 % erwartet. Jeder einzelne Raum hat einen Volumenstromregler und ein nachgeschaltetes Heizregister. Die Wärmeversorgung erfolgt durch die Wärmepumpe. Näheres dazu siehe unter Kapitel 3.3.

## 3.5 Beleuchtung

Die gesamte alte Beleuchtung wurde demontiert.

Aus wirtschaftlichen Gründen kommen in den 18 Klassenräumen sowie in den Fluren ausschließlich Leuchten mit Leuchtstofflampen in energieeffizienter T16- Technologie zum Einsatz. Die Leuchten in den Nebenräumen erhielten klassische T26- Leuchtstofflampen oder Kompaktleuchtstofflampen.

Im Bereich der Treppenläufe wurden schlagfeste runde Wannenleuchten mit T16-Ringlampen vorgesehen. Der Lampenwechsel soll in einem dreijährigen Rhythmus erfolgen.

Grundsätzlich werden in allen Leuchten elektronische Vorschaltgeräte eingesetzt.

Es werden folgende Wartungswerte (Mindestwerte) für die mittlere Beleuchtungsstärke erzielt:

Allgemeine Unterrichtsräume: 300 lx

Verkehrsflächen/ Flure: 100 lx

Treppenhäuser: 150 lx

Nebenträume, Untergeschoss: 100 lx

In den 18 allgemeinen Unterrichtsräumen sorgen Einbauleuchten mit hocheffizientem Silberraster (Reflexionsgrad > 98 %) und einem UGR-Blendwert <19 für eine energieeffiziente und blendfreie Beleuchtung. Diese wird abhängig vom einfallenden Tageslicht geregelt. Ein Sensor in der Mitte der Klasse misst die Helligkeit im Raum. Je nach Tageslichtanteil wird dann nur so viel künstliches Licht erzeugt, wie für das definierte Beleuchtungsniveau benötigt wird. Über den Präsenzmelder werden Bewegungen wahrgenommen und registriert. Ist keine Person anwesend, wird die Beleuchtung im Klassenraum automatisch nach einer voreingestellten Zeit wieder ausgeschaltet. Es soll also nur künstliches Licht geben, wenn es auch tatsächlich gebraucht wird.

Abbildung 34 Neue Klassenraumbelichtung mit hocheffizientem Spiegelraster und T 16-Lampen



Abbildung 35 Tafelbeleuchtung: Leuchtstofflampe mit speziellem Reflektor



Grundsätzlich gibt es aber nach wie vor auch einen klassischen Schalter für das manuelle Ein- und Ausschalten der Beleuchtung. Darunter ermöglicht ein zusätzlicher Taster (Wechsler mit Öffnerfunktion) den sogenannten Klausurbetrieb. Hiermit kann jederzeit das Umschalten in den unregelmäßigen Betrieb mit 100 % Lichtstrom erfolgen. Dieser Betriebszustand ist auf 60 Minuten begrenzt, kann aber jederzeit mit einfachem Tastendruck (< 5 sek.) erneut aktiviert werden. Im Klausurbetrieb ist die Anwesenheitserfassung deaktiviert. Nach Ablauf der Zeit - oder vorab durch längeren Tastendruck (>5

sek.) – kehrt die Beleuchtungsanlage wieder automatisch in den energiesparenden Regelbetrieb zurück.

Die Beleuchtung in den Flucht- und Rettungswegen sowie in den Nebenräumen ist mit Präsenzmeldern ausgestattet und auf ein definiertes Lichtniveau eingeregelt.

**Abbildung 36** Treppenhausbeleuchtung, Wandleuchte mit Leuchtstoff-Ringlampe



Die innerhalb des Flügelrahmens zwischen der Isolierverglasung und dem dritten, äußeren Glas geführte Verschattungsanlage soll gleichzeitig auch eine Lichtlenkfunktion übernehmen. Hiermit soll der Tageslichteintrag in die Klassenräume bei Bedarf erhöht werden, und eine Reduzierung des Energiebedarfs für die Beleuchtung um ca. 10 % erreicht werden.

Die Tabelle 6 gibt einen Überblick über die neue Beleuchtungsanlage.

Tabelle 6 Übersicht neue Beleuchtungsanlage

Beleuchtungsanlage	Hinweise	Anzahl	Summe Anschlussleistung
18 Klassenräume EG – 2.OG, Deckenbeleuchtung	Je Klassenraum 6 Leuchten, Leuchtstofflampe T26, 35 W, EVG	108	4,32 kW
18 Klassenräume EG – 2.OG, Tafelbeleuchtung	Je Klassenraum 1 Leuchte, Leuchtstofflampe T26, 80W, EVG	18	1,53 kW
Deckenleuchten Flure EG – 2.OG und Treppenhäuserbeleuchtung	Leuchtstofflampe T16, 28 W, EVG	36	1,19 kW
Treppenhäuser, Wandleuchten	Leuchtstofflampe T16, 55W, EVG	14	0,84 kW
Außenbeleuchtung	Kompaktleuchtstofflampe, 1x26W	6	0,19 kW
Untergeschoss, allgemeine Bereiche	Diverse Leuchtstofflampen T26, 36/58W, EVG	58	3,61 kW
Werk- und Maschinenraum	Diverse Leuchten T26, EVG	18	1,17 kW
WC	Diverse Leuchtstofflampen T26 EVG und Kompaktleuchtstofflampen	13	0,48 kW
<b>Summe</b>			<b>13,33 kW</b>

Quelle: [Richter 2011 01 24]

### 3.6 Energiebedarf lt. Energieausweis

Im modernisierten Zustand soll der Energiebedarf durch die Wärme des Grundwassers und durch Strom gedeckt werden. Nach dem Energiebedarfsausweis [Lindenborn 2010 09 09] besteht ein Endenergiebedarf an Strom von 31,3 kWh / (m<sup>2</sup> a) für Heizung, Lüftung und Beleuchtung. Für das gesamte Gebäude (im Energieausweis sind hier 1.850 m<sup>2</sup> angegeben) sind dies 1.850 m<sup>2</sup> x 31,3 kWh / (m<sup>2</sup> a), insgesamt ca. 60.000 kWh / a.

Gegenüber dem Energiebedarf vor der Sanierung beträgt dieser Wert nur noch 1/10, d.h., es soll eine Einsparung von 90 % erreicht werden. Die folgende Abbildung zeigt den Energiebedarfsausweis für den modernisierten Zustand.



### 3.7 Bau- und Baunebenkosten

Die Baukosten ohne Baunebenkosten, jedoch inkl. MWSt., beliefen sich auf ca. 2,24 Mio. €, die Baunebenkosten auf ca. 462.000 €. Es ergeben sich Modernisierungskosten von ca. 1.000 €/m<sup>2</sup> BGF. Diese Kosten sind nicht vollumfänglich einer energetischen Sanierung zu zurechnen; z.B. haben die in dieser Summe enthaltenen Außenanlagen gar nichts und die Verbesserung der Luftqualität nicht viel mit Energiekosteneinsparung zu tun. Auch sind große Kostenanteile durch Sanierungsarbeiten bedingt, die in jedem Fall gemacht werden mussten (z.B. Dichtungsarbeiten am Dach).

Die vom Bauherrn für den Förderantrag ermittelten Mehrkosten für die energetische Verbesserung, die die Kosten der Lüftungsanlage beinhalten, belaufen sich auf rund 1,33 Mio. €. (inkl. Baunebenkosten). Es wird hier zusätzlich angenommen, dass die Fenster, da sie am Ende Ihrer Lebensdauer waren, in jedem Fall ausgetauscht worden wären und deshalb die Kostenposition für den Ausbau der alten Fenster entfällt und hier lediglich der geschätzte Mehrpreis für die Dreifach- statt Zweifachverglasung (Annahme:  $\frac{1}{3}$ ) berücksichtigt wird. Mit diesen Annahmen ergeben sich energetisch relevante Baukosten von 1,18 Mio. Euro.

Ohne Lüftungsanlage betragen die Kosten rund 647 tausend Euro. Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der einzelnen Kostenkomponenten:

**Tabelle 7      Energetisch relevante Baukosten**

<b>Maßnahme</b>	<b>Baukosten inkl. MWSt. und 18% Baunebenkosten</b>
<b>Gebäudemaßnahmen</b>	
Dämmung der Kellerdecke	29.541 €
Innendämmung Außenwand	152.882 €
Dämmung der Geschossdecken	32.226 €
Dämmung + Estrich neu	53.135 €
Dachdämmung	48.952 €
Fenster austausch, Holz-Alu	73.799 €
Stahlkonstruktion für Windfanganlage	8.029 €
<b>Summe Gebäudemaßnahmen</b>	<b>398.565 €</b>
<b>Andere Maßnahmen</b>	
Heizung	69.982 €
Starkstromanlagen	127.782 €
Gebäudeautomation und Regelungstechnik	50.798 €
Lüftung	517.873 €
Unterkonstruktion für Lüftungsanlage	16.806 €
<b>Summe andere Maßnahmen</b>	<b>783.241 €</b>
<b>Gesamtsumme</b>	<b>1.181.806 €</b>
<b>Gesamtsumme, ohne Lüftungsanlage und Unterkonstruktion</b>	<b>647.127 €</b>

Auf den Quadratmeter Bruttogeschossfläche bezogen ergeben sich damit energetisch relevante Baukosten von rund 440 €/m<sup>2</sup> BGF mit Lüftungsanlage bzw. rund 240 €/m<sup>2</sup> BGF ohne Lüftungsanlage.

## 4 Untersuchungen zum sanierten Zustand

### 4.1 Strom- und Wärmeverbrauch

#### 4.1.1 Vorhandene Zähler, Messwerte und Ergebnisse

##### Stromzähler:

Um den Stromverbrauch erfassen und bewerten zu können, wurden die folgenden Stromzähler installiert:

- 1) Ein Stromzähler, der den gesamten Stromverbrauch des Klassentraktes erfasst,
- 2) Unterzähler für folgende Stromkreise:
  - a. Lüftungsanlagen (Summe der drei Verbrauchskomponenten Zentralgeräte, Ventilatoren, Nebenaggregate für jede der drei Lüftungsanlagen),
  - b. Wärmepumpe,
  - c. Heizung (Steuerung, Pumpen),
  - d. Heizung (nur Heizkreispumpe),
  - e. Heizkreispumpe der Fernleitung,
  - f. Beleuchtung und Steckdosen separat für jeden Klassenraum.

Nicht gemessene Stromverbraucher sind die Außenbeleuchtung, die Beleuchtung und Steckdosen in den Fluren (Reinigung), die beiden elektronisch geregelten Durchlauferhitzer zur Warmwasser-Bereitung und die WC-Lüftungsanlage. Außerdem sind aus Sicherheitsgründen im Keller zwei Frostwächter eingebaut. Im Keller befinden sich außerdem Geräte der Ski-AG.

Jeder dieser Stromzähler wurde in der Regel seit dem 24. Januar 2011 ein Mal pro Woche vom Hausmeister abgelesen<sup>4</sup>. Die Werte wurden notiert und für diese Auswertung zur Verfügung gestellt.

Da es erst seit dem 1. Februar 2011 für alle Zähler belastbare Messwerte gibt<sup>5</sup>, wird dieses Datum als Anfangswert verwendet.

---

<sup>4</sup> Ausgenommen Ferienzeiten

<sup>5</sup> Ein Grund hierfür ist, dass die Lüftungsanlage im Januar 2011 noch nicht störungsfrei lief

**Wärmemengenzähler:**

Die folgenden drei Wärmemengenzähler sind installiert:

- 1) Interner Wärmemengenzähler der Wärmepumpe,
- 2) Wärmemengenzähler der Nahwärme,
- 3) Wärmemengenzähler, welcher die gesamte zu verteilende Wärmemenge misst.

## 4.1.2 Messwerte und Ergebnisse

**Strom:**

In den folgenden 2 Tabellen werden die Zählerstände für das Anfangsdatum 01.02.2011 nach einem Jahr, am 30. Januar 2012, nach zwei Jahren am 30. Januar, sowie die Differenzen (Stromverbräuche in den zwei Jahren) gezeigt:

Tabelle 8 Strom-Zählerstände und Verbrauch

	Zählerstand am 01.02.2011	Zählerstand am 30.01.2012	Zählerstand am 30.01.2013	Stromverbrauch, Jahr 1	Stromverbrauch, Jahr 2	Stromverbrauch, Durchschnitt Jahr 1 und 2
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Lüftungsgerät 1	7	4.259	8.158	4.252	3.899	4.076
Lüftungsgerät 2	10	3.700	7.285	3.690	3.585	3.638
Lüftungsgerät 3	10	4.056	7.981	4.046	3.925	3.986
Lüftungsgeräte (Summe)				<b>11.988</b>	<b>11.409</b>	<b>11.699</b>
Wärmepumpe <sup>6</sup>	4.406	19.946	34.897	15.540	14.951	15.246
Heizung (Pumpen, Steuerung)	1.166	2.379	3.446	<b>1.213</b>	<b>1.067</b>	<b>1.140</b>
Heizung (Heizkreis- pumpe)	520	1.025	1.354	<b>505</b>	<b>329</b>	<b>417</b>
Nahwärme (Heiz- kreispumpe) <sup>7</sup>	1.521	1.628	1.754	<b>107</b>	<b>126</b>	<b>117</b>
Klassenzimmer (sie- he separate Tabelle)				<b>3.372</b>	<b>3.500</b>	<b>3.436</b>
<b>Summe, alle Zähler</b>				<b>32.725</b>	<b>31.382</b>	<b>32.054</b>
<b>Zähler, gesamter Klassentrakt</b>	19.967	64.997	109.234	<b>45.030</b>	<b>44.237</b>	<b>44.634</b>

<sup>6</sup> Für den Zeitraum bis zum 10. Oktober 2011 wurden nur unvollständige Zählerstände übermittelt. Fehlende Verbrauchswerte wurden unter Heranziehen der mittleren Leistungszahl der Wärmepumpe im Zeitraum 10. Oktober 2011 bis 12.03.2012 berechnet.

<sup>7</sup> Der Stromzähler befindet sich im Heizungsraum des Klostergebäudes, ist aber an die Gebäudeleittechnik angeschlossen und wurde vom Hausmeister regelmäßig mit abgelesen.

Tabelle 9 Strom-Zählerstände und Verbrauch Klassenräume

Klassenraum	Zählerstand am 01.02.2011	Zählerstand am 30.01.2012	Zählerstand am 30.01.2013	Stromverbrauch, Jahr 1	Stromverbrauch, Jahr 2	Stromverbrauch, Durchschnitt Jahr 1 und 2
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
K001	67	296	517	228	221	225
K002	141	380	631	266	251	258
K003	68	243	414	175	171	173
K004	80	226	368	146	142	144
K005	83	337	579	254	242	248
K006	69	256	425	187	169	178
K101	69	222	423	153	202	177
K102	71	307	555	236	248	242
K103	70	236	398	166	162	164
K104	72	223	392	150	169	160
K105 <sup>b</sup>	-57	160	413	217	253	235
K106	87	276	477	189	201	195
K201	61	199	348	138	149	143
K202	69	281	529	213	248	230
K203	58	203	358	145	155	150
K204	59	190	335	131	145	138
K205	74	280	489	207	209	208
K206	75	248	412	173	164	168

Auffallend ist die große Differenz zwischen dem Stromverbrauch des gesamten Klassentraktes von 45.030 kWh im Messzeitraum und der Summe der einzelnen gemessenen Verbraucher von 32.725 kWh (siehe Tabelle 8). Da diese Differenz von 12.300 bzw. 12.800 kWh für das zweite Jahr der Messungen für die übrigen, nicht einzeln erfassten Verbraucher sehr groß erscheint, wurde anhand der Zwischenstände der Zähler geprüft, ob die Differenz jahreszeitlich schwankt. Dieses ist nicht der Fall. Als Stromverbraucher mit dem vermutlich größten Stromverbrauch, der nicht über einen einzelnen Zähler

<sup>b</sup> Der Zählerstand im Raum K105 stand laut den übermittelten Ablesedaten für einen Monat nicht zur Verfügung. Es wurde dann ein neuer Zähler eingebaut. Für die fehlenden Messwerte wurde angenommen, dass der Stromverbrauch im Raum K105 dem Mittelwert der anderen Klassenräume entsprach (deshalb der negative Wert für den Zählerstand am 1.2.2011).

erfasst wird, wurde die Lüftungsanlage für die WCs identifiziert. Die Lüftungsanlage besitzt ein zusätzliches Heizregister mit 6 kW Leistung. Die Lüftungsanlage wurde bis Mitte März 2013 von 7:30h bis 18:00h betrieben. Es wird geschätzt, dass der jährliche Stromverbrauch dieser Anlage bisher rund 2.000 kWh betrug. Die verbleibenden, nicht separat gemessenen rund 10.000 Kilowattstunden pro Jahr müssen demnach aus den oben erwähnten Nutzungen resultieren (Heizbetrieb der WC-Lüftungsanlage, Außenbeleuchtung, Beleuchtung und Steckdosen in den Fluren (Reinigung), elektronisch geregelte Durchlauferhitzer zur Warmwasser-Bereitung, Frostwächter im Keller und Geräte der Ski-AG).

**Wärme:**

Da die Messwerte des in der Wärmepumpe integrierten Wärmemengenzählers durchgehend zu hoch erscheinen<sup>9</sup>, wurde zur Ermittlung der von der Wärmepumpe bereitgestellten Wärme die Wärmemenge der Nahwärmeleitung (Zähler 2) von der Gesamtwärmemenge (Zähler 3) abgezogen.

Da in dieser Wärmemenge auch die Verluste des Pufferspeichers enthalten sind, wird in diesem Bericht der Begriff „Wärmemenge des Wärmepumpensystems“ verwendet<sup>10</sup>.

**Tabelle 10 Wärmemengen-Zählerstände und Wärmeverbrauch Klassentrakt**

	Zählerstand am 01.02.2011	Zählerstand am 30.01.2012	Zählerstand am 30.01.2013	Wärmeverbrauch, Jahr 1	Wärmeverbrauch, Jahr 2	Wärmeverbrauch, Durchschnitt Jahr 1 und 2
	[MWh]					
<b>Heizenergie</b>	54,3	134,9	211,0	<b>80,6</b>	<b>76,1</b>	<b>78,4</b>
<b>Fernleitung</b>	2,1	7,9	13,9	<b>5,8</b>	<b>6,0</b>	<b>5,9</b>
<b>Wärmepumpen-System</b>				<b>74,8</b>	<b>70,1</b>	<b>72,5</b>

<sup>9</sup> Über den Messzeitraum 1.2.2011 bis 30.1.2012 wurden von diesem Zähler knapp 80 MWh gemessen, während die Differenz des Wärmemengenzählers, welcher die Gesamtwärmemenge misst und der Wärmemenge der Fernleitung nur knapp 75 MWh betrug.

<sup>10</sup> Die Verluste des Pufferspeichers sind wegen der geringen Temperaturdifferenz vom Wasser (maximal 40 °C) zur Umgebung allerdings sehr gering.

Zur Wärmemenge, die über die Nahwärmeleitung bezogen wurde, muss berücksichtigt werden, dass diese in erster Linie auf Ausfälle der Wärmepumpe zurückzuführen ist. Im ersten Messzeitraum wurden in der Woche bis zum 6. April 2011 mit 3,0 MWh rund 50% und in der Woche bis zum 10. Dezember 2011 mit 2,1 MWh rund 36% der über das Jahr gemessenen Wärmemenge aus der Nahwärmeleitung benötigt. Hätte es diese beiden Ausfälle nicht gegeben, hätte es statt der 5,8 MWh nur einen Bedarf von 0,7 MWh von der Nahwärme gegeben.

Im zweiten Messzeitraum lassen sich aus den Messwerten Rückschlüsse über vermutlich drei Ausfälle der Wärmepumpe ziehen: In den Wochen jeweils vor dem 20. Februar 2011, dem 2. Januar 2013 und dem 21. Januar 2012 wurden 2,3 MWh, 1,0 MWh bzw. 1,9 MWh benötigt. Diese Wärmemengen entsprechen zusammen rund 87% der Wärmemenge, die über den zweiten Messzeitraum vom Nahwärmesystem geliefert worden sind. Ohne diese vermutlichen drei Ausfälle hätte es statt der 6,0 MWh nur einen Bedarf von 0,8 MWh von der Nahwärme gegeben.

Mit den Werten der erzeugten Wärmeerzeugung und des Stromverbrauchs lässt sich die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe für die beiden Messzeiträume ermitteln:

**Tabelle 11      Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe**

	<b>Jahr 1</b>	<b>Jahr 1</b>	<b>Durchschnitt Jahr 1 und 2</b>
<b>Wärmepumpe: Wärmebereitstellung [MWh]</b>	74,80	70,10	72,5
<b>Wärmepumpe: Stromverbrauch [MWh]</b>	15,54	14,95	15,2
<b>Jahresarbeitszahl</b>	<b>4,81</b>	<b>4,69</b>	<b>4,75</b>

### 4.1.3 Zusammenfassung

Die folgende Tabelle zeigt eine Zusammenfassung des Strom- und Wärmeverbrauches im Messzeitraum vom 1. Februar 2011 bis zum 30. Januar 2012:

Tabelle 12 Zusammenfassung Strom und Wärmeverbrauch

	Strom- oder Wärmeverbrauch im Messzeitraum 01.02.2011 bis 30.01.2012	Strom- oder Wärmeverbrauch im Messzeitraum 01.02.2012 bis 30.01.2013	Strom- oder Wärmeverbrauch, Durchschnitt Jahr 1 und 2
	[kWh]		
Lüftungsanlagen (Strom)	11.988	11.409	11.699
Wärmepumpe (Strom)	15.540	14.951	15.246
Heizung (alle Pumpen, Steuerung, Strom)	1.825	1.522	1.674
Klassenzimmer (Strom)	3.372	3.500	3.436
Flurbeleuchtung, elektr. Warmwasserbereitung, andere nicht separat erfasste Verbraucher (Strom)	12.305	12.855	12.580
<b>Summe, Strom</b>	<b>45.030</b>	<b>44.237</b>	<b>44.634</b>
<b>Nahwärme (Wärme)</b>	<b>5.800</b>	<b>6.000</b>	<b>5.900</b>

#### 4.1.4 Witterungseinfluss

Um den Witterungseinfluss der beiden Betrachtungszeiträume (Februar 2011 bis Januar 2012 sowie Februar 2012 bis Januar 2013) herauszurechnen und damit einen Vergleich zu den Bedarfswerten (siehe Kapitel 3.6) zu ermöglichen, müssen die Klimafaktoren des Deutschen Wetterdienstes verwendet werden. Dieses Verfahren ist das für Energieausweise rechtlich verbindliche Verfahren zur Witterungsbereinigung. Die Klimafaktoren werden für 8233 Postleitzahlen und 12-Monats-Zeiträume vom Deutschen Wetterdienst im Internet veröffentlicht, siehe [DWD 2012]. Der Klimafaktor für den Betrachtungszeitraum und die Postleitzahl der Angelaschule (49090) ist 1,23 für den Zeitraum Februar 2011 bis Januar 2012 sowie 1,09 für den Zeitraum Februar 2012 bis Januar 2013.

Die mit diesem Faktor vorgenommenen Witterungsbereinigungen (der für die Raumwärmegewinnung relevanten Verbräuche) ist in der nächsten Tabelle zu sehen. Es wird angenommen, dass die Lüftungsanlage temperaturunabhängig arbeitet, der Strombedarf dieser Anlage wird also nicht witterungsbereinigt. Bei den Heizungspumpen und Steuerungen wird vereinfachend angenommen, dass sich der Stromverbrauch proportional zum Wärmebedarf verhält und dementsprechend auch witterungsbereinigt wird.

Tabelle 13 Witterungsbereinigte Strom- und Wärmeverbrauche

	Strom- oder Wärmeverbrauch im Messzeitraum 1	Strom- oder Wärmeverbrauch im Messzeitraum 2	Witterungsbereinigter Strom- oder Wärmeverbrauch im Messzeitraum 1	Witterungsbereinigter Strom- oder Wärmeverbrauch im Messzeitraum 2	Witterungsbereinigter Strom- oder Wärmeverbrauch Durchschnitt Jahr 1 und 2
	[kWh]				
Lüftungsanlagen (Strom)	11.988	11.409	11.988	11.409	11.699
Wärmepumpe (Strom)	15.540	14.951	19.114	18.297	17.705
Heizung (alle Pumpen, Steuerung, Strom)	1.825	1.522	2.245	1.659	1.952
Klassenzimmer (Strom)	3.372	3.500	3.372	3.500	3.436
Flurbeleuchtung, elektr. Warmwasserbereitung, andere nicht separat erfasste Verbraucher (Strom)	12.305	12.855	12.305	12.855	12.580
<b>Summe, Strom</b>	45.030	44.237	49.024	45.720	47.372
<b>Nahwärme (Wärme)</b>	5.800	6.000	7.134	6.540	6.837
<b>Summe, witterungsbereinigte Endenergie</b>			56.158	52.260	54.209

#### 4.1.5 Primärenergieverbrauch

Um die Vergleichbarkeit mit den für den unsanierten Gebäudezustand ermittelten Werten zu gewährleisten, erfolgte die Berechnung des Primärenergieverbrauchs mit denselben Umrechnungsfaktoren wie in Tabelle 3 (für Strom ist der Umrechnungsfaktor mittlerweile in der aktuellen EnEV auf 2,6 angepasst worden).

Die Endenergie der Wärme (siehe Tabelle 13) wurde für die spätere Ermittlung der Kosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen zunächst in den witterungsbereinigten Gasverbrauch (Brennwert) umgerechnet, wobei angenommen wird, dass der Gas-Brennwertkessel einen Wirkungsgrad von 90% hat und zwischen der Heizzentrale und dem Klassentrakt Übertragungsverluste von rund 10% auftreten<sup>11</sup>.

<sup>11</sup> Das ebenfalls vorhandene BHKW war in den beiden Messzeiträumen aus ökonomischen Gründen nicht in Betrieb

Tabelle 14 Witterungsbereinigter Primärenergieverbrauch nach Energieträgern

	Witterungsbereinigter Endenergiebedarf bzw. bei Nahwärme: Gasbedarf (Brennwert)		Umrechnungsfaktor Endenergie in Primärenergie bzw. Gas (Brennwert) in Primärenergie	Witterungsbereinigter Primärenergiebedarf		
	Jahr 1	Jahr 2		Jahr 1	Jahr 2	Durchschnitt Jahr 1 und Jahr 2
	[kWh]	[kWh]		[kWh]	[kWh]	[kWh]
Lüftungsanlagen (Strom)	11.988	11.409	2,70	32.368	30.804	31.586
Wärmepumpe (Strom)	19.114	16.297	2,70	51.608	44.001	47.805
Heizung (alle Pumpen, Steuerung, Strom)	2.245	1.659	2,70	6.061	4.479	5.270
Klassenzimmer (Strom)	3.372	3.500	2,70	9.104	9.451	9.278
Flurbeleuchtung, elektr. Warmwasserbereitung, andere nicht separat erfasste Verbraucher (Strom)	12.305	12.855	2,70	33.224	34.708	33.966
<b>Summe, Stromverbrauch</b>	<b>49.024</b>	<b>45.720</b>	<b>2,70</b>	<b>132.365</b>	<b>123.443</b>	<b>127.904</b>
Gasbedarf (für Nahwärme)	8.807	8.074	0,99 <sup>12</sup>	8.728	8.001	8.365
<b>Summe (Gesamt)</b>	<b>57.831</b>	<b>53.794</b>		<b>141.093</b>	<b>131.444</b>	<b>136.268</b>

## 4.2 Vergleich des Energieverbrauchs mit Referenzobjekten

Der Endenergieverbrauch von durchschnittlich 54.209 kWh pro Jahr, ergibt bei einer Netto-Geschossfläche von 1.850 m<sup>2</sup> einen spezifischen Endenergieverbrauch von ca. 29 kWh/(m<sup>2</sup> a).

<sup>12</sup> Der Faktor beinhaltet den Faktor zur Umrechnung von Brennwert zum Heizwert (0,9) sowie Umwandlungsverluste des Kessels und Transportverluste der Nahwärmeleitung. Er ist also nicht mit dem Primärenergiefaktor gleichzusetzen. Das resultierende Verhältnis von Primär- zu Endenergie beträgt rund 1,22. Dies ist geringer als der in der derzeitigen EnEV für Nahwärme vorgesehene Primärenergiefaktor (1,3), da die vorhandene Nahwärmeleitung sehr kurz ist.

Mit Hilfe des Förderprogramms „Energieeffizient Sanieren – Kommunen“ der KfW, wurden seit 2007 zahlreiche Schulen energetisch saniert. Laut der Evaluation des Förderprogrammes<sup>13</sup> erreichten die im Förderjahr 2010 sanierten Schulen dabei im Mittel einen spezifischen Endenergiebedarf von 164 kWh/(m<sup>2</sup> a) (Mittelwert von 79 Schulen<sup>14</sup>). Damit liegen die hier abgeschätzten Werte für den Klassentrakt der Angelaschule bei 18% der Durchschnittswerte der mit dem Förderprogramm „Energieeffizient Sanieren – Kommunen“ geförderten Schulgebäude, bzw. 82% darunter.

Bei diesem Vergleich muss allerdings berücksichtigt werden, dass es sich bei den für das Förderprogramm ausgewerteten Daten um rechnerische Energiebedarfe handelt, von denen die tatsächlichen Verbräuche abweichen können. Auch ist die Nutzungsart nicht notwendigerweise identisch, da im Gegensatz zu der Sanierung der Angelaschule nicht nur ein Klassentrakt betroffen sein kann, sondern auch Gebäude mit anderer Nutzung (z.B. Sporthallen, andere Fachräume). Wegen des sehr großen Unterschiedes des Energieverbrauchs des Klassentraktes der Angelaschule und dem durchschnittlichen Energiebedarf der anderen sanierten Schulen (29 vs. 164 kWh/(m<sup>2</sup> a) ) kann trotz dieser Einschränkungen die Aussage getroffen werden, dass der spezifische Energieverbrauch des sanierten Klassentraktes der Angelaschule erheblich unter dem Energiebedarf der Schulgebäude liegt, die mit Hilfe des Förderprogramms „Energieeffizient Sanieren – Kommunen“ der KfW im Förderjahr 2010 saniert wurden.

### 4.3 Abschätzung des Anteils von einzelner Maßnahmen an der Energieeinsparung

Um abzuschätzen, welchen Anteil einzelne Maßnahmen an der Gesamtenergieeinsparung haben, wurde vom Büro für Tragwerksplanung und Bauphysik (Dipl.- Ing. Martin Lindenborn) der Energiebedarf nach DIN V 18599 für einige Modernisierungsvarianten berechnet. Bei diesen Varianten wurde das Gebäude neu berechnet, wobei unterschiedliche Komponenten der Modernisierung variiert wurden (z.B. Verbleib der alten Fenster statt neuer Fenster, Berechnung ohne Lüftungsanlage). Die daraus resultierenden Ergebnisse wurden dann mit den Ergebnissen der Berechnung der tatsächlich verwirklichten Maßnahmen verglichen. Die folgenden Varianten wurden berechnet:

---

<sup>13</sup> „Evaluation der KfW-Programme „KfW-Kommunalkredit – Energetische Gebäudesanierung“, „Energieeffizient Sanieren – Kommunen“ und „Sozial investieren – Energetische Gebäudesanierung“ der Jahre 2007 bis 2010“.

<sup>14</sup> Der kleinste Wert liegt bei 23 kWh/(m<sup>2</sup> \* a), der größte bei 588 kWh/(m<sup>2</sup> \* a)

**Tabelle 15 Varianten zur Abschätzung des Anteils von einzelnen Maßnahmen an der Energieeinsparung**

Variante 1	modernisierter Zustand (Annahme: die Wärme wird vollständig durch die Wärmepumpe bereitgestellt)
Variante 2	modernisierter Zustand, jedoch statt Dämmung der Außenwände von innen neue Dämmung der Außenwände von außen mit Wärmedämmverbundsystem (12 cm, Wärmeleitwert: 0,042 (W/m K) ) <sup>15</sup>
Variante 3	modernisierter Zustand, jedoch ohne Außenwanddämmung
Variante 4	modernisierter Zustand, jedoch ohne neue Dachdämmung
Variante 5	modernisierter Zustand, jedoch ohne neue Fenster und ohne Verbesserung der Luftdichtheit
Variante 6	modernisierter Zustand, jedoch ohne Lüftungsanlage, ohne Wärmerückgewinnung und ohne hohe Dichtigkeit der Gebäudehülle
Variante 7	modernisierter Zustand, jedoch ohne Lüftungsanlage, ohne Wärmerückgewinnung aber mit hoher Dichtigkeit der Gebäudehülle

Die (Primär-) Energieeinsparung, die aus dem Wechsel der Wärmeerzeugung von der Nahwärme zur Wärmepumpe resultiert, wird durch einen Vergleich der beiden folgenden Varianten abgeschätzt:

Variante A: unmodernisierter Zustand (alle Angaben aus dem Energieausweis, der für den unmodernisierten Zustand ausgestellt wurde, siehe Abbildung 19)

Variante B: unmodernisierter Zustand, jedoch mit einer Wärmeenergieversorgung durch eine Wärmepumpe (Annahme: Jahresarbeitszahl wie in den oben berechneten Varianten)

Die folgende Tabelle zeigt die End- und Primärenergiebedarfe dieser Varianten.

**Tabelle 16 Gegenüberstellung von End- und Primärenergiebedarfen verschiedener theoretischer Sanierungsvarianten<sup>16</sup>**

Variante	1	2	3	4	5	6	7	A	B
	[MWh/a]								
Endenergiebedarf	57,5	56,6	82,0	60,7	114,2	70,1	58,5	662,5	125,8
Primärenergiebedarf	155,1	152,7	221,4	163,8	308,3	189,3	157,9	717,6	339,8

<sup>15</sup> Es hätte auch ein noch stärker dämmender Baustoff gewählt werden können mit entsprechend höherer Dämmwirkung

<sup>16</sup> Wärmeversorgung: bis auf Variante A jeweils mit Wärmepumpe

Bei der Abschätzung des Anteils der einzelner Maßnahmen an der Gesamtenergieeinsparung ist es wichtig zu beachten, dass sowohl Maßnahmen auf der Gebäudeseite als auch bei der Wärmebereitstellung umgesetzt wurden. Die Ergebnisse beider Maßnahme-Arten sind voneinander abhängig. Zum Beispiel ist die Verringerung des Primärenergiebedarfes durch die Dachisolierung, wenn davon ausgegangen wird, dass die Wärme durch eine Wärmepumpe bereitgestellt wird, kleiner als wenn die Wärme nach wie vor von dem Nahwärmesystem bereitgestellt werden würde. Umgekehrt bewirkt eine ausschließliche Verbesserung auf der Seite der Wärmeerzeugung eine größere nur auf diese Maßnahme zurückführbare Verringerung des Energiebedarfes, als wenn gleichzeitig die Gebäudehülle verbessert wird.

Mit den berechneten Energiebedarfen der verschiedenen theoretischen Sanierungsvarianten, die sich alle auf eine Wärmeversorgung mit einer Wärmepumpe beziehen, lassen sich die Energieeinsparungen der einzelnen Gebäudemaßnahmen wie folgt abschätzen:

**Tabelle 17      Abschätzung der Energieeinsparung durch verschiedene theoretische Maßnahmen an der Gebäudehülle<sup>17</sup>**

	Endenergiebedarf	Primärenergiebedarf
	[MWh/a]	
Innen- statt Außendämmung	- 0,9	- 2,4
Wanddämmung	25	66
Dachdämmung	3	9
Fenster, Türen, Dichtheit	57	153
Lüftungsanlage <b>mit</b> Dichtigkeitsnachweis	13	34
Lüftungsanlage ohne Dichtigkeitsnachweis	1	3

Der Vergleich der Variante A mit B zeigt, dass die Umstellung der Wärmeversorgung vom Nahwärmesystem auf eine Wärmepumpe (ohne Maßnahmen an der Gebäudehülle) zu End- bzw. Primärenergieeinsparungen von 537 bzw. 378 MWh/a geführt hätte.

Hier muss jedoch berücksichtigt werden, dass auch dieses Ergebnis ein sehr theoretisches ist, da die Wärmepumpe nur mit niedrigen Vorlauftemperaturen eine gute Jahresarbeitszahl erreicht. In dem Gebäude des Klassentraktes konnte eine niedrige Vor-

---

<sup>17</sup> Annahme: Wärmeerzeugung mit Wärmepumpe

lauftemperatur nur mit Dämmmaßnahmen und großen Wärmeübergabeflächen (Wandheizung) verwirklicht werden.

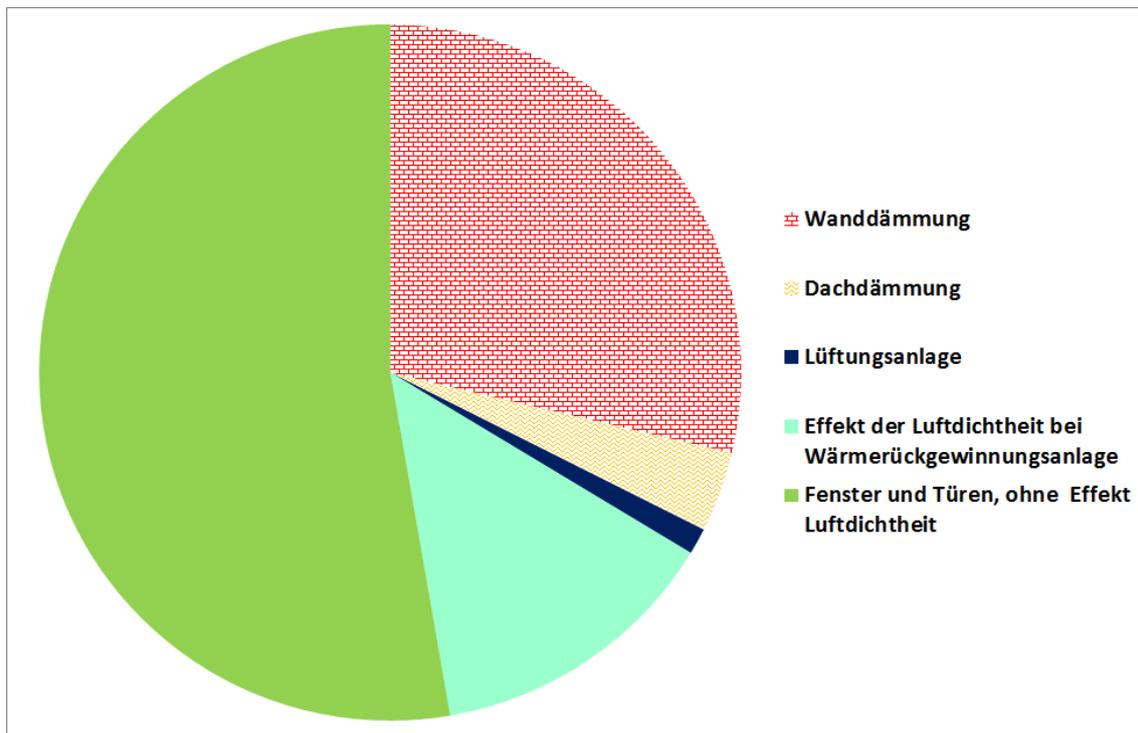
Die Ergebnisse zeigen, dass mit einer Außendämmung (Wärmedämm-Verbundsystem) geringfügig höhere End- bzw. Primärenergieeinsparungen zu erzielen gewesen wären, als mit der gewählten Innendämmung (0,9 bzw. 2,4 MWh/a). Außerdem zeigt die Tabelle, dass der Großteil der Einsparungen durch Verbesserungen der Gebäudehülle aus dem Austausch der Fenster und Türen resultiert (57 bzw. 153 MWh/a). Hier ist zu beachten, dass in dieser Rechnung auch der Anteil, der aus der Abdichtung des Gebäudes resultiert, enthalten ist. Dieser Anteil lässt sich aus den Ergebnissen der beiden Berechnungen, die mit unterschiedlichen Varianten der Lüftungsanlage (mit bzw. ohne Dichtigkeitsnachweis) durchgeführt wurden, mit rund 12 bzw. 31 MWh/a abschätzen.

Die Energieeinsparung, die aus der Dachisolierung resultiert, erscheint mit 3 bzw. 9 MWh/a sehr gering. Sie ist dadurch erklärbar, dass das Dach vor der Sanierung mit einer Korkisolierung ausgestattet war, die mit relativ guten Werten in die Berechnung eingegangen ist. In der Praxis war diese Isolierung jedoch wegen dem undichten Dach durchgefuechtet und somit deutlich schlechter als es die Ergebnisse der Berechnung nach DIN V 18599 suggerieren. Die Energieeinsparungen durch die neue Dachisolierung sind demnach in der Praxis deutlich größer als in Tabelle 17 dargestellt.

Bei der Interpretation der Energieeinsparung, die aus der Lüftungsanlage resultiert ist zu beachten, dass die Wärmeenergieeinsparung der Wärmerückgewinnungsanlage teilweise durch den zusätzlichen Stromverbrauch der Lüftungsanlage kompensiert wird. In der Summe aus Lüftungsanlage und Wärmerückgewinnung wurde hier gewissermaßen die Komfortsteigerung durch die maschinelle Lüftung mit einer geringen Energieeinsparung verbunden.

Die Anteile der verschiedenen Maßnahmen an der Gebäudehülle bezogen auf alle Maßnahmen an der Gebäudehülle sind in der folgenden Abbildung dargestellt:

Abbildung 38 Anteil der Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle an der Endenergieeinsparung



## 4.4 Energiekosten nach der Sanierung

Die Energiekosten für den Klassentrakt setzen sich aus den Kosten für den bezogenen Strom und den anteiligen Brennstoffkosten der Heizzentrale (Nahwärmesystem), sowie anderen Betriebskosten, wie den Wartungs- und Instandhaltungskosten der Heizzentrale, der Wärmepumpe, der Lüftungsanlagen und anderer technischer Gebäudeausrüstung zusammen.

Für einen ersten Vergleich werden hier nur die reinen Energiekosten (Strom- bzw. Gas-Bezug) verglichen. Die Wartungs- und Instandhaltungskosten werden in Kapitel 4.9 mit betrachtet.

Der Gaspreis wurde der Gasrechnung der Stadtwerke Osnabrück für den Monat Dezember 2011 entnommen<sup>18</sup>, der Wirkungsgrad mit 90% (bezogen auf den Brennwert) und die Übertragungsverluste mit 10% angenommen.

Der Strompreis wird mit 0,177 €/kWh angenommen (siehe Kapitel 2.8)<sup>19</sup>.

<sup>18</sup> Die Rechnungssumme inkl. aller Abgaben und Steuern von €12.636 geteilt durch die bezogene Gasmenge von 233.922 kWh ergibt einen Gaspreis von 5,4 Cent pro kWh.

Mit diesen Werten ergeben sich die in der folgenden Tabelle dargestellten jährlichen Energiekosten:

**Tabelle 18**      **Energiekosten nach der Sanierung**

	<b>Witterungsbereinigter Energieverbrauch (Durchschnitt Jahr 1 und Jahr 2)</b>	<b>angenommene Energiepreise</b>	<b>Resultierende Energiekosten</b>
	<b>[kWh]</b>	<b>[€/kWh]</b>	<b>[€/a]</b>
Strom für die Wärme-gewinnung <sup>20</sup>	19.657	0,177	3.479
Strom für Lüftung	11.699	0,177	2.071
Strom für Klassenzim-mer-Beleuchtung und –Steckdosen	3.436	0,177	608
Strom für Flurbeleuch-tung, elektr. Warmwas-serbereitung, andere nicht separat erfasste Verbraucher	12.580	0,177	2.227
Gas für Wärme aus Fernleitung	8.441	0,054	456
<b>Gesamtsumme</b>			<b>8.841</b>

Diese Energiekosten von 8.841 € pro Jahr werden für die folgenden Vergleiche mit dem Zustand vor der Sanierung und die Kosten–Nutzen–Analyse verwendet.

## 4.5 Vergleich des Strom- und Gasverbrauchs vor und nach der Sanierung

Bei dem Vergleich des Energieverbrauchs vor und nach der Sanierung muss beachtet werden, dass es für den Zustand vor der Sanierung (Energie–Baseline) keine umfassenden Messwerte gibt (siehe vorherige Kapitel). Um dennoch eine Einschätzung der ein-

<sup>19</sup> Rechnungssumme von 56.514,55 € geteilt durch die bezogenen Strommenge von 318.947 kWh.

<sup>20</sup> Witterungsbereinigter Strombedarf der Wärmepumpe (19.155 kWh) und Heizung (Pumpen, Steuerung etc., 2.245 kWh)

gesparten Energie zu bekommen, wird der Vergleich mit drei Energie-Baselines durchgeführt:

1. Energie-Baseline 1: Die Energiebedarfswerte aus dem Förderantrag,
2. Energie-Baseline 2: Der Energiebedarf nach der Schätzung 2 in Kapitel 2.8,
3. Energie-Baseline 3: Der Energiebedarf nach der Schätzung 3 in Kapitel 2.8.

Die Werte der drei Energie-Baselines sowie die Durchschnittswerte der witterungsbeinigten Verbrauchswerte für die beiden Messzeiträume (01.02.2011 bis 30.01.2012 und 01.02.2012 bis 30.01.2013) werden in der folgenden Tabelle gezeigt:

Tabelle 19 Vergleich Ausgangszustand (verschiedene Baselines) mit modernisiertem Zustand (Durchschnitt Jahr 1 und Jahr 2)

	Energiebedarf nach Energie-Baseline 1	Energiebedarf nach Energie-Baseline 2	Energiebedarf nach Energie-Baseline 3	Witterungsbereinigter Energieverbrauch nach der Sanierung (Durchschnitt Jahr 1 und Jahr 2)
	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]
Erdgas (Brennwert)	620.846	696.628	487.650	8.441
Strom, Beleuchtung	30.899	Keine Angaben	Keine Angaben	16.016 <sup>21</sup>
Strom, Hilfsenergie	4.796	Keine Angaben	Keine Angaben	In „Strom, Beleuchtung“ enthalten“
Strom für Wärmege-winnung	nicht vorhanden	nicht vorhanden	nicht vorhanden	19.657
Strom für Lüftungsanlagen	nicht vorhanden	nicht vorhanden	nicht vorhanden	11.699
<b>Summe, Strom</b>	<b>35.695</b>	<b>35.705</b>	<b>35.705</b>	<b>47.372</b>
<b>Summe, Strom und Gas</b>	<b>656.541</b>	<b>732.333</b>	<b>523.355</b>	<b>55.813</b>
<b>Summe, Primär-energiebedarf /-verbrauch für Stromerzeugung</b>	96.377	96.404	94.404	127.904
<b>Summe Primärener-giebedarf /-verbrauch, Gas für Nahwärme</b>	615.253	690.352	483.257	8.365
<b>Summe, Primär-energiebedarf /-verbrauch</b>	<b>711.629</b>	<b>786.756</b>	<b>579.660</b>	<b>136.268</b>

Im Vergleich zu dem witterungsbereinigten Endenergiebedarf nach der Sanierung laut Energieausweis (siehe Kapitel 3.6), in dem angenommen wurde, dass der Energiebedarf ausschließlich durch Strom gedeckt wird (in der Summe aus Heizung, Lüftung und Beleuchtung 57.905 kWh/a<sup>22</sup>), zeigt sich, dass der als Mittelwert der ersten beiden Betriebsjahre erreichte und klimabereinigte Endenergieverbrauch mit 47.3724 kWh/a für Strom unter dem prognostizierten Wert liegt. Dazu kommt allerdings, dass mit der Nahwärme ein weiterer Gasverbrauch von klimabereinigt durchschnittlich rund 8.441

<sup>21</sup> Einschließlich Steckdosen in Klassenzimmern, elektr. Warmwasserbereitung und andere nicht separat erfasste Verbraucher

<sup>22</sup> Im Energieausweis für den modernisierten Zustand wird ein Endenergiebedarf von 31,3 kWh/(m<sup>2</sup> a) angegeben, was bei einer Fläche von 1.850 m<sup>2</sup> einen Endenergiebedarf von 57.905 kWh/a ergibt

kWh/a beansprucht wurde, was laut den ursprünglichen Planungen nicht vorgesehen war. In der Summe ergibt dieses einen Endenergieverbrauch von 55.813 kWh was unter dem im Energieausweis berechneten Wert für den Energiebedarf liegt!

Was die Primärenergie angeht, so wurde diese im Energieausweis mit 156.325 kWh/a berechnet<sup>23</sup>. Dem steht ein witterungsbereinigter durchschnittlicher Primärenergieverbrauch von 136.268 kWh gegenüber.

Die Reduktion des Endenergie- und Primärenergiebedarfes/-verbrauchs (absolute und prozentuale Zahlen) im Vergleich zu den drei Energie-Baselines ist in der folgenden Tabelle zu sehen:

**Tabelle 20 Reduktion des End- und Primärenergiebedarfes**

	Vergleich mit Energie-Baseline 1	Vergleich mit Energie-Baseline 2	Vergleich mit Energie-Baseline 3
Summe Strom- und Gasbedarf vor der Modernisierung [kWh]	656.541	732.333	523.355
Summe witterungsbereinigter Strom- und Gasverbrauch nach der Sanierung (Durchschnitt Jahr 1 und Jahr 2) [kWh]	55.813	55.813	55.813
Reduktion der Summe Strom- und Gasbedarf [kWh]	- 600.728	- 676.520	- 467.542
Reduktion der Summe Strom- und Gasbedarf [%]	- 91 %	- 92 %	- 89 %
Primärenergiebedarf vor der Modernisierung [kWh]	711.629	786.756	579.660
Witterungsbereinigter Primärenergieverbrauch nach der Sanierung (Durchschnitt Jahr 1 und Jahr 2) [kWh]	136.268	136.268	136.268
Reduktion des Primärenergiebedarfes/-verbrauchs [kWh]	- 575.361	- 650.487	- 443.392
Reduktion des Primärenergiebedarfes/-verbrauchs [%]	- 81 %	- 83 %	- 76 %

## 4.6 Vergleich der Energiekosten vor und nach der Sanierung

Auch hier werden die Energiekosten nach der Sanierung (Durchschnitt Jahr 1 und Jahr 2, siehe Kapitel 4.4) mit den verschiedenen Schätzwerten der drei Energie-Baselines (siehe Kapitel 2.8) verglichen. Die Energiekosten vor und nach der Sanierung, sowie die Energiekostenreduzierung (absolut und in Prozent) zeigt die folgende Tabelle:

---

<sup>23</sup> 84,5 kWh/(m<sup>2</sup> a) \* 1.850m<sup>2</sup>

**Tabelle 21 Vergleich Energiekosten vor und nach der Sanierung**

	Vergleich mit Energie-Baseline 1	Vergleich mit Energie-Baseline 2	Vergleich mit Energie-Baseline 3
Energiekosten vor der Sanierung [€/a]	58.000	43.940	32.650
Energiekosten nach der Sanierung (Durchschnitt Jahr 1 und Jahr 2) [€/a]	8.841	8.841	8.841
Energiekosten-Einsparung [€/a]	49.159	35.099	23.809
Energiekosten-Einsparung [%]	- 85 %	- 80 %	- 73 %

Zu berücksichtigen ist, dass die Wartungs- und Instandhaltungskosten in diesem Schritt nicht berücksichtigt werden (weder vor noch nach der Sanierung).

## 4.7 Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen vor und nach der Sanierung

Die CO<sub>2e</sub>-Emissionen werden durch die Multiplikation der Endenergiebedarfe mit den CO<sub>2e</sub>-Emissionsfaktoren der jeweiligen Energieträger ermittelt<sup>24</sup>. Die CO<sub>2e</sub>-Emissionen der drei Energie-Baselines und des sanierten Zustand (witterungsbereinigte Messwerte) werden in der folgenden Tabelle gezeigt, zusammen mit den Einsparungen (absolut und prozentual):

<sup>24</sup> CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren nach Bundesministerium für Umwelt. CO<sub>2</sub>-Faktor für Strom = 0,606 kg/kWh<sub>End</sub>. Erdgas 0,244 kg/kWh<sub>End</sub>. CO<sub>2e</sub> steht für CO<sub>2</sub>-Äquivalente mit in- und ausländischen Vorketten

Tabelle 22 CO<sub>2e</sub>-Emissionen vor und nach der Sanierung

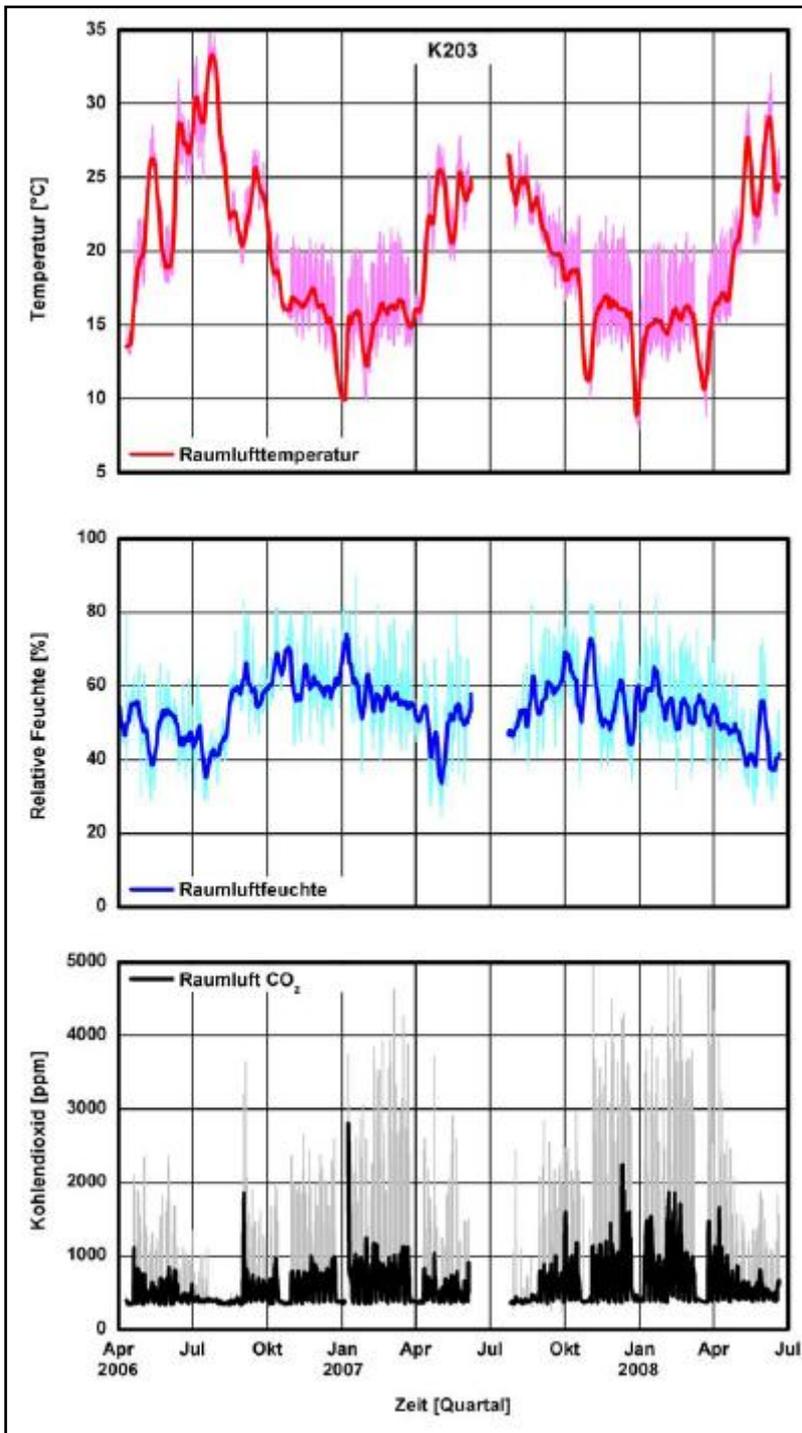
	Erdgas	Strom	Summe
Energiebedarf, Energie-Baseline 1 [kWh/a]	620.846	35.695	
Energiebedarf, Energie-Baseline 2 [kWh/a]	696.628	35.705	
Energiebedarf, Energie-Baseline 3 [kWh/a]	487.650	35.705	
Witterungsbereinigter Endenergieverbrauch nach Sanierung (Durchschnitt Jahr 1 und Jahr 2) [kWh/a]	8.441	47.372	
CO <sub>2e</sub> -Emissionsfaktoren [kg CO <sub>2e</sub> /kWh]	0,244	0,606	
CO <sub>2e</sub> -Emission, Energie-Baseline 1 [kg CO <sub>2e</sub> /a]	151.486	21.631	<b>173.118</b>
CO <sub>2e</sub> -Emission, Energie-Baseline 2 [kg CO <sub>2e</sub> /a]	169.977	21.637	<b>191.614</b>
CO <sub>2e</sub> -Emission, Energie-Baseline 3 [kg CO <sub>2e</sub> /a]	181.987	21.637	<b>140.624</b>
CO <sub>2e</sub> -Emission, nach Sanierung (Durchschnitt Jahr 1 und Jahr 2) [kg CO <sub>2e</sub> /a]	2.060	28.707	<b>30.767</b>
Reduktion der CO <sub>2e</sub> Emission im Vergleich zu Energie-Baseline 1 [kg CO <sub>2e</sub> /a]			<b>142.351</b>
Reduktion der CO <sub>2e</sub> Emission im Vergleich zu Energie-Baseline 2 [kg CO <sub>2e</sub> /a]			<b>160.848</b>
Reduktion der CO <sub>2e</sub> Emission im Vergleich zu Energie-Baseline 3 [kg CO <sub>2e</sub> /a]			<b>109.857</b>
Reduktion der CO <sub>2e</sub> Emission im Vergleich zu Energie-Baseline 1 [%]			<b>- 82 %</b>
Reduktion der CO <sub>2e</sub> Emission im Vergleich zu Energie-Baseline 2 [%]			<b>- 84 %</b>
Reduktion der CO <sub>2e</sub> Emission im Vergleich zu Energie-Baseline 3 [%]			<b>- 78 %</b>

Abhängig von der Annahme hinsichtlich der Energie-Baseline wurden die CO<sub>2e</sub>-Emissionen somit um 78, 82 bzw. 84 % reduziert.

## 4.8 Andere Messwerte

Die Raumlufttemperatur, der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft und die Luftfeuchtigkeit in den Klassenräumen wurden für den zweiten Messzeitraum (1. Februar 2012 bis 30. Januar 2013) gemessen und die Messwerte aufgezeichnet. Zum Vergleich werden in der folgenden Abbildung noch einmal die Ergebnisse der Aufzeichnungen der Messwerte vor der Sanierung des Klassentraktes gezeigt.

**Abbildung 39 Ausgangszustand: Temperatur, Raumluftheuchte und CO<sub>2</sub>-Gehalt**  
 Temperatur und Feuchte als 15-Minuten-Mittelwerte (dünne Linie) und gleitendes Wochenmittel (dicke Linie). CO<sub>2</sub> als 15-Minuten-Mittelwerte und als gleitendes Tagesmittel, gemessen im Klassenraum K203 von April 2006 bis Juli 2008



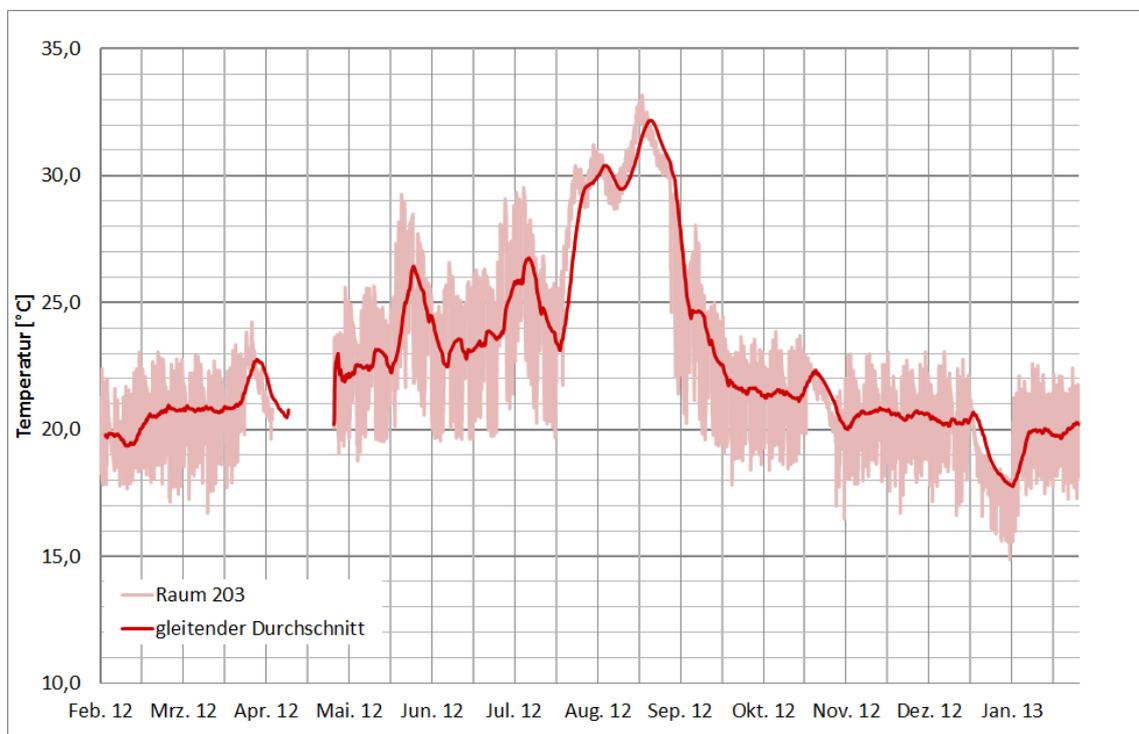
Quelle: [IBP, o.J.], S. 46

## 4.8.1 Raumlufthtemperatur

Die Analyse der Raumlufthtemperaturen erfolgte ab dem 1. Februar 2012, wobei alle 15 Minuten eine Messung vorgenommen wurde und der Messwert gespeichert wurde.

Für den direkten Vergleich mit den Messwerten, die im unmodernisierten Zustand im Klassenzimmer 203 aufgezeichnet wurden (siehe Abbildung 39), werden in der folgenden Abbildung die Messwerte sowie der gleitende Durchschnitt (vorhergehende Woche) für das Klassenzimmer dargestellt (im Zeitraum 5. bis 28. April gab es einen Ausfall des Datenaufzeichnungssystems).

Abbildung 40 Raumlufthtemperatur, Jahr 2, Raum 203



Es ist gut zu sehen, dass die Temperaturen im Sommer deutlich unter und im Winter deutlich über denen liegen, die im unsanierten Zustand gemessen wurden. Genau dies war das Ziel der Modernisierung. Außerdem gut zu sehen sind die Zeiten der Sommer- und Weihnachtsferien, in denen durch das stromsparende Ausschalten der Lüftungsanlage die Temperatur im Sommer stark anstieg bzw. durch das Herunterregeln der Heizung in den Weihnachtsferien die Temperatur deutlich absank. Zu welchen Urzeiten die anderen, auf den ersten Blick kritischen Temperaturen (z.B. 29 Grad im Sommer oder das Absinken der Temperatur auf 18 Grad am Anfang des Messzeitraumes) auftraten, wird in den folgenden beiden Abbildungen, die typische Sommer- bzw. Winterwochen zeigen, dargestellt:

Abbildung 41 Raumlufthtemperatur, Winterwoche

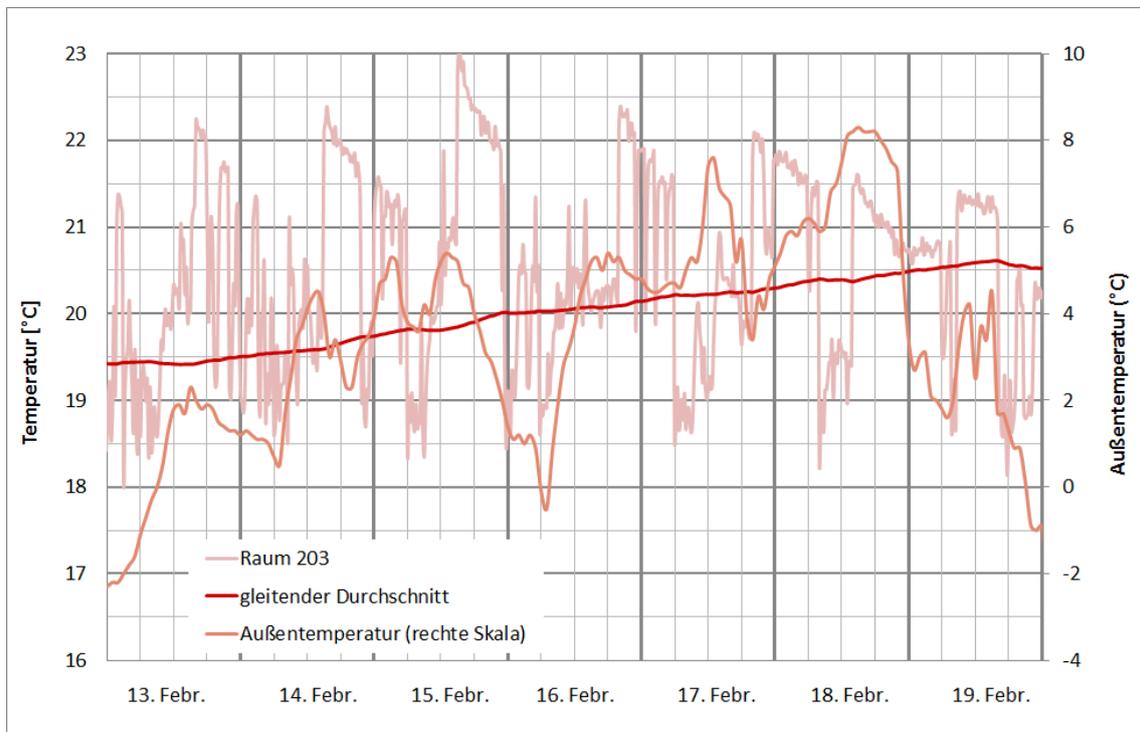
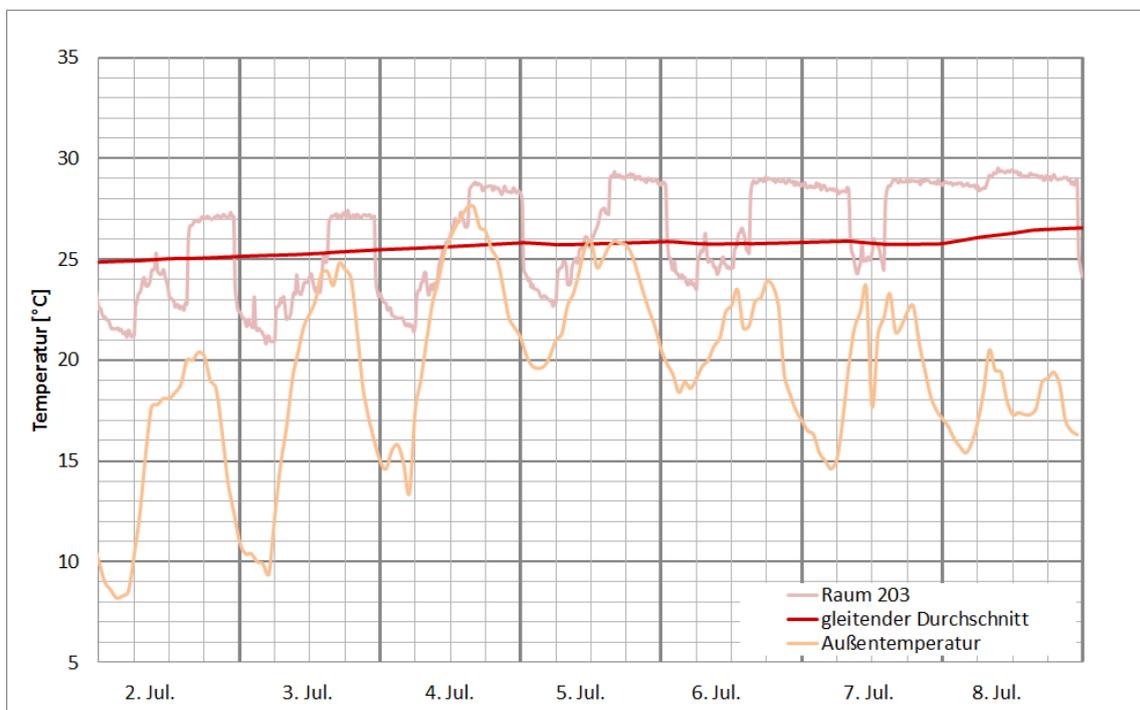


Abbildung 42 Raumlufthtemperatur, Sommerwoche



Auf der Abbildung 41 ist zu sehen, dass die Raumlufthtemperatur in der Winterwoche durchgehend zwischen 18 und 23 Grad beträgt.

Die Abbildung 42 zeigt die Temperaturen in einer typischen Sommerwoche. Gut zu sehen ist der Anstieg der Raumlufthtemperatur in den Morgenstunden, die vor allem durch die Abwärme der Schüler/innen bedingt ist. Ferner ist zu sehen, dass das Lüftungskonzept am 2.7. und 3.7. in der Lage war, die Raumlufthtemperatur in der Unterrichtszeit bis ca. 14:00 Uhr auf nicht mehr als 25 °C steigen zu lassen – trotz der Abwärme der Schüler/innen. Erreicht wird dies durch die nächtliche Belüftung, die etwa ab 24:00 Uhr vorgenommen wird. Der spätere Anstieg ab ca. 14:00 Uhr auf mehr als 25 °C ist für die Schule unerheblich, da die Unterrichtszeit beendet ist.

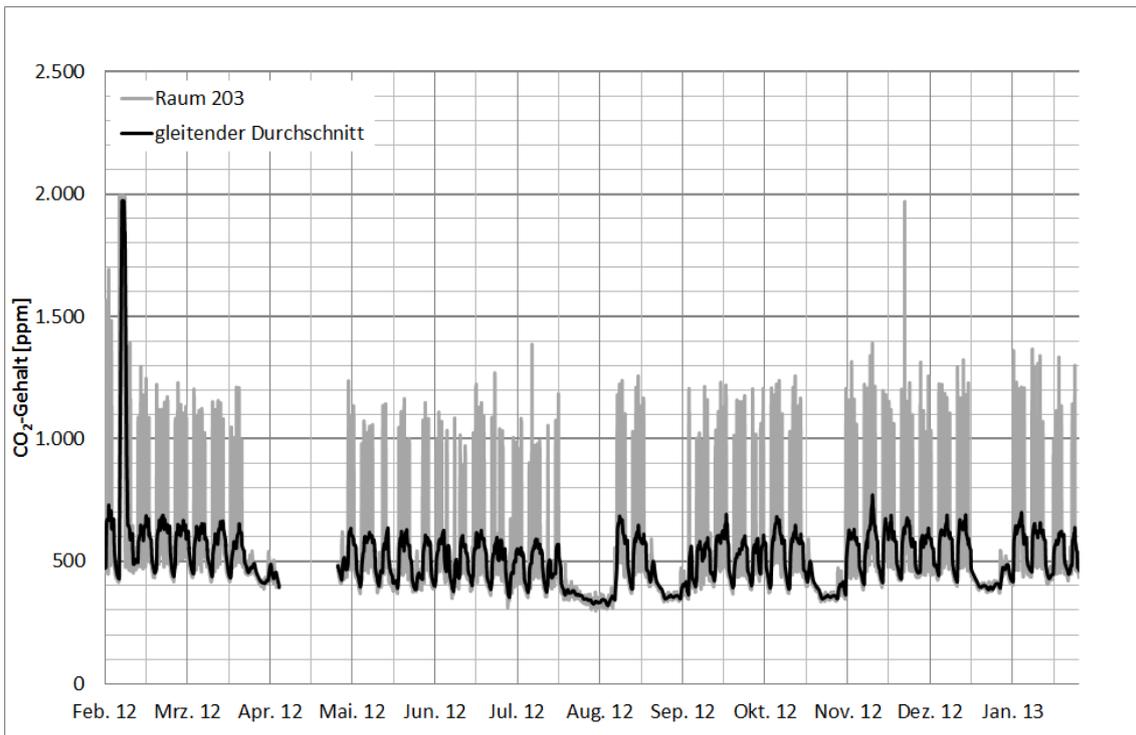
Um die Möglichkeiten der nächtlichen Auskühlung noch besser ausschöpfen zu können, sollte überlegt werden, die Temperaturdifferenz, bei der die Lüftung einschaltet, zu verringern. Dadurch würde die Anlage schon früher eingeschaltet und würde auch morgens länger laufen. Die damit erzielte Komforterrhöhung würde allerdings mit höheren Energiekosten bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionen verbunden sein.

### 4.8.2 Raumlufthqualität

Auch der CO<sub>2</sub>-Gehalt wurde in allen Klassenräumen gemessen und aufgezeichnet, wobei alle 15 Minuten eine Messung vorgenommen wurde und der Messwert gespeichert wurde.

Die folgende Abbildung zeigt den CO<sub>2</sub>-Gehalt im Klassenzimmer 203 über den zweiten Messzeitraum. Auch hier ist der Ausfall des Datenaufzeichnungssystems im Zeitraum 5. bis 28. April zu sehen. Im Vergleich zu den in der Abbildung 39 gezeigten Werten, die vor der Sanierung aufgezeichnet wurden, ist zu sehen, dass die Maximalwerte nun deutlich niedriger liegen. Während vor der Sanierung ständig Werte von deutlich über 2.000 ppm auftraten und auch Werte von über 3.000 ppm keine Seltenheit waren, liegt die Mehrzahl der Werte nun bei unter 1.000 ppm (vgl. Abbildung 43: gleitender Durchschnitt).

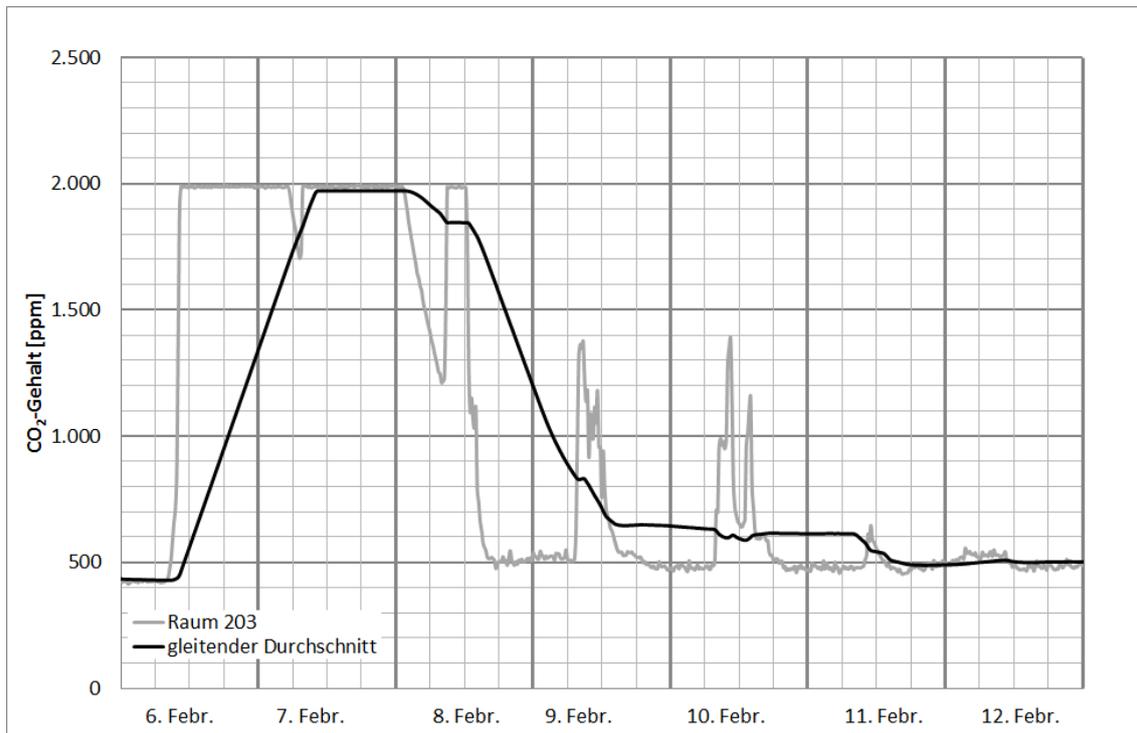
Abbildung 43 CO<sub>2</sub>-Gehalt, Jahr 2, Raum 203



Die in Abbildung 43 dargestellten hellgraue Linie zeigt einzelne Ausreißer. Eine Auswertung aller Werte die im Raum 203 über den Messzeitraum 2 aufgezeichnet wurden ergab, dass nur 76 Werte (entspricht 19 Stunden) über 1500 ppm lagen und gleichzeitig in der Unterrichtszeit auftraten<sup>25</sup>. Von diesen 76 Messintervallen liegen alleine 62 in den Tagen 6., 7. und 8. Februar 2012. Diese Woche wird in der folgenden Abbildung dargestellt:

<sup>25</sup> Montags bis Freitags, zwischen 8 und 14 Uhr, ausgenommen Ferienzeiten

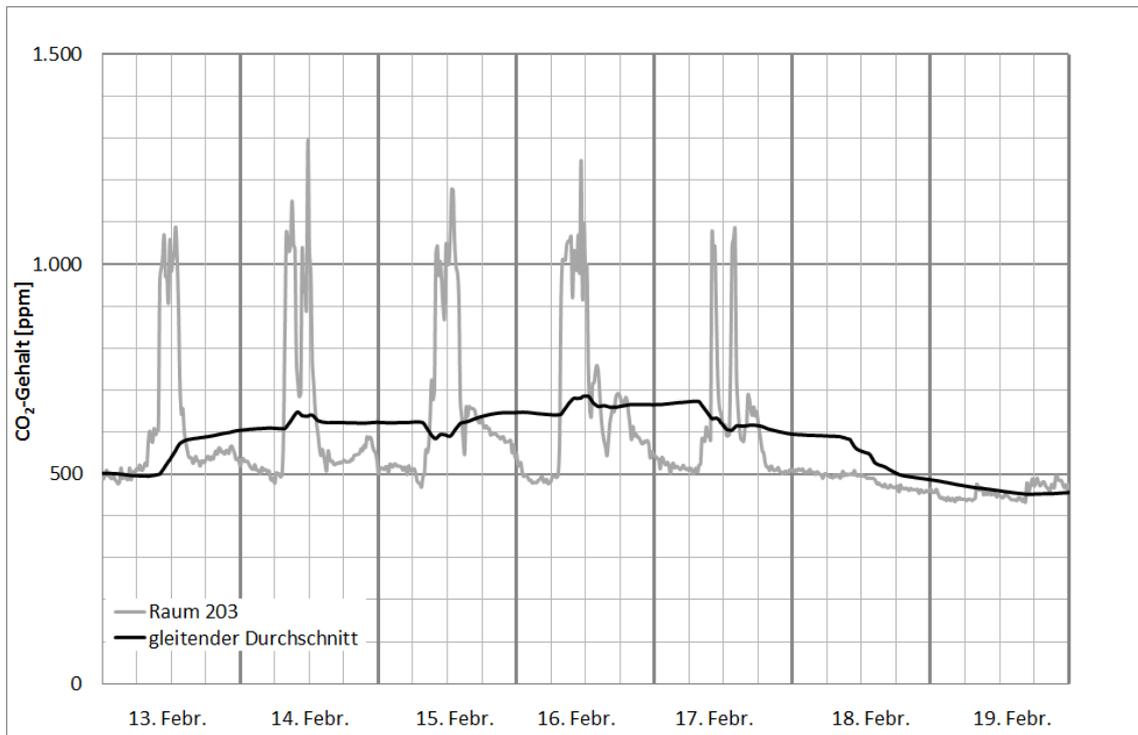
Abbildung 44 CO<sub>2</sub>-Gehalt, Winterwoche, Raum 203



Auffällig ist, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration an den drei Tagen nahezu durchgehend hoch war, was die Frage aufwirft, ob es in diesen Tagen ein Problem mit dem Messsystem oder der Lüftungsanlage gab. Es ist außerdem auffällig, dass die Werte bei exakt 2.000 ppm verharren, was ebenfalls auf einen Ausfall eines Systems in diesem Zeitraum hinweist.

Als eine Winterwoche mit einem typischen Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration wird in der folgenden Abbildung die Woche vom 13. bis zum 19. Februar gezeigt:

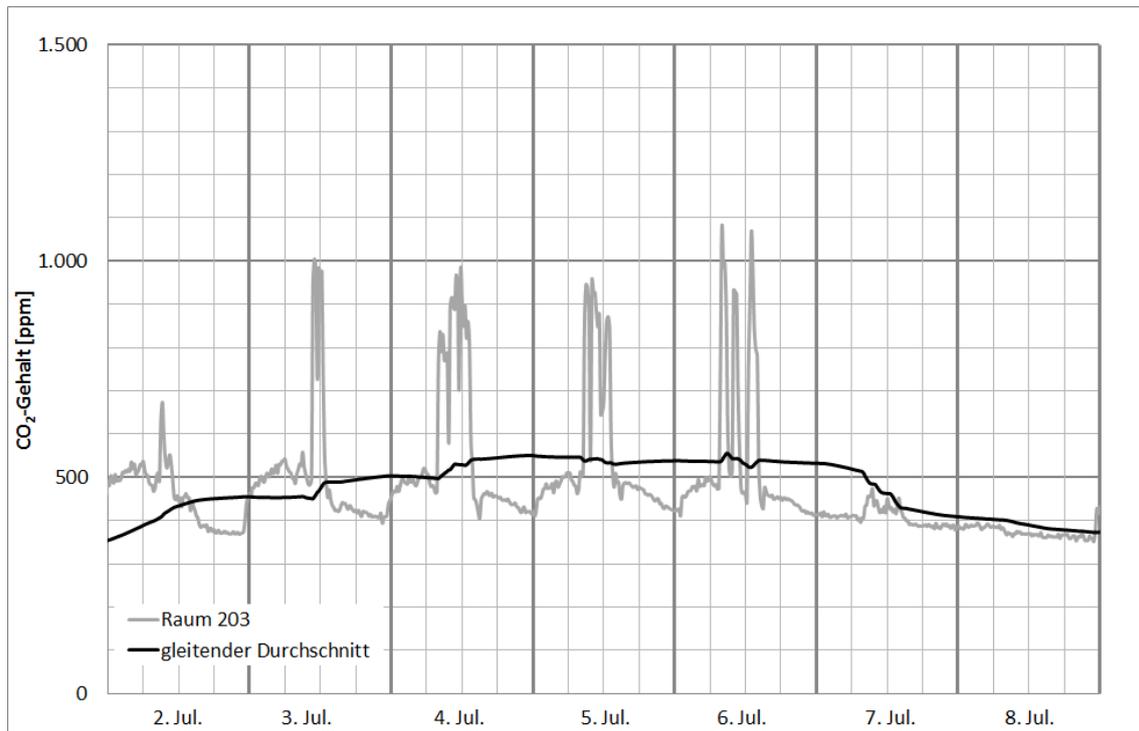
Abbildung 45 CO<sub>2</sub>-Gehalt, Winterwoche 2, Raum 203



Deutlich zu sehen sind die jeweiligen Zeiten des Unterrichtsbeginns, welcher sich durch eine schnell steigende CO<sub>2</sub>-Konzentration bemerkbar macht.

In Zeiten mit warmer Witterung ergibt sich ein ähnliches Bild, wie die folgende Abbildung, die die CO<sub>2</sub>-Konzentration während einer typischen Sommerwoche zeigt, darstellt. Auch hier ist die steigende CO<sub>2</sub>-Konzentration zum Unterrichtsbeginn zu sehen. Die Maxima der CO<sub>2</sub>-Konzentration liegen im Sommer etwas geringer als im Winter, wie auch in Abbildung 43 zu sehen ist.

Abbildung 46 CO<sub>2</sub>-Gehalt, Sommerwoche 2, Raum 203



### 4.8.3 Relative Luftfeuchtigkeit

Die relative Luftfeuchtigkeit wurde nur in einem Klassenraum (Raum Nummer 003) gemessen und aufgezeichnet.

Bezüglich von Bauschäden kann festgestellt werden, dass laut Auskunft des Hausmeisters keine Bauschäden, wie z.B. Schimmelbildung, aufgetreten sind (siehe Kapitel 5.1).

Die aufgezeichnete relative Luftfeuchtigkeit über den zweiten Messzeitraum ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Zu sehen ist, dass Werte über 80 % relativer Luftfeuchtigkeit nur selten auftreten. Dies war auch ein Ziel der Installation maschineller Lüftungsanlagen, denn eine Luftfeuchte, die über einen Zeitraum von mehr als drei Tagen über 80 % liegt, führt in vielen Fällen zu Schimmelbildung und Bauschäden.

Deutlich wird jedoch, dass vor allem in den Wintermonaten der empfohlene Mindestwert für die relative Luftfeuchtigkeit von 30 % (UK NRW, 2012) oft und teilweise deutlich unterschritten wird. Hier besteht ein Interessenkonflikt: Um eine zu hohe CO<sub>2</sub>-Belastung, andere Schadstoffe sowie Gerüche zu vermeiden, muss gelüftet werden. Diese Lüftung führt jedoch zu einer Reduktion der rel. Feuchte. Abhilfe könnte das Einbringen von Feuchtigkeit in die Klassenräume während sehr niedriger Außentemperaturen leisten.

Abbildung 47 Relative Luftfeuchtigkeit, Jahr 2, Raum 003

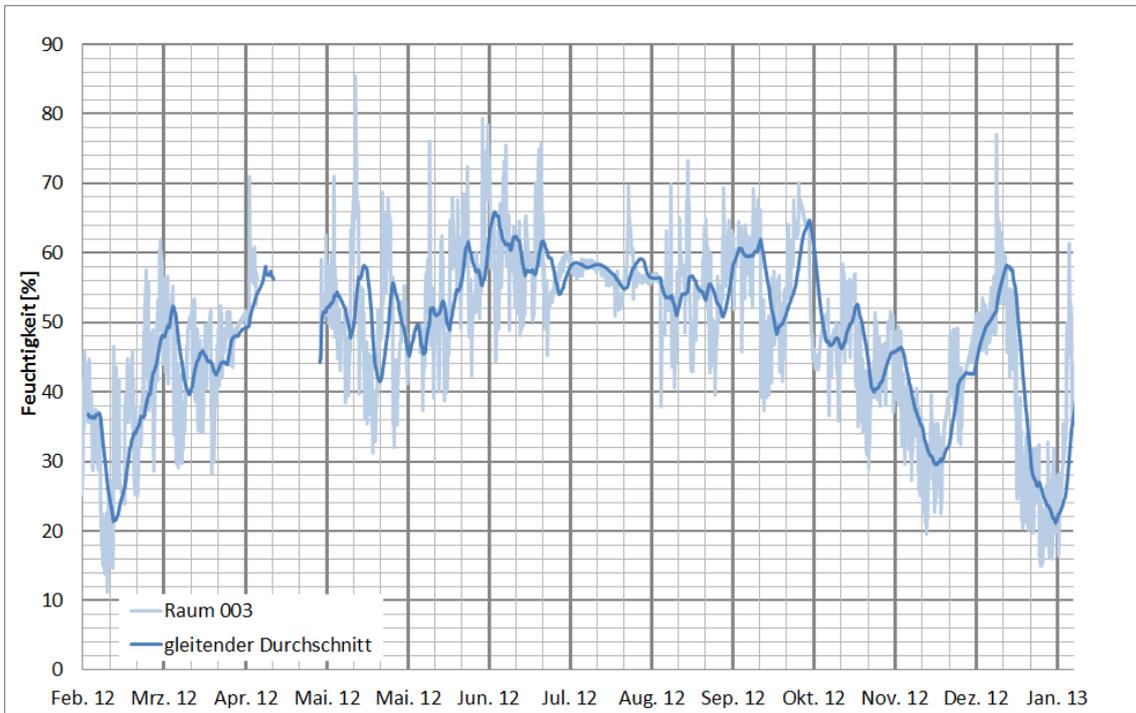
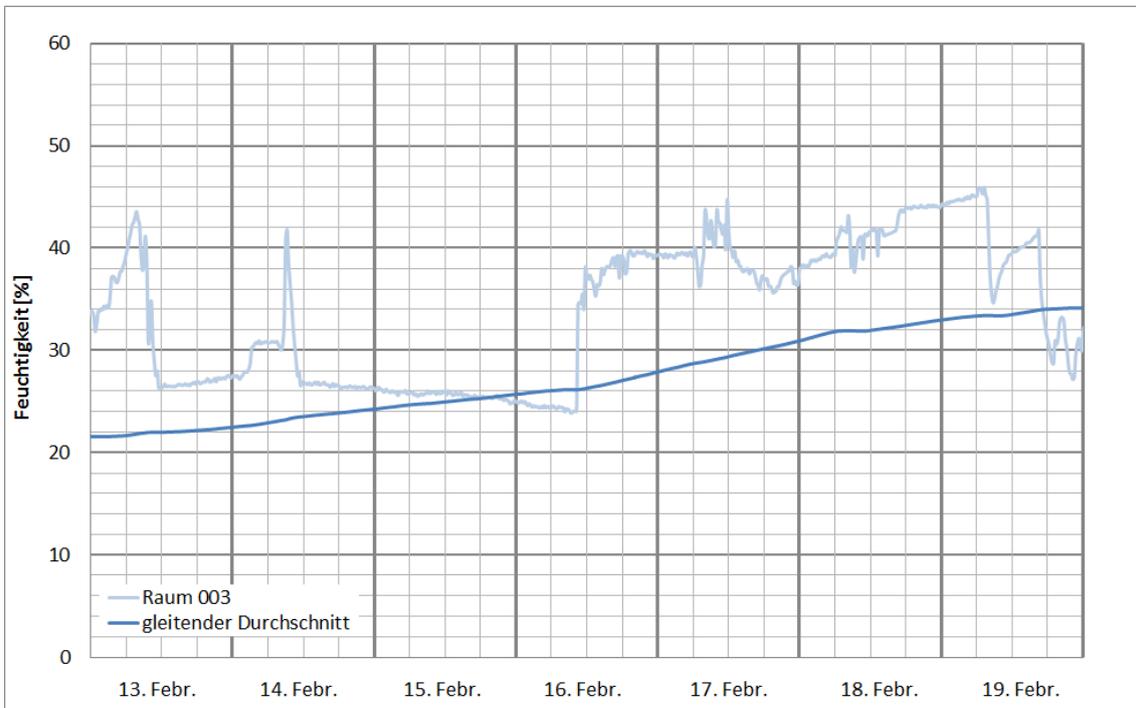
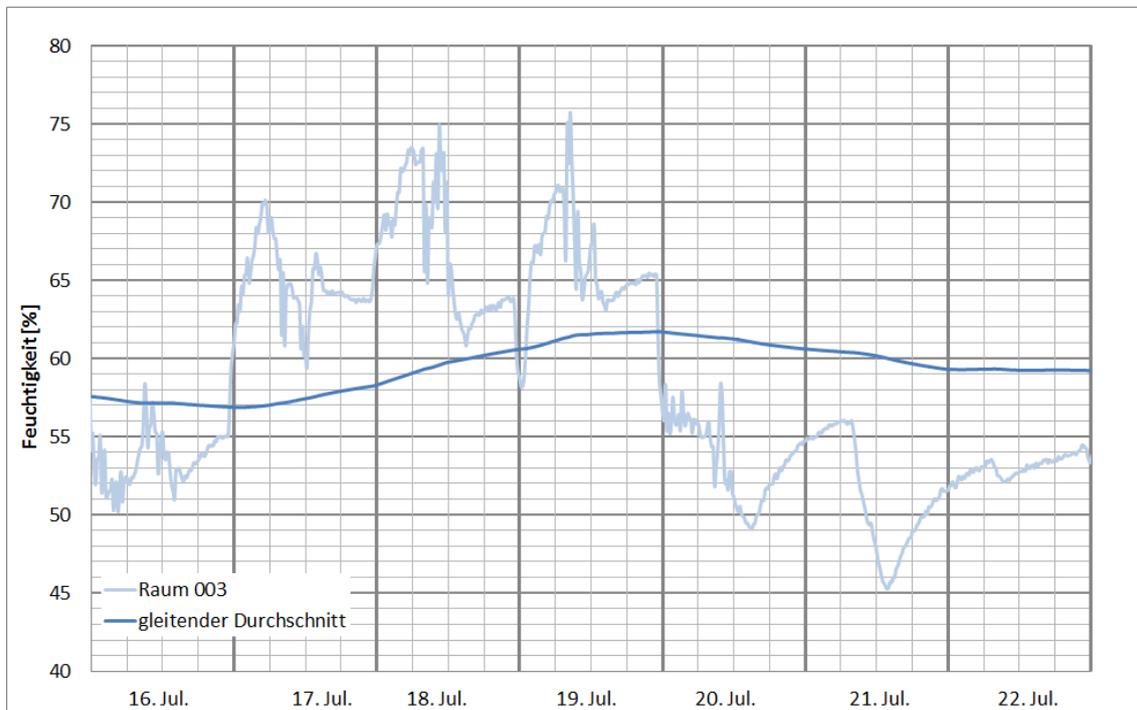


Abbildung 48 Relative Luftfeuchtigkeit, Winterwoche, Raum 003



In der beispielhaft gezeigten Sommerwoche (nächste Abbildung) ist zu sehen, dass die relative Luftfeuchtigkeit durchgehend im für diese Temperaturen vorgesehenen Behaglichkeitsbereich von 30 % bis 80 % liegt.

**Abbildung 49** Relative Luftfeuchtigkeit, Sommerwoche, Raum 003



## 4.9 Bestimmung von Kosten–Nutzen–Relationen

Bei der Betrachtung von Kosten–Nutzen–Relationen ist es wichtig zu beachten, dass es neben den eingesparten Energiekosten auch weitere nicht unbedingt monetär messbare Verbesserungen durch die Sanierung gibt. Dies sind z.B. die Steigerung der Raumluftqualität und des Komforts für die Nutzer des Gebäudes, der Betrag zur Instandhaltung und damit Lebensdauer des Gebäudes, sowie für die Gesellschaft die Einsparung von knappen Ressourcen und die Verminderung von Treibhausgasemissionen.

### 4.9.1 Statische Amortisationszeit

Die statische Amortisationszeit gibt die Zeit an, in der die eingesparten Energiekosten die Investitionssumme wieder „eingespielt“ haben. Es ist eine statische Betrachtung, weil weder veränderliche Zinssätze, noch die Änderungen der Energie- oder anderer Betriebskosten in künftigen Jahren berücksichtigt werden. Die Ermittlung der stati-

schen Amortisationszeit ist daher nur eine ganz grobe Methode zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit.

Hinsichtlich der Baukosten, werden für diese Betrachtung die in Tabelle 7 aufgelisteten Kosten berücksichtigt; also nur die Kosten für energetisch relevante Maßnahmen.

Die Lüftungsanlage dient in erster Linie der Komfortsteigerung (Verbesserung der Raumluftqualität), hat aber durch die integrierte Wärmerückgewinnungsanlage auch einen Effekt auf die Energieeffizienz des Gebäudes. Da die Kosten der Lüftungsanlage damit nicht eindeutig zuzuweisen sind, wurde die Statische Amortisationszeit einmal mit den Kosten der Lüftungsanlage und einmal ohne berechnet.

Da die Menge der rückgewonnenen Energie durch die Wärmerückgewinnungsanlage nicht quantifizierbar ist, wurde diese nicht berücksichtigt. In der Praxis hätte dies aber die Folge, dass ohne Wärmerückgewinnungsanlage diese Wärme von der Wärmepumpe bereitgestellt werden müsste, was die Stromkosten erhöhen und die statische Amortisationszeit verlängern würde.

Mit den Ergebnissen der Energiekosteneinsparungen der drei Energie-Baselines (siehe Kapitel 4.6) ergeben sich die verschiedenen Amortisationszeiten damit zu:

**Tabelle 23      Statische Amortisationszeit mit verschiedenen Annahmen**

	<b>Energiekosten- Einsparung [€/a]</b>	<b>mit Lüftungsanlage</b>	<b>ohne Lüftungsanlage</b>
<b>Investitionskosten</b>		1,18 Mio. €	0,65 Mio. €
<b>Gegenüber Ausgangszustand, Baseline 1</b>	49.159 €	24 Jahre	13 Jahre
<b>Gegenüber Ausgangszustand, Baseline 2</b>	35.099 €	34 Jahre	18 Jahre
<b>Gegenüber Ausgangszustand, Baseline 3</b>	23.809 €	50 Jahre	27 Jahre

Die Amortisationszeiten zwischen 13 und 50 Jahren erscheinen auf den ersten Blick als sehr lang. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass hier methodenbedingt u.a. von konstanten Energiepreisen ausgegangen wird und die o.a. Zusatznutzen der Sanierung nicht berücksichtigt werden.

## 4.9.2 Kosten–Nutzen–Relation mit der Barwert–Methode

Mit der sogenannten Barwert–Methode kann nicht nur die aktuellen Energiekosten–Einsparung mit den Investitionskosten in ein Verhältnis gebracht werden, sondern es werden alle Kosten bzw. Einsparungen in späteren Jahren berücksichtigt und mit einem angenommenen Zinssatz abdiskontiert und somit auf dieselbe Basis gebracht. Der Barwert als Ergebnis dieser Betrachtung ist die Summe aller dieser abdiskontierten Jahressummen.

Die folgende Abschätzung der verschiedenen Barwerte erfolgt über einen Zeitraum von 25 Jahren.

Für die Berechnung der Kapitalkosten für die einzelnen in Tabelle 7 aufgeführten Kosten wurde eine Nutzungsdauer von 40 Jahren für die Gebäudemaßnahmen und 20 Jahre für die Haustechnik angenommen<sup>26</sup>. Als Zinssatz wird als Beispiel für eine risikolose Geldanlage 3,43 % angenommen, welches der durchschnittliche Zinssatz von langlaufenden Staatsanleihen im Jahr 2010 war [Bundesbank 2012].

Kostenpositionen, bei denen eine Kostensteigerung durch Inflation zu erwarten sind (Energiepreisschätzungen, die in realen Preisen vorliegen und Wartungskosten, bei denen ebenfalls angenommen wird, dass sie sich analog der Inflationsrate erhöhen werden), wurde dieser Zinssatz um 1,56% reduziert (Durchschnittliche Inflationsrate der Jahre 2001 bis 2010 [statista 2013]).

Hinsichtlich der Investitionskosten werden auch hier die in Tabelle 7 aufgelisteten Kosten berücksichtigt (1,18 bzw. 0,65 Mio. Euro mit bzw. ohne Lüftungsanlage). Die Berücksichtigung der Instandhaltungskosten für die Wärmepumpe, die Gebäudeautomation und die Lüftungsanlage erfolgt mit der Abschätzung, dass diese 2 % der reinen Anlagenkosten (ohne MWSt., Baunebenkosten Einbau etc.) betragen<sup>27</sup>.

Bei der Abschätzung der zukünftigen Heizkosten wurde die im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie im August 2010 erstellte Studie „Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung“ [EWI/gws/Prognos 2010] herangezogen. In dieser werden u. a. für die Energieträger Gas und Strom in einem Referenzszenario Annahmen getroffen, wie sich die realen Energiepreise entwickeln werden, wobei Werte für 2008, 2020, 2030, 2040 und 2050 angegeben werden. Aus diesen

---

<sup>26</sup> Die technisch–wissenschaftliche Literatur [BMVBW 2001], [IFB 2004], [VDI 2067] nennt für die einzelnen Wärmedämmmaßnahmen Nutzungsdauern zwischen 30 und 50 Jahren, zwischen 25 und 40 Jahren für Fenster und zwischen 15 und 20 Jahren für Wärmeerzeugungsanlagen

<sup>27</sup> Die Instandhaltungskosten für die Gebäudeautomation sind damit 720 €/a, die für die Wärmepumpe 2.270 €/a und die für die Lüftungsanlage rund 6.000 €/a. Diesen Kosten stehen Kosten der Wartungsverträge (nur Wartung ohne Ersatzteile) von 520 bzw. 2.650 €/a (Wärmepumpe bzw. Lüftungsanlage) sowie tatsächlich im Jahr 2012 für die Wartung abgerechnete Kosten von 8.238 bzw. 523 €/a gegenüber.

Werten wurden die Preissteigerungsraten für die zwischen diesen Jahreszahlen liegenden Zeitabschnitte berechnet.

In der folgenden Tabelle sind die berechneten Preissteigerungsraten für die eingesetzten Endenergieträger für diese Zeitabschnitte dargestellt:

**Tabelle 24      Angenommene Energiepreissteigerung**

Energieträger	2008-2020	2020-2030	2030-2040	2040-2051
Erdgas / Flüssiggas	0,12 %/a	0,80 %/a	0,86 %/a	0,68 %/a
Strom	0,10 %/a	0,23 %/a	0,13 %/a	-0,32 %/a

Im Vergleich zur tatsächlichen Entwicklung der Energiepreise in den Jahren 2008 bis 2011, erscheinen die oben aufgeführten Preissteigerungsraten gering. Sie verdeutlichen vielmehr, dass eine kurzfristige Preisprognose nicht möglich ist. Allerdings kann man aus der Entwicklung der letzten Jahre den Schluss ziehen, dass die nachfolgende Abschätzung der Heizkostensparnis auf der Basis von [EWI/gws/Prognos 2010] zu eher konservativen Ergebnissen führt, was bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden sollte.

Mit den prozentualen Steigerungsraten aus Tabelle 24 ergeben sich die folgenden realen Energiepreise (Preise für jedes fünfte Jahr gezeigt):

**Tabelle 25      Geschätzte reale Energiepreise Energiepreissteigerung**

Energieträger	Einheit	2011	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Erdgas	[€/kWh]	0,0540	0,0543	0,0546	0,0568	0,0591	0,0617	0,0644	0,0667	0,0690
Strom	[€/kWh]	0,1777	0,1784	0,1794	0,1814	0,1835	0,1847	0,1860	0,1831	0,1802

Bei den Energiekosteneinsparungen wird der Durchschnitt der Energiekosten der drei Baselines (vor der Sanierung) von dem Mittelwert der klimabereinigten Energiekosten der beiden Jahre nach der Sanierung abgezogen. Die Stromkosten der Lüftungsanlage werden dabei separat dargestellt, da auch hier einmal mit und einmal ohne Lüftungsanlage gerechnet wird. Da die Menge der rückgewonnenen Energie durch die Wärmerückgewinnungsanlage nicht quantifizierbar ist, wurde diese nicht berücksichtigt. In der Praxis hätte dies aber die Folge, dass ohne Wärmerückgewinnungsanlage diese Wärme von der Wärmepumpe bereitgestellt werden müsste, was die Stromkosten erhöhen und den Barwert verringern würde.

Für die Entnahme des Grundwassers für die Wärmepumpe sind Gebühren zu entrichten. Diese betragen für das Jahr 2012 648 Euro. Für die Berechnung des Barwertes wird angenommen, dass diese Gebühr über den Betrachtungszeitraum unverändert bleibt.

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der einzelnen Barwerte:

**Tabelle 26 Barwerte der umgesetzten Maßnahmen und Betriebskosten**

<b>Position</b>	<b>Barwert mit Berücksichtigung der Lüftungsanlage</b>	<b>Barwert ohne Berücksichtigung der Lüftungsanlage</b>
<b>Investitionskosten</b>		
Gebäudemaßnahmen	- 303 T€	- 303 T€
Technikmaßnahmen ohne Lüftung	- 279 T€	- 279 T€
Lüftungsanlage	- 600 T€	
<b>Summe, Investitionskosten</b>	<b>- 1.182 T€</b>	<b>- 582 T€</b>
<b>Instandhaltungskosten</b>		
Wärmepumpe und Gebäudeautomation	- 59 T€	- 59 T€
Lüftungs- und Wärmerückgewinnungsanlage	- 119 T€	
<b>Summe, Instandhaltungskosten</b>	<b>- 178 T€</b>	<b>- 59 T€</b>
<b>Energiekosteneinsparung (positiver Wert) / Energiekosten</b>		
Erdgas	663 T€	663 T€
Strom, ohne Lüftungsanlage <sup>28</sup>	0,1 T€	0,1 T€
Strom-Mehrkosten durch Lüftungsanlage	- 42 T€	
<b>Summe Energiekosten / Energiekosteneinsparung</b>	<b>621 T€</b>	<b>663 T€</b>
<b>Wasserentnahmegebühren</b>	<b>- 13 T€</b>	<b>- 13 T€</b>
<b>Gesamtsumme</b>	<b>- 752 T€</b>	<b>+ 9 T€</b>

Als Ergebnis steht somit ein Barwert von minus 752 tausend Euro. Das bedeutet, dass eine alternative Investition, die einen Zins von 4,43% aufweist, (z.B. eine Bundesanleihe) über den 25 jährigen Betrachtungszeitraum 752 tausend Euro mehr Wert hätte (bezogen auf den Geldwert des Jahres der Investition (2010)).

---

<sup>28</sup> Der sehr kleine Barwert der Energiekosteneinsparung für den Strom ohne Lüftungsanlage ergibt sich daraus, dass der Stromverbrauch im sanierten Zustand insgesamt (verglichen mit dem Durchschnitt der drei Baselines) angestiegen ist. Der Anstieg dieses Stromverbrauch ist etwa identisch (etwas kleiner) mit dem Strombedarf der Lüftungsanlage, sodass sich wenn man diesen Strombedarf abzieht nur eine sehr kleine Kostenersparnis auf der Stromseite ergibt

Ohne Berücksichtigung der Lüftungsanlage (und der damit verbundenen Verbesserung der Luftqualität) ist der Barwert der Investition mit plus 9 tausend Euro positiv, d.h. die Investition ist, was den Geldwert des Jahres 2010 betrifft, 9 tausend Euro mehr wert als eine alternative Investition.

## 4.10 Akzeptanz

Innerhalb des Monitorings wurden mehrere Befragungen der Nutzer der Schule vorgenommen. Dabei wurden vor allem gefragt, welche Mängel es bezüglich der Beheizung, Beleuchtung und Belüftung gibt.

Entsprechend der Aufgabenverteilung zwischen Bremer Energie Institut und Angela-schule hat das Bremer Energie Institut lediglich die Fragebögen erstellt.

Die Fragebogen wurden von der Schule verteilt, von Lehrern und Schülern ausgefüllt, gesammelt und ausgewertet. Die dort genannten Märgern und Verbesserungsvorschläge konnten von der Schule für die Optimierung der Einstellung der Anlagen genutzt werden. Laut Befragungen wurden die Raumlufitemperaturen, die Luftqualität und die Beleuchtung als sehr angenehm empfunden. Es gab aber auch Mängelnennungen wie ein zu starker Luftzug, schlechte Luftqualität, wechselnde Temperaturen und Bitten um eine separat auszuschaltende Tafelbeleuchtung.

## 5 Zusammenfassung und Bewertung des modernisierten Zustands

Die folgende Tabelle gibt stichwortartig einen Überblick über die durch die Sanierungsmaßnahmen erfolgten Verbesserungen.

**Tabelle 27 Übersicht unsanierter / sanierter Zustand**

	unsaniert	Saniert (Durchschnitt Jahr 1 und Jahr 2)	Verbesserung / Einsparung
<u>Endenergiebedarf<sup>29</sup>:</u>			
Schätzung 1	656.541 kWh / a	55.813 kWh / a	- 91 %
Schätzung 2	732.333 kWh / a	(witterungsbereinigter Verbrauch)	- 92 %
Schätzung 3	523.355 kWh / a		- 89 %
<u>Primärenergiebedarf</u>			
Schätzung 1	711.629 kWh / a	136.268 kWh / a)	- 81 %
Schätzung 2	786.756 kWh / a	(witterungsbereinigter Verbrauch)	- 83 %
Schätzung 3	579.660 kWh / a		- 76 %
<u>CO<sub>2e</sub>-Emissionen</u>			
Schätzung 1	173.118 kg / a	30.767 kg / a	- 82 %
Schätzung 2	191.614 kg / a		- 84 %
Schätzung 3	140.624 kg / a		- 78 %
<u>Energiekosten</u>			
Schätzung 1	58.000 € / a	8.841 € / a	- 85 %
Schätzung 2	43.940 € / a		- 80 %
Schätzung 3	32.650 € / a		- 73 %
Baukosten Energetisch relevante Baukosten	-	1.182 T€ mit bzw. 647 T€ ohne Lüftungs- anlage	
Heizsystem	Seit 2008: Gasbrennwertkessel (Nahwärmesystem mehrerer Schulen)	Elektr. Wärmepumpe u. Wärmerückgewinnung aus der Abluft; ggf. Nahwärme als Nothei- zung	
Energieträger	Erdgas Strom	Strom + Wärme aus dem Grundwasser und der Abluft	Höherer Anteil re- generativer Ener- gien
Wärmeschutz	gering bis sehr ge- ring	Hoch	Stark verbessert

<sup>29</sup> Die Zahlen beziehen sich auf den Zustand im Jahr 2006 und früher. 2008 erfolgte eine Teilsanierung des Heizsystems inkl. Einbau eines Pflanzenöl-BHKW. Bedarfswerte bezogen auf diesen Zustand liegen nicht vor. Unter Endenergie wird hier die Summe von Strom- und Gasbedarf (Brennwert) verstanden.

	unsaniert	Saniert (Durchschnitt Jahr 1 und Jahr 2)	Verbesserung / Einsparung
Beleuchtung	Schlechte Lichtqualität, hohe Kosten	Sehr gute Lichtqualität, geringe Kosten	Stark verbessert
Raumlufttemperaturen	Im Winter zu kühl, im Sommer überhitzt	Gut. An sehr warmen Sommertagen teilweise hohe Innentemperaturen. Es besteht Optimierungsmöglichkeit durch veränderte betriebsweise der Lüftungsanlage in der Nacht	Stark verbessert
Relative Luftfeuchtigkeit	z. T. kritisch in Bezug aus Schimmelpilzbildung	Gut, im Winter allerdings teilweise recht trockene Luft	Schimmelpilz- und Bauschadenfreiheit gewährleistet
CO <sub>2</sub> -Gehalt der Raumluft	Zu hohe Konzentration bis fast 5.000 ppm	Sehr gute bis gute Werte	Stark verbessert

## 5.1 Schwachstellen

Aufgabe des Monitorings war auch, auf evtl. verbliebene Schwachstellen aufmerksam zu machen. Als solche wurden folgende identifiziert:

1. *Unerklärter Stromverbrauch:* Die Differenz zwischen den Stromverbräuchen gemessener Stromkreise und dem Gesamtstromverbrauch des Klassentraktes ist relativ hoch. Im Mittel der beiden Messjahre beträgt sie 12.550 kWh/a. Zu einem geschätzten Anteil von rund 2.000 kWh/a ist die Differenz durch die (nicht gemessenen) Lüftungsanlagen der Sanitärräume erklärbar. Bei der Verwendung von weiteren Stromzählern (Lüftungsanlage, Heizregister der Lüftungsanlagen, Außen- und Flurbeleuchtung und elektronisch geregelte Durchlauferhitzer) wären differenziertere Aussagen möglich gewesen. Die Lüftungsanlage der WCs wurde im Februar 2013 umprogrammiert: Während sie vorher an Schultagen durchgehend von 7:30 bis 18:00 Uhr in Betrieb war läuft sie jetzt nur in den Pausenzeiten. Als Resultat wird eine weitere Stromeinsparung erwartet.
2. *Luftfeuchtigkeit:* Im Winter wurden in den späten Vormittagsstunden sehr niedrige Luftfeuchtigkeitswerte gemessen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch die Lüftungsanlage mehr kalte Außenluft zugeführt wird als dies bei Fensterlüftung der Fall wäre. Abhilfe könnte eine manuelle Luftbefeuchtung an kalten Wintertagen schaffen. Eine technische Lösung mit (Luftbefeuchter innerhalb der RLT-Anlagen) wäre mit hohen Zusatzkosten verbunden. Erwogen wer-

den kann jedoch, an besonders kalten Wintertagen höhere CO<sub>2</sub>-Werte und damit einen geringeren Luftwechsel zu akzeptieren.

## 5.2 Empfehlungen für zukünftige Bauvorhaben

Bei der Modernisierung von Schulen geht es neben der Energieeinsparung auch um eine Verbesserung der Lernsituation. Hierbei sind Lüftung, Beleuchtung und Temperaturen wichtigen Faktoren. Auch bei hoher Energieeinsparung kann man nicht immer davon ausgehen, dass sich die Modernisierung allein aus der Energieeinsparung bezahlt macht: Zu hoch ist in der Regel der Nachholbedarf in Bezug auf die Luftqualität und andere Parameter der Behaglichkeit. Das zweijährige Monitoring einer Schule hat gezeigt, dass die Raumluftsituation und die Beleuchtungsqualität deutlich verbessert und gleichzeitig Energie und Energiekosten eingespart werden können. Es hat aber auch gezeigt, dass man mit heutiger Messtechnik wieder neue Ansätze zur laufenden weiteren Verbesserung der Anlageneinstellungen gewinnt. Es wird deshalb empfohlen, auch bei zukünftigen Bauvorhaben darauf zu achten, dass die umgesetzten Maßnahmen nach der Inbetriebnahme nicht „sich selbst überlassen“ werden, sondern dass über einen Zeitraum von mindestens zwei Jahren regelmäßig Messwerte überprüft und Einstellungen nachjustiert werden.

Da ein Großteil der Messtechnik (Strom- und Wärmemengenzähler, Sensoren) in der Regel fest installiert sind und im Gebäude verbleiben, ist es auch sinnvoll und empfehlenswert, über den Zeitraum von zwei Jahren hinaus in größeren Abständen Messwerte zu überprüfen und daraus Empfehlungen für Einstellungen und Betriebsweisen der Anlagen abzuleiten. Gerade bei Nutzungsänderungen, die während der ersten zwei Jahre nicht absehbar sind (z.B. Nutzung zu anderen Tageszeiten), können sich daraus weitere Einspareffekte ergeben.

Hinsichtlich der eingesetzten Messtechnik werden weitere Stromzähler empfohlen, die wenn möglich alle Einzelverbraucher (gegebenenfalls zu Gruppen gebündelt) erfassen sollten.

Bezüglich der aufgezeichneten Messwerte (Temperatur, CO<sub>2</sub>-Werte und relative Luftfeuchtigkeit), die alle rund 30 Tage überschrieben werden, wären deutlich größere Aufzeichnungsperioden wünschenswert, da dies einerseits den Aufwand beim Herunterladen der Daten verringern würde und andererseits es ermöglichen würde die Daten, in der Zukunft nach der Monitoring-Periode z.B. nur einmal pro Jahr auszulesen und auszuwerten.

## 6 Literatur

- [Abschlussbericht 2006] Haase, Werner. Abschlussbericht: Modellhafte, energieeffiziente Schulgebäudesanierung Angela Schule Osnabrück. Förderprojekt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Bericht vom 15.12.2006
- [ages 2007] Verbrauchskennwerte 2005. Hrsg.: ages GmbH, Münster, 2007
- [ages 2011] Gradtagzahlen. Siehe: [http://klimadaten.ages-gmbh.de/index.php?option=com\\_content&task=view&id=19&Itemid=33](http://klimadaten.ages-gmbh.de/index.php?option=com_content&task=view&id=19&Itemid=33). Zugriff am 15. Dezember 2011.
- [Angelaschule 2010 10 13] Homepage der Angelaschule, <http://umwelt.angelaschule-osnabrueck.de/>, vom 26.10.2010
- [Bestandsanalyse] Autor NN Schulstiftung im Bistum Osnabrück, Energieeffiziente Sanierung Klassentraktgebäude des Gymnasiums St. Angela in Osnabrück, Bestandsanalyse, Teil C
- [BMU Antrag, o.J.] Schulstiftung im Bistum Osnabrück, Energieeffiziente Sanierung, Klassentraktgebäude des Gymnasiums St. Angela in Osnabrück, Antrag an das BMU, ohne Jahr
- [BMVBW 2001] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.): Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Anlage 6: Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden und Liegenschaften. S. 6.13–6.17. Ohne Ort. 2001.
- [Bundesbank 2012] Deutsche Bundesbank. Zeitreihe WU3975: Umlaufrenditen inländ. Inhaberschuldversch. / Börsennotierte Bundeswertpapiere / RLZ über 15 bis 30 Jahre / Monatswerte. Download unter: [http://www.bundesbank.de/Navigation/DE/Statistiken/Zeitreihen\\_Datenbanken/Makrooekonomische\\_Zeitreihen/its\\_details\\_value\\_node.html?tsId=BBK01.WU3975](http://www.bundesbank.de/Navigation/DE/Statistiken/Zeitreihen_Datenbanken/Makrooekonomische_Zeitreihen/its_details_value_node.html?tsId=BBK01.WU3975), Zugriff am 27.07.2012.
- [DIN V 18599–10: 2007–2] Energetische Bewertung von Gebäuden, Teil 10: Nutzungsrandbedingungen. Berlin, 2007
- [DWD 2012] Deutscher Wetterdienst. Siehe: [www.dwd.de/klimafaktoren](http://www.dwd.de/klimafaktoren), dann „download“ anklicken. Homepage vom 04.04.2013.
- [EWI/gws/Prognos 2010] EWI, gws, Prognos: *Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung*. Basel, Köln, Osnabrück. 2010.

- [Göckel 2011 03 01] Göckel, T. Schreiben an das Bistum Osnabrück vom 01.03.2011
- [Göckel 2011 03 04] Göckel, T. Schreiben an das Bremer Energie Institut vom 04.03.2011
- [IBP, o.J.] Sedlbauer, Holm, Hellwig, Antretter. Messung des Raumklimas und der Raumluftqualität in verschiedenen Klassenzimmern. Holzkirchen. o.J.
- [IFB 2004] Institut für Bauforschung e.V. Lebensdauer der Baustoffe und Bauteile zur Harmonisierung der wirtschaftlichen Nutzungsdauer im Wohnungsbau. Hannover. 2004.
- [Lindenborn 2010 09 09] Persönliche Mitteilung M. Lindenborn, Büro für Tragwerksplanung und Bauphysik vom 9. September 2010
- [Lindenborn 2010 10 13] Persönliche Mitteilung M. Lindenborn, Büro für Tragwerksplanung und Bauphysik vom 13. Oktober 2010
- [Ostendorf 2010 09 22] Ostendorf, T. Schreiben vom 22. September 2010 an Stephanswerk.
- [Ostendorf 2010 10 14] Ostendorf, T. Schreiben vom 14.10.2010 an Bremer Energie Institut
- [Ostendorf 2010 10 20] Ostendorf, T. Schreiben vom 20.10.2010 an Bremer Energie Institut
- [Ostendorf 2010 11 23] Ostendorf, T. Schreiben vom 23.11.2010 an Bremer Energie Institut
- [Richter 2011 01 24] Richter, C. Schreiben vom 24.01.2011 an das Bistum Osnabrück, Herrn Reinartz
- [statista 2013] Inflationsrate in Deutschland von 1992 bis 2011, Download unter:  
<http://de.statista.com/statistik/daten/studie/1046/umfrage/inflationsrate-veraenderung-des-verbraucherpreisindex-zum-vorjahr/>, Zugriff am 04.04.2013
- [Stephanswerk 2010] Detailzeichnung, Details Anschlüsse Außenwand. Stephanswerk 04.05.2010
- [UK NRW, 2012] Unfallkasse Nordrhein-Westfalen: Sichere Schule – Gesundheits- & lernförderndes Klassenzimmer, Düsseldorf 2012
- [VDI 2067] Verein Deutscher Ingenieure. VDI-Richtlinie 2067. Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen. Düsseldorf
- [Wärmeschutznachweis neu] Schulstiftung im Bistum Osnabrück, Energieeffiziente Sanierung, Klassentraktgebäude des Gymnasiums St. Angela in Osnabrück, Wärmeschutznachweis nach DIN V 18599 Klassentrakt saniert / Prognose nach Sanierung



## Erhebungsbogen zur Optimierung der technischen Anlagen des Klassentrakts der Angelaschule, Osnabrück

Das Bremer Energie Institut begleitet die energetische Sanierung der Angelaschule und erfasst in diesem Zusammenhang auch die auftretenden technischen Mängel. Bei diesen technischen Mängeln geht es im Wesentlichen um Raumtemperatur, Raumluftqualität und Beleuchtung, z.B. wenn morgens bei Schulbeginn die Raumtemperatur ggf. nur 15°C betragen würde.

Bitte halten Sie solche festgestellten Mängel anhand dieses Erhebungsbogens fest und leiten den Bogen dann weiter an die Schulleitung, Frau Timpe–Urban.

Ihr Name: .....

Ihre Email–Adresse: .....

Der technische Mangel wurde in Raum Nr. .... festgestellt.

Datum des Mangels: ..... Uhrzeit: .....

### Festgestellter Mangel:

Raumtemperatur, Details:

.....  
.....  
.....

Raumluftqualität, Details:

.....  
.....  
.....

Beleuchtung, Details:

.....  
.....  
.....

Sonstiges

.....  
.....  
.....

Bei Rückfragen wenden Sie sich bitte an:

Bremer Energie Institut  
Dipl.–Ing. Elisabeth von Hebel  
Tel: 0421–2004890

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!



# HILH

Lüftung/Klima  
Heizung/Sanitär  
Gebäudetechnik

Mitgliederausgabe des VDI für Technische Gebäudeausrüstung



367

3677 PVSF  
\*10602292#006/2013\*  
Springer-VDI-Verlag, Post: 10 10 22, 40001 Düsseldorf  
Deutsche Post  
Herrn  
Carsten Richter  
Heinrich-Röper-Weg 11  
49082 Osnabrück

Klimatechnik

höhere  
wartet

Kühlen durch Abwärme

Themenschwerpunkt  
Energieeinsparung

### Luftqualität

# Schulsanierung

Monitoring zeigt höhere Einsparung als erwartet

**Klaus-Dieter Clausnitzer,  
Max Fette, Bremen**

Die energetische Sanierung von Schulen bei Verbesserung der Luftqualität, der Beleuchtung und des sommerlichen Wärmeschutzes ist nicht einfach, aber spätestens seit den Millionen aus dem Konjunkturprogramm II seit 2010 eigentlich Alltagsgeschäft. Doch wenig weiß man darüber, welcher Energieverbrauch sich nach Abschluss der Arbeiten einstellt und ob die Luftqualität wirklich stark verbessert wurde. Ein Schulträger wollte es genauer wissen und sorgte in einem Modellprojekt für ein zweijähriges Monitoring einer frisch modernisierten Schule. Die Ergebnisse des beauftragten Bremer Energie Instituts überraschen positiv: Es wurde noch mehr eingespart als erhofft.

In Deutschland gibt es über 45 000 Schulen, die teils über mehrere Gebäude verfügen. Aufgrund sinkender Schülerzahlen werden kaum noch neue Schulen gebaut. Umso wichtiger ist es daher, bei der zukunftsfähigen Modernisierung von Schulgebäuden drastisch Energie einzusparen und die Lernbedingungen zu verbessern, auch durch eine Verbesserung der Raumluft.

### Die Angelaschule

Die Schulstiftung im Bistum Osnabrück ist seit 2007 Träger von 16 katholischen Schulen aus den Regionen Bremen, Osnabrück und Emsland. Sie wird durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt dabei gefördert, Erfahrungen aus der ökologischen Sanierung eines Klassentraktes der Angelaschule Osnabrück der Allgemeinheit zur Verfügung zu stellen. Diese Schule ist ein vierzügiges

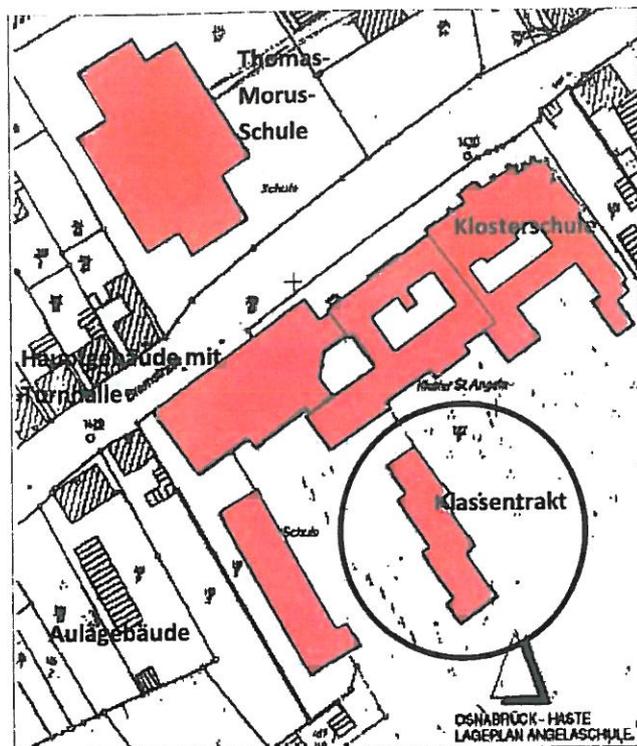


Bild 1

### Lageplan des sanierten Klassentraktes

Gymnasium mit mehr als 1 000 Schülerinnen und Schülern. Baulich besteht ein Verbund mit zwei anderen Schulen. An diesem Ensemble wurde 2007 begonnen zu modernisieren und u. a. die veraltete Heizungsanlage ausgetauscht. Unsaniert blieb zunächst das so genannte Klassentrakt-Gebäude, siehe Bild 1 und Bild 2.

Seit 2010 wurden am Klassentrakt (ca. 2 670 m<sup>2</sup> BGF, Netto-Fläche ca. 2 000 m<sup>2</sup>, davon 1 200 m<sup>2</sup> für Klassenräume) mit Unterstützung durch das Bundesministerium für Umwelt Energie sparende Maßnahmen vorgenommen. Mit Blick auf die Klimaschutzziele für 2050 sollte der Energiebedarf erheblich reduziert und der verbleibende Wärme- und Kältebedarf weitgehend mit regenerativen Energien gedeckt sowie die Innenraumluftqualität und die Behaglichkeit verbessert werden.

Die Baumaßnahmen begannen im Mai 2010 und wurden im Wesentlichen im Oktober 2010 abgeschlossen.

### Wissenschaftliches Monitoring

Es gelang, die Deutsche Bundesstiftung Umwelt für die Finanzierung einer wissenschaftlichen Begleitung zu interessieren. Das Projekt wurde sehr willkommen geheißen, denn man hatte bereits die Erfahrung gemacht, dass prognostizierte Einsparungen in der Realität nicht erreicht werden, ohne das klar wurde, warum nicht. Mit dem Monitoring wurden folgende Ziele verfolgt: 1. Gewinnung systematischen Feedbacks, um den Betrieb der Anlagen zu

### Autoren



**Dr.-Ing. Klaus-Dieter Clausnitzer**, Jahrgang 1955, Architekt, kam 1990 ans Bremer Energie Institut. Er ist vor allem in den Bereichen Gebäudeenergieeffizienz, Erfolgskontrolle und Energiedienstleistungen tätig und u. a. Mitglied des wiss. Beirats der VdZ, des ZVSHK und der Jury der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.



**Dipl.-Ing. Max Fette**, Jahrgang 1974, ist Maschinenbauingenieur und seit 2009 am Bremer Energie Institut tätig. Er beschäftigt sich hauptsächlich mit den Themen Kraft-Wärme-Kopplung und Erneuerbare Energien, z. B. mit dem Projektmanagement, der technischen Auslegung und der Bewertung im Rahmen von Studien.



Bild 2  
Klassentrakt vor Modernisierung

optimieren, wobei die Akzeptanz der Nutzer eine wichtige Rolle spielt  
2. Gewinnung wissenschaftlich abgesicherter Erkenntnisse, um ggf. andere Schulen ggf. auf ähnliche oder noch verbesserte Weise modernisieren zu können  
3. Kommunikation der Erkenntnisse an die Öffentlichkeit, auch um Material für Nachahmer zur Verfügung zu stellen.

Das Monitoring geht weit über das hinaus, was ein Schulträger mit eigenen Kräften zu leisten vermag. Während sich die Gebäude- und Technikplaner nach Fertigstellung eines Gebäudes naturgemäß anderen Aufgaben widmen müssen, blieb also die wissenschaftliche Begleitung noch zwei Jahre „am Ball“. Diese Vorgehensweise ist der Erkenntnis geschuldet, dass bei komplexen Modernisierungen nach Fertigstellung noch Eingregulierungsarbeiten vorgenommen werden müssen bzw. „Neubaufeuchte“ trocken geheizt und gelüftet werden muss und sich die tatsächliche Einsparung erst nach ein bis zwei Jahren offenbart. Gerade eine Betrachtung unter Berücksichtigung gesicherter Erkenntnisse nach einer gewissen Zeit ist jedoch für potenzielle Nachahmer wichtig, um Klimaschutzmaßnahmen in den jeweiligen Gremien der Institutionen und bei finanzierenden Stellen besser durchsetzen zu können, aber auch, um eventuelle Fehlentwicklungen zu erkennen.

Das Monitoring umfasste die ersten beiden Betriebsjahre. Weil zunächst noch nicht alle Anlagen richtig eingestellt waren und noch weitere Zwischenzähler eingebaut werden mussten, umfasste das Monitoring letztlich die Zeit vom 1.2.2011 bis 31.1.2013.

## Die durchgeführten Maßnahmen

Beim sanierten Klassentrakt von 1965 handelt es sich um 18 Klassenräume von ca. 55 m<sup>2</sup>. Er wurde in Stahlbetonskelettbauweise mit einer Verblendschale aus Klinkern ausgeführt. Alle für eine solche Schule typischen Probleme waren vorhanden:

- Nicht mehr zeitgemäßer Wärmeschutz und ebensolche Fenster
- Veraltete Heiztechnik, inkl. schlecht gedämmter unzugänglicher Verteilungen und veraltetete Regelung
- Schlechte Luftqualität wegen unzureichender Fensterlüftung
- Veraltete Beleuchtung
- Im Sommer z. T. viel zu hohe Raumtemperaturen.

Dem Schulträger lag sehr an einer nachhaltigen, umfassenden Modernisierung unter Einschluss der Verbesserung des Wärmeschutzes, der Beleuchtung, der Luftqualität, der Beheizung und der Behaglichkeit. Und das natürlich mit umfassender Energie-, Energiekosten- und CO<sub>2</sub>-Einsparung bei niedrigen Baukosten und niedrigen sonstigen Folgekosten wie Wartung und Instandhaltung. Die Beleuchtungsplanung wurde vom Ing.-Büro Jacobi und Richter (Osnabrück), die TGA-Planung vom Ing.-Büro Ostendorf (Ibbenbüren) und die Bauleitung von Stephanswerk Wohnungsbau GmbH des Bistums Osnabrück übernommen.

## Wärmeschutz

Erstens um das Erscheinungsbild des Gebäudes zu erhalten, zweitens um den späteren Instandhaltungsaufwand zu minimieren (Anstrich Außenwände von außen vermeiden) und drittens um eine Wandheizung zu integrieren, wurde die Klinkerfassade beibehalten. Der Wärmeschutz der Außenwände wurde deshalb durch eine Innendämmung unter Beseitigung der Heizkörpernischen und mit gleichzeitigem Einbringen einer Wandflächenheizung verbessert. Das Flachdach und die Kellerdecke wurden neu gedämmt. Die Fenster wurden gegen solche mit einer Dreifach-Verglasung mit integrierten Sonnenschutz (Jalousien) ausgetauscht. Bei allen Maßnahmen achteten die Architekten auf Wärmebrücken und luftdichte Anschlüsse.

Die **Tabelle 1** fasst die wichtigsten Merkmale zusammen.

## Luftqualität

Die Luftqualität in Schulen erhielt zu Recht in den letzten 15 Jahren zunehmend mehr Aufmerksamkeit. Nicht selten verringert sich die Qualität im Laufe eines Unterrichtstages so, dass das Lernen behindert wird. Mit Schuld daran ist das Gas CO<sub>2</sub>, das u. a. durch die menschliche Atmung in die Raumluft abgegeben wird. Allgemein wird eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1 000 ppm als maximaler Grenzwert für gute Innenraumluft angenommen.

In den Klassenräumen war im Ausgangszustand keine maschinelle Lüftung vorhanden. Die Lüftung erfolgte ausschließlich über Infiltration und Fensterlüftung. Da im Winter die Raumlufttemperaturen sowieso schon niedrig waren, wurde – wie Messungen in der Angelaschule zeigten – auch wenig über die Fenster gelüftet. Hierdurch stieg der CO<sub>2</sub>-Gehalt in den Wintermonaten in dem untersuchten Raum auf Werte zwischen 3 000 bis knapp über 5 000 ppm,

Tabelle 1

### Merkmale des Wärmeschutzes vorher -nacher

Bauteil	U Wert alt	Dämmung neu	U Wert neu
Flachdach	> 0,63	20 cm WL 035	0,19
Außenwände	1,13	10 cm + 4 cm Lehmputz	0,25/0,32
Außenwand (ehem. Heizkörpernischen)	0,92	Porenbeton + 10 cm + 4 cm Lehmputz	0,14
Kellerdecke	0,96	oben (20 mm WL 025) und unten (60 mm WL 035)	0,27/0,257/0,23
Fenster	3,0–4,7	3-S-Verglasung	1,1

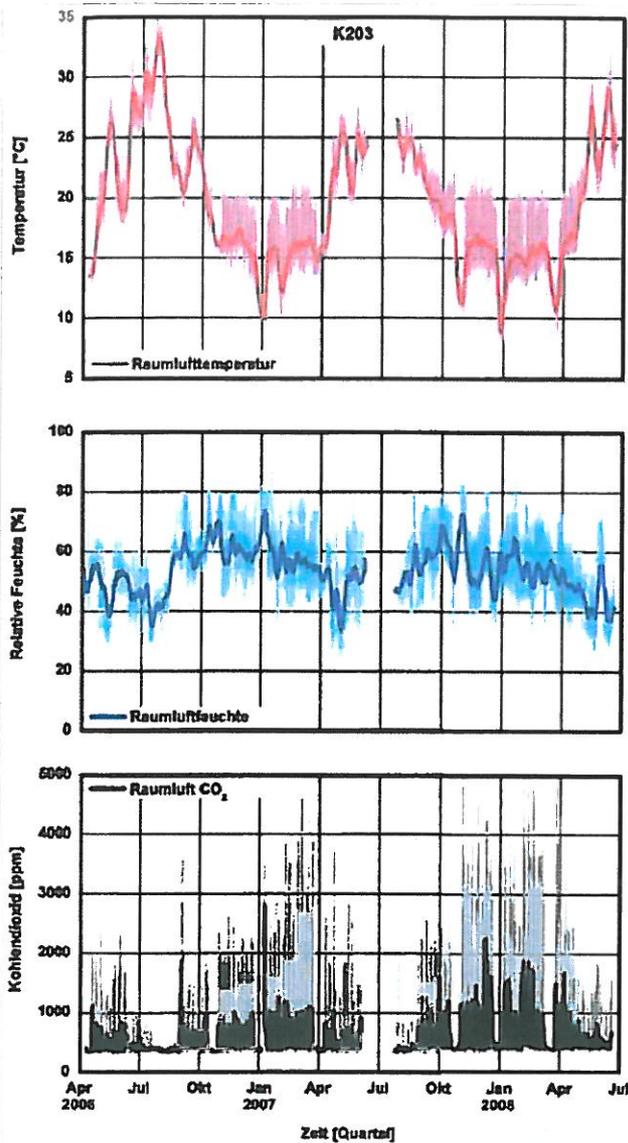


Bild 3

**Ausgangszustand: Raumklima in einem Klassenraum in einer Winterwoche Mittelwerte über 15 Minuten, gemessen im Klassenraum K203 des Klassentraktes, 16. bis 23. Februar 2008. Messung Fraunhofer IBP**

vgl. Bild 3. 50 % aller Messwerte während potenzieller Schulstunden in den Wintermonaten lagen über 1350 ppm. Mit guten Lernbedingungen haben diese Werte nichts zu tun.

Es war daher unumstritten, dass bei einer Modernisierung des Klassentrakts auch die Luftqualität verbessert werden musste, und zwar vor allem in den Wintermonaten. Eine Verbesserung ist hier mit einem höheren Luftwechsel verbunden, der wiederum potenziell zu einem höheren Energieverbrauch führt. Dieser Effekt kann mit Anlagen zur Wärme-

rückgewinnung aus der Abluft reduziert werden, vor allem, wenn solche Anlagen angepasst an die Luftqualität mal mehr, mal weniger Luft fördern. Hier wiederum machen bei Klassentrakten Anlagen keinen Sinn, die nur anhand eines „Führungsraums“ geregelt werden.

Die Lüftung wurde folgendermaßen modernisiert:

Alle Klassenräume werden über drei Gruppenlüftungsanlagen für je sechs Klassen kontrolliert be- und entlüftet, wobei eine Wärmerückgewinnung stattfindet. Die Anlagen wurden so dimensioniert, dass keine Stoßlüftung über die Fenster erforderlich ist. Um eine optimale Volumenstromanpassung zu erreichen, wurde jeder Klassenraum mit einem CO<sub>2</sub>- und Raumtemperaturfühler ausgestattet. In einem Klassenraum wurde zusätzlich die Luftfeuchtigkeit gemessen.

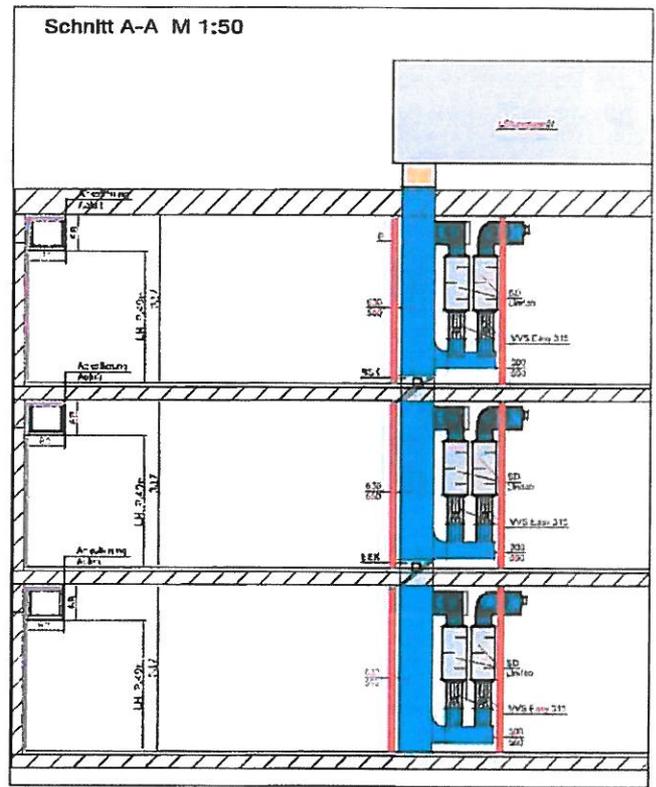


Bild 4

**Schema einer Lüftungsanlage der Angelaschule**

Bild: Ingenieurbüro Ostendorf, Ibbenbüren

Die Lüftungsanlage gestattet eine Anpassung der Luftmenge. Die Luft wird den Räumen im Deckenbereich zugeführt. Die Längen der Lüftungskanäle wurden durch die dezentrale Anordnung über je 6 Klassen minimiert. Die Druckverluste der Zuluft wurden mit ca. 120 Pa, die der Abluft mit ca. 50 Pa geplant. Die Abluft aus den Klassenräumen wird durch Überströmöffnungen den Fluren zugeführt, von dort erfolgt eine Abströmung zum Treppenhaus, von wo direkt abgesaugt wird. Um dies zu unterstützen, wurden die Eingänge ins Treppenhaus durch eine Doppeltür verändert (Schleuse).

Die Wärmepumpe ist über die Wandflächenheizung für die morgendliche Grundlast vorgesehen: Sind die Schüler dann anwesend, erfolgt die Beheizung vor allem über die Lüftungsanlage, die die Wärme der Abluft nutzt. Für die Tage, an denen der Wärmebedarf sehr hoch ist, wird die Zuluft jedes Klassenraums über Warmwasser-Heizregister nachgeheizt. Das warme Wasser hierfür wird wiederum über die Wärmepumpe bereitgestellt. Die Sanitärräume erhielten je eine eigene Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung.

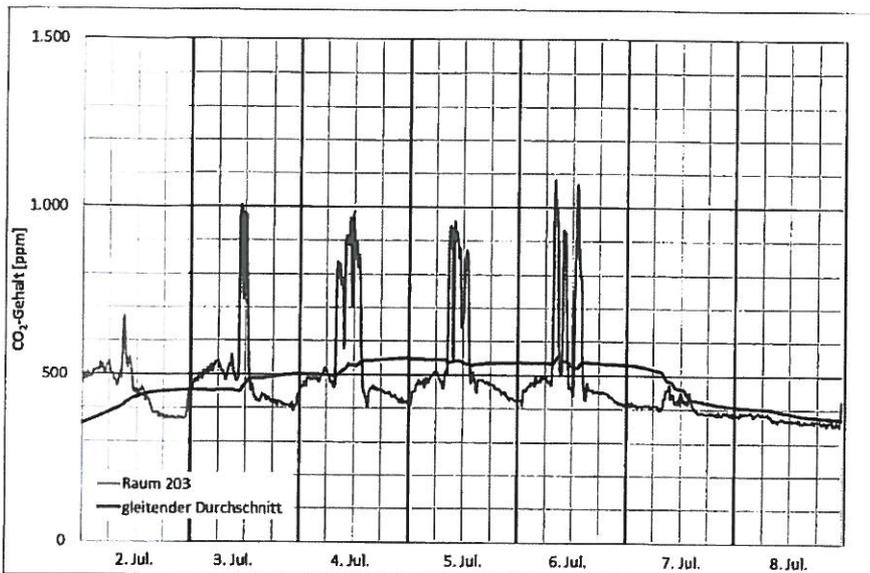


Bild 5

CO<sub>2</sub>-Konzentration, Winterwoche 2, Klassenraum 203

über die Wärmerückgewinnung aus der Abluft sowie über eine Grundwasser-Wärmepumpe erfolgen. Nur für den Fall, dass diese Systeme bei bestimmten Witterungsverhältnissen oder Nutzungsbedingungen nicht ausreichen oder gar ausfallen, erfolgt eine Wärmezufuhr über das bereits vorhandene Nahwärme-Heizsystem.

Bei der Wärmepumpenanlage (vgl. Bild 6) handelt es sich um eine Wasser-Wasser-Wärmepumpe mit einer Leistung von ca. 44 kW. Auf der Primärseite (Kaltquellenseite) wird Wasser aus einem ca. 30 m tiefen Brunnen und 10 °C Grundwassertemperatur angesaugt. Nach dem Entzug von Wärme wird das entnommene Grundwasser mit einer Temperatur von ca. 5 °C einem kleinen Bachlauf, der Nette, zugeführt.

Die Anlage zur Abluft-Wärmerückgewinnung ist im Abschnitt „Luftqualität“ skizziert.

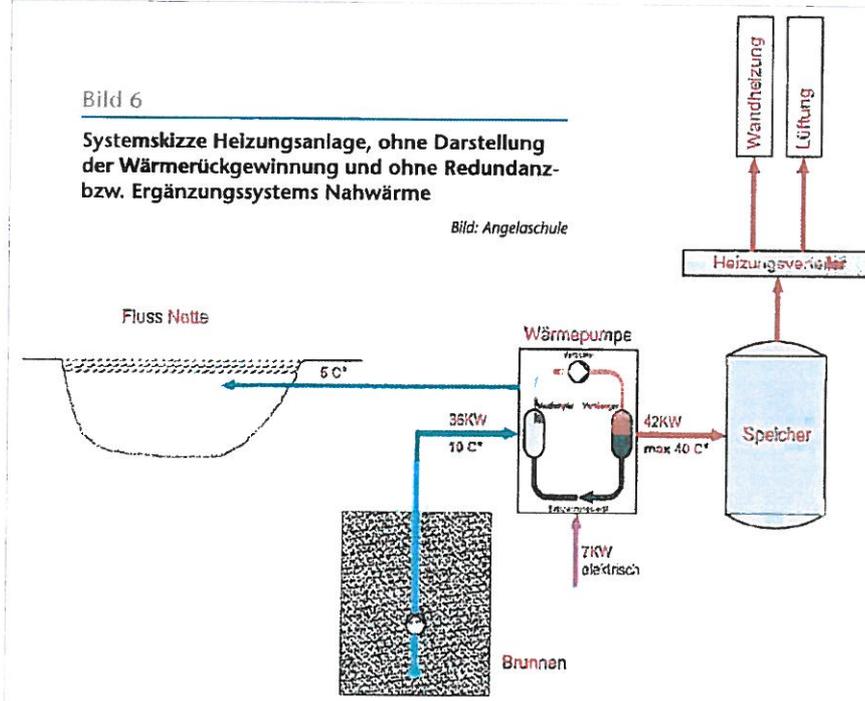
Als Redundanz-System dient der vorhandene Nahwärmeanschluss an den Wärmeverbund mit zwei anderen Schulen. In die Wärmepumpenanlage wurde ein Pufferspeicher von 2 500 l integriert. Die Wärmeverteilung erfolgt über drehzahlgeregelte Umwälzpumpen. Als Vorlauftemperatur ist 35 °C vorgesehen, als Rücklauftemperatur 30 °C. Die Wärmeübergabe erfolgt zum einen durch Wandheizungen, zum anderen durch Nachheizregister in den Lüftungsanlagen. Außerhalb der Nutzungszeit (z. B. frühmorgens) wird zunächst Wärme durch die Wandheizung abgegeben. Hierfür sind Rohrleitungen („Heizschlangen“) unterhalb der Fenster in den Lehmputz der Außenwände eingearbeitet.

Diese Heizflächen (mit einer Fläche von jeweils ca. 8 m x 0,8 m je Klassenraum) sind so ausgelegt, dass mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 40 °C eine Beheizung selbst bei Außentemperaturen von -12 °C möglich wird. Die Leistung dieser Wandtemperierung be-

Bild 6

Systemskizze Heizungsanlage, ohne Darstellung der Wärmerückgewinnung und ohne Redundanz- bzw. Ergänzungssystem Nahwärme

Bild: Angelaschule



Das Bild 4 zeigt ein Schema für eine der drei Lüftungsanlagen für die Klassenräume.

Das Bild 5 zeigt den CO<sub>2</sub>-Gehalt im Klassenzimmer 203 in einer typischen Winterwoche. Im Vergleich zu den im Bild 3 gezeigten Werten, die vor der Sanierung aufgezeichnet wurden, ist zu sehen, dass die Maximalwerte nun deutlich niedriger liegen. Während vor der Sanierung an jedem Wochentag Werte von teils deutlich über 3 500 ppm auftraten, liegt die Mehrzahl der Werte nun bei unter 1 000 ppm.

Deutlich zu sehen sind die jeweiligen Zeiten des Unterrichtsbeginns, welcher

sich durch eine schnell steigende CO<sub>2</sub>-Konzentration bemerkbar macht.

### Beheizung

Im modernisierten Zustand soll die Beheizung des Klassentraktes vorrangig

**ORCA AWA**

Ausschreibung • Vergabe • Abrechnung



Testversion kostenlos downloaden

[www.orca-software.com/ava](http://www.orca-software.com/ava)

trägt ca. 360 W je Klassenraum. Die Wandheizung soll zwei Funktionen erfüllen:

1. Erhöhung des Komforts an Tagen mit Außentemperaturen unter 0 °C. Die einfallende Kältestrahlung durch das Fenster soll an kalten Außentagen über die Wandheizung kompensiert werden.
2. Falls die Räume in der kalten Jahreszeit unter 15 °C abkühlen, findet in erster Sequenz die Beheizung über die Wandheizung statt. So wird auch elektrische Antriebsenergie am Lüftungsgerät eingespart.

Die Wandheizung (Bild 7) erhält die Wärme von der Wärmepumpe (bzw. im Bedarfsfall vom Nahwärmesystem).

Für die Beheizung während der Nutzungszeit (nach der Aufheizphase) soll überwiegend die Abwärme der Schüler und der Beleuchtung verwendet werden. Bei einem durchschnittlichen Klassenraum von ca. 60 m<sup>2</sup> und 30 Schülern in einem gut gedämmten Gebäude ist zu erwarten, dass die Wärmeabgabe der Schüler und der künstlichen Beleuchtung zur Beheizung des Klassenraumes bis zu einer Außentemperatur von -5 °C ausreicht, wenn die Wandheizung die notwendigen 19 bis 20 °C zu Unterrichtsbeginn hergestellt hat.

Tabelle 2

**Endenergie sowie CO<sub>2e</sub>-Emissionen für Beleuchtung, Raumwärme und Warmwasser und sonst. Nutzungen, witterungsbereinigt**

	Vor Modernisierung	Nach Modernisierung		Reduktion
		Jahr 1	Jahr 2	
Endenergie kWh/(m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> *a)	238,7	21,7	20,1	91 bzw. 92 %
CO <sub>2e</sub> -Emissionen kg/(m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> *a)	63,1	11,9	11,1	81 bzw. 82 %

Anlage	Verbrauch Jahr 1 (witterungsbereinigt) kWh/(m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> *a)	Verbrauch Jahr 2 (witterungsbereinigt) kWh/(m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> *a)
Strom für Lüftung der Klassenräume	4,5	4,3
Strom für die Wärmepumpe	7,2	6,1
Hilfsenergie Heizung	0,8	0,6
Strom für Beleuchtung und Steckdosen in Klassenräumen	1,3	1,3
Nahwärme (Redundanz-System)	3,3	3,0
Strom: Sonstiger Verbrauch	4,6	4,8
<b>Summe Endenergieverbrauch</b>	<b>21,7</b>	<b>20,1</b>

Über drei Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung soll der Wärmeinhalt der „verbrauchten“ Luft zu ca. 90 % auf die Zuluft übertragen werden, die den Klassenräumen zugeführt wird. Während der Nutzungszeit soll daher keine weitere Heizenergie für den Klassenraum benötigt werden.

Auch die Zuluft-Nacherhitzer werden über die Wärmepumpe gespeist (bzw. im Bedarfsfall über das Nahwärmesystem). Eine elektrische Nacherhitzung erfolgt nicht.

Die Leistung der Lufterwärmer beträgt jeweils 3,7 kW pro Klassenraum (bezogen auf 35 / 30 °C).

Jeder Klassenraum erhielt ein Zonenventil. Damit ist eine individuelle Temperatursteuerung jedes einzelnen Klassenraums möglich. Auch ist es möglich, außerhalb der normalen Unterrichtsstunden einzelne Klassenräume getrennt zu beheizen.

### Beleuchtung

Alle Klassenräume waren und sind hauptsächlich Tageslicht-belichtet. Als ergänzende Beleuchtung kamen je acht Wannenleuchten mit 2 x 58 W Leuchtstoffröhren und konventionellen Vorschaltgeräten zum Einsatz; die Außenleuchten waren mit Glühlampen bestückt. Anlässlich der Modernisierung wurde die gesamte alte Beleuchtung demontiert. Zur Planungs- und Installationszeit (2010/11) waren LED noch nahezu unerschwinglich. Deshalb wurden in den Klassenräumen T16-Leuchtstofflampen mit elektronischen Vorschaltgeräten eingesetzt. Dabei wurde auf



Bild 7

### Wandheizung vor dem Einputzen

Blendfreiheit geachtet. Die künstliche Beleuchtung wird abhängig vom einfallenden Tageslicht raumweise geregelt. Zusätzlich werden über Präsenzmelder Bewegungen registriert. Ist in einer vor-eingestellten Zeit keine Bewegung zu verzeichnen, wird die Beleuchtung ausgeschaltet. Grundsätzlich kann die künstliche Beleuchtung auch über einen klassischen Schalter ein- und ausgeschaltet werden.

Durch die in den neuen Fenstern integrierten Verschattungslamellen soll auch eine Lichtlenkung erfolgen.

Die gesamte installierte Leistung für Beleuchtung betrug vorher 22,0 kW, nach der Modernisierung nur noch 13,3 kW.

### Kosten der Modernisierung

Die Baukosten (ohne Baunebenkosten, jedoch inkl. MwSt.) beliefen sich auf ca. 2,24 Mio. Euro, die Baunebenkosten auf ca. 462 000 Euro. Es ergeben sich Modernisierungskosten von ca. 1 000 Euro/m<sup>2</sup> BGF. Diese Kosten sind nicht voll-

Tabelle 3

**Endenergieverbrauch, Messzeitraum zwei Jahre**

umfänglich einer energetischen Sanierung zuzurechnen. Die energetisch relevanten Sanierungskosten betragen 1,18 Mio. bzw. 647 000 Euro mit bzw. ohne Lüftungsanlage.

Auf den Quadratmeter Bruttogeschossfläche bezogen ergeben sich damit energetisch relevante Baukosten von ca. 440 Euro/m<sup>2</sup> BGF mit bzw. ca. 240 Euro/m<sup>2</sup> BGF ohne Einrechnung der Lüftungsanlage.

### Energie vorher – nachher

Weil der Klassentrakt Teil eines Gebäudeensembles ist und für ihn für den Ausgangszustand keine separaten Verbrauchswerte vorlagen, musste auf Schätzungen zurückgegriffen werden. Für den Neuzustand liegen dagegen Messwerte vor. Diese unterlagen dem Einfluss des Wetters des Beobachtungszeitraums. Deshalb wurde eine Witterungsbereinigung nach dem Energieausweis-Verfahren der EnEV2009 durchgeführt.

Für den Ausgangszustand lagen für den Wärmeverbrauch drei verschiedene Bedarfsberechnungen vor, eine Abschätzung für den Beleuchtungsstromverbrauch und eine für die Hilfsenergie der Wärmeversorgung. Aus den drei Werten für die Wärme wurde das arithmetische Mittel gebildet. Die Ergebnisse bezüglich der Endenergie sowie der CO<sub>2</sub>-Emissionen zeigen **Tabelle 2** und **Tabelle 3**.

### Feedback

Innerhalb des Monitorings wurden mehrere Befragungen der Nutzer der Schule vorgenommen. Dabei wurde vor allem gefragt, welche Mängel es bezüglich der Beheizung, Beleuchtung und Belüftung gibt. Die Fragebogen wurden gesammelt, ausgewertet und die dort genannten Märsen und Verbesserungsvorschläge von der Schule für die Optimierung der Einstellung der Anlagen genutzt. Überwiegend wurden die Temperaturen, die Luftqualität und die Beleuchtung als sehr angenehm empfunden. Es gab aber auch Mängelnennungen wie ein zu starker Luftzug, schlechte Luftqualität, wechselnde Temperaturen, und Bitten um eine separat auszuschaltende Tafelbeleuchtung.

### Fazit / Ausblick

Bei der Modernisierung von Schulen geht es um eine Verbesserung der Lernsituation, aber fast immer auch um Energieeinsparung. Hierbei sind Lüftung, Beleuchtung und Temperaturen wichtigen Faktoren. Man kann nicht immer davon ausgehen, dass sich die Modernisierung allein aus der Energieeinsparung bezahlt macht: Zu hoch ist in der Regel der Nachholbedarf in Bezug auf die Luftqualität und andere Parameter der Behaglichkeit. Das zweijährige Monitoring einer Schule hat gezeigt, dass der Energieverbrauch reduziert, die Raumluft- und die Beleuchtungsqualität deutlich verbessert werden können. Es hat aber auch gezeigt, dass man mit heutiger Messtechnik laufend neue Ansätze zur weiteren Verbesserung der Anlageneinstellungen gewinnt und das obwohl bereits 90 % Energie eingespart wurde. Was die Praxis braucht, sind neue Dienstleistungen, um das Beste aus den installierten Anlagen herauszuholen. Dies können jedoch weder Planer noch Errichter unbezahlt leisten.

Jetzt online anfordern:  
Minol-Geräte- und Zubehörkatalog  
[handwerker.minol.de/bestellung](http://handwerker.minol.de/bestellung)

*Gestern bestellt –  
heute montiert.*

### EnergieTechnik

Ihre Montage stockt, weil Ihnen Geräte oder Montagezubehör fehlen. Kein Problem. Alle Minol-Standardprodukte\* liefern wir Ihnen innerhalb von 24 Stunden.

Auch unseren Minoblock<sup>®</sup> micro erhalten Sie innerhalb eines Werktages in Ihre Werkstatt oder direkt auf die Baustelle geliefert – zuverlässig, bundesweit.

Nicht nur, dass der Minoblock<sup>®</sup> micro mit 150 mm Breite, 120 mm Höhe und 47 mm Tiefe der kleinste Wasserzählerblock der Welt ist, den Minoblock<sup>®</sup> micro gibt es in Kürze auch in Rotgussausführung. Und jede micro-Messkapsel ist serienmäßig mit einem Rückflussverhinderer ausgestattet.

Gleich bestellen: **Kostenlose Bestell-Hotline 0800 1115555**. Weitere Informationen unter [minol.de](http://minol.de).

**Minol**  
Alles, was zählt.

\*Alle Minol-Standardprodukte in unserem Geräte- und Zubehörkatalog