

Bewilligungsempfänger:

Stadt Nordhorn - Hochbauamt
Bentheimer Str. 14, 48522 Nordhorn

**„Neubau des „Schulzentrums Mitte“ in Nordhorn
in einem dem Passivhausstandard angenäherten
Energiestandard unter besonderer
Berücksichtigung der Raumlufthqualität“**

Zwischenbericht (Abschluss Teil 1)

über ein Forschungsprojekt, gefördert unter dem Az 24515-25
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Kooperationspartner und Verfasser:

Architektur Contor Müller Schlüter
Dipl. Ing. Michael Müller
Prof. Christian Schlüter
Hofaue 55, 42103 Wuppertal,
info@acms-architekten.de

Architektur- und Ingenieurbüro Bouws
Dipl. Ing. Johann Bouws
Neuenhauser Str. 196, 48527 Nordhorn
architektur@bouws.de

Büro für umweltverträgliche Energiesysteme
Ingenieurbüro Morhenne & Partner GbR
Dr. Ing. Joachim Morhenne
Schülkestr. 10, 42277 Wuppertal
info@morhenne.com

Projektkennblatt

Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung	4
2.	Einleitung	6
2.1.	Aktuelle Problemstellung und Stand des Wissens und der Technik	6
2.2.	Umweltrelevanz	7
2.3.	Zielsetzung und Anlass des Bauvorhabens	8
2.3.1.	Zielsetzung	8
2.3.2.	Anlass	9
3.	Projektphase 1	15
3.1.	Planung und Ausschreibungsverfahren mit 3 Gebäudestandards	15
3.1.1.	EnEV-Standard ohne Lüftung	17
3.1.2.	EnEV-Standard mit Lüftung	17
3.1.3.	Passivhausstandard	18
3.1.4.	Wirtschaftlichkeit des Passivhausstandards	19
3.2.	Simulation des Passivhausstandards	20
3.2.1.	Einführung und Vorgehensweise	20
3.2.2.	Lüftung	22
3.2.3.	Heizung	28
3.2.4.	Sommerlicher Wärmeschutz	33
4.	Projektphase 2 (Ausführung im Schlussbericht)	34
4.1.	Einbau einer Lüftungsanlage zur Verbesserung der Raumluftsituation	34
4.2.	Erweiterung der Steuerung und Datenerhebung in der Gebäudeleittechnik als Grundlage für das nachgeschaltete Evaluationsverfahren im Bereich Lüftung und Heizung	34
4.3.	Erweiterung der TGA- Anlage zur Visualisierung des Gebäudebetriebs in Form einer Anzeigetafel in der zentralen Pausenhalle und Anschlüssen in der Fachklasse Chemie	34
4.4.	Zweijährige Evaluation im Schulbetrieb mit kontinuierlicher Erfassung der Verbrauchs- und Klimawerte, Einregulierung der TGA, und Erfassung der Auswirkung des Nutzerverhaltens	34
4.5.	Parallele Präsentation des Evaluationsverfahrens im Schulbetrieb, inkl. Sonderlehrveranstaltungen und besonderer Lehrmittel	34
5.	Fazit und Ausblick	35
6.	Literatur	36
7.	Anlagen	37

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Auszug aus dem zu weiteren Planung freigegebenen prämierten Wettbewerbsentwurf.....	10
Abbildung 2 Simulierter Gebäudebereich im EG mit Orientierung Süd-Ost bzw. gespiegelt mit Orientierung Nord-West und Lage im OG	21
Abbildung 3: CO ₂ -Konzentration in einer Klasse in Abhängigkeit der personenbezogen zugeführten Luftmengen und der Unterrichtszeit bei Verdrängungslüftung	23
Abbildung 4: CO ₂ -Konzentration in einer Klasse in Abhängigkeit der personenbezogen zugeführten Luftmengen und der Unterrichtszeit bei Mischlüftung	24
Abbildung 5: CO ₂ -Konzentration in einer Klasse in Abhängigkeit des Luftwechsel bei Fensterlüftung; jeder Abfall der Konzentration beruht auf einer Öffnung der Fenster.	25
Abbildung 6: Abwicklung Klassenraum	26
Abbildung 7: Ausschnitt aus der Lüftungsplanung (Obergeschoss Bauteil 1)	27
Abbildung 8: Temperaturen in einem Eckraum in einer Periode mit tiefen Außentemperaturen	29
Abbildung 9: Temperaturen im Mittelraum in einer Periode mit tiefen Außentemperaturen	29
Abbildung 10: Komforttemperatur im kritischsten Raum (Eckraum) für den Fall der Beheizung mit Nachtabsenkung auf 16°C (ein Punkt steht für den Komfort innerhalb einer Zeitspanne von 10 min) ..	30
Abbildung 11: Komfort mit einer verbesserten Aufheizregelung in Abhängigkeit der Außentemperatur, Nachtabsenkung auf 17°C, Heizbeginn 6 Uhr	31
Abbildung 12: Tagesgang von Komfort- und Raumlufttemperatur an einem typischen Tag in der Heizperiode (Außentemperatur nachts bis -5°C, tagsüber bis 4°C) Solltemperatur 20°C, Start der Heizung 6 Uhr (Ein Punkt in der Graphik entspricht einem 10 min-Wert)	32

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ergebnisse der Kostenberechnung zu den verschiedenen Ausbaustandards (detaillierte Auflistungen siehe Anlage)	16
Tabelle 2: Wirtschaftlichkeit des ausgeführten Baustandards im Schulzentrum Nordhorn	19
Tabelle 3: Energiekennzahl eines Eck- und Mittelraumes in Abhängigkeit der Beheizung	31

1. Zusammenfassung

Die Qualität und Art der Lüftung von Schulgebäuden zur Sicherung der ausreichenden Raumluft-hygiene werden seit Jahren kontrovers diskutiert. Der Handlungsbedarf zur Klärung dieses Sachverhaltes wird in der Fachwelt in den letzten Jahren zunehmend angezeigt und darauf verwiesen, dass unterstützende Lüftungsmaßnahmen notwendig sind. Ein direkter Zusammenhang zwischen Leistungsfähigkeit, Reaktionsvermögen und Aufmerksamkeit zur Luftqualität ist nachgewiesen worden.

Das Hochbauamt Nordhorn hat im vorgestellten Bauvorhaben den Versuch unternommen, exemplarisch für die zukünftigen Schulbauten der Stadt Nordhorn ein kosten- und ressourcengünstiges Konzept zu entwickeln, welches dem o. a. Sachverhalt Rechnung trägt. Ein solches Referenzgebäude für Nordhorn kann ebenfalls bundesweit relevant werden.

Das diesbezügliche Forschungsprojekt wird in zwei Projektphasen durchgeführt:

Projektphase 1 (Dokumentation der Referenzen zum Planungs- und Realisierungsverfahren)

Diese Phase ist weitgehend abgeschlossen und wird im Zwischenbericht vorgestellt.

Maßgebende Prämisse für die Planung war, die Maßnahmen zum effizienten Energiestandard unter besonderer Berücksichtigung der Raumluftqualität im Rahmen des vorgegebenen, sehr niedrigen Budgets fest zu legen.

Somit wurden parallel mit Simulationen unterstützt die technischen und baulichen Anlagen mit den jeweiligen abhängigen Wirkungsweisen untersucht und die verschiedenen Planungsstandards über differenzierte Kostenberechnungen auch ökonomisch bewertet.

Abschließend zur Entwurfsplanung wurden die nachstehenden Kosten als Entscheidungsvorlage ermittelt (Kostengruppe 300 und 400, inkl. 16% MwSt.):

Standard EnEV	EUR 2.797.482,00
Standard EnEV mit Lüftung	EUR 3.043.802,00
Passivhausstandard	EUR 3.082.140,00
Mindestkostenindex BKI	EUR 3.316.500,00

Auffallend ist, dass der wesentliche Investitionskostenunterschied zwischen den Varianten mit und ohne Lüftungsanlage besteht. Die vergleichsweise sehr geringen Zusatzkosten, die bei einer weiterführenden Anhebung auf Passivhausstandard entstehen, können vernachlässigt werden. In der später beschriebenen Betrachtung zu den Auswirkungen auf die Betriebskosten wurde aufgezeigt, dass in jedem Fall eine Kopplung von maschineller Lüftung und Verbesserung des Energiestandards auf Passivhausstandard durchgeführt werden sollte.

Die Werte der Kostenberechnung wurden über die Ausschreibungsergebnisse bestätigt. Verbunden mit den Einsparungen in den Betriebskosten konnte somit die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Ausführungsvarianten eindeutig zu Gunsten des Passivhausstandards entschieden werden.

Die parallel zur Planung des Schulzentrums Mitte durchgeführten Simulationen haben die in der Fachliteratur aufgezeigten Lüftungsabhängigkeiten bestätigt. Auch für diese Schule konnte nachgewiesen werden, dass die Fensterlüftung selbst bei optimistischen Annahmen keine ausreichende Luftqualität im Schulbetrieb liefern kann.

Detailliert aufgezeigt wurde, dass mit einer Mischlüftung in eingeschränkter Weise und mit einer Verdrängungslüftung uneingeschränkt die CO₂-Konzentration in den Klassenräumen unter einem Grenzwert von 1.500 ppm gehalten werden kann. Eine zusätzliche Fensterlüftung ist möglich, jedoch nicht erforderlich.

Die durchgeführten Simulationen umfassten drei Themenbereiche, Lüftung und Raumqualität, Heizung und Energiebedarf sowie den sommerlichen Komfort. Evident ist, dass sowohl Heizung und Lüftung, als auch Maßnahmen zum Sonnenschutz und sommerlichem Wärmeschutz nicht unabhängig voneinander gesehen werden können, sondern sich vielmehr beeinflussen. Gerade in energetisch optimierten Gebäuden spielt die exakte Abstimmung eine wesentliche Rolle.

Projektphase 2 (Evaluation in der Nutzung über 2 Jahre und Feinjustage des Gebäudes)

Im Nachgang zur Realisierung erfolgt eine Evaluation in den ersten beiden Nutzungsjahren. Ziel der Evaluierung ist, die Luftqualität und den Aufwand zur Lüfterneuerung mit seinem Energiebedarf für Wärme und Antrieb zu ermitteln und weiterhin den Anlagenbetrieb bzgl. dieser Parameter zu optimieren. Die konzipierte Anlage ist bewusst mit geringem technischem Aufwand realisiert worden, um die Kosten gering halten zu können. Die Art und Umsetzung der Aufgabe ist daher kritisch zu prüfen und einer Bewertung zu unterziehen, um für künftige Planungen bessere Vorgaben machen zu können.

Die diesbezüglichen Ergebnisse werden im Endbericht dokumentiert.

Vorläufiges Fazit

Unabhängig von der noch durchzuführenden Feinjustage kann bereits nach der 1. Projektphase grundsätzlich festgestellt werden, dass die maschinelle Lüftung der Klassenräume auf jeden Fall mit einer energetischen Optimierung weit unter die Forderungen nach EnEV (hier Passivhausstandard) gekoppelt werden sollte.

Die mit der Installation einer Lüftungsanlage einhergehenden erhöhten Investitionskosten können so über die Reduzierung der Betriebskosten (reduzierter Wärmebedarf) kurz- bis mittelfristig kompensiert werden.

Ebenfalls aufgezeigt werden konnte, dass die Qualitätsanhebung des Schulstandards auf eine Ausführung mit der notwendigen Lüftungsanlage bzw. auf Passivhausstandard nicht unbedingt mit einer Anhebung des Baukostenindex einhergeht. Nachgewiesen wurde, dass bei engagierter integraler Planung ein solcher Standard durchaus im üblichen Kostenrahmen nach BKI realisierbar ist.

2. Einleitung

2.1 Aktuelle Problemstellung und Stand des Wissens und der Technik

Die Qualität und Art der Lüftung von Unterrichtsräumen in Schulgebäuden zur Sicherung der ausreichenden Innenraumlufthygiene werden seit Jahren kontrovers diskutiert. Dringend benötigte, angepasste Normen oder Richtlinien liegen zurzeit nicht vor.

In der Presseinformation 87/2004 empfiehlt das Umweltbundesamt (UBA) den Schulbehörden: „*Das regelmäßige Reinigen und Lüften in Schulen sollte aus hygienischen und gesundheitlichen Gründen nicht vernachlässigt werden.*“

Ursache für den Appell: „*..... weiterhin treffen im UBA regelmäßig Anfragen zur Qualität der Raumluft in Schulen ein. Insbesondere die Konzentration von Kohlendioxyd und Gerüchen in der Raumluft sind immer wieder ein Thema. In einer in diesen Tagen veröffentlichten Untersuchung des Landesamts für Arbeitsschutz und technische Sicherheit in Berlin wurden in 40 Schulgebäuden erhöhte Konzentrationen an Feinstaub und Kohlendioxyd gemessen – Ursache: mangelnde Reinigung und unzureichendes Lüften.*“

Neben dem Verweis auf den Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden werden in der o. a. Presseinformation 87/2004 immer noch Vorschläge zur normalen Fensterlüftung unterbreitet, die nach dem aktuellen Diskussionsstand der Fachwelt nicht realisierbar sind.

Im angeführten Leitfaden, der 2000 von der Innenraumlufthygiene- Kommission des UBA's erarbeitet wurde, wird der Mangel der existierenden Innenraumlufthygiene in Schulen beschrieben. Das grundsätzliche Festhalten an der Fensterlüftung wird durch vage Ergänzungen bzgl. Sondermaßnahmen relativiert, die der Klärung des Sachverhaltes nicht dienen. Auch wird dem Ziel dieses Leitfadens, den Verantwortlichen und Nutzern von Schulen Hilfestellungen zur Entwicklung von Strategien zu geben, genau in diesem Punkt eben nicht entsprochen.

Im April 2003 wird beispielsweise im Endbericht zur Innenraumsituation in oberösterreichischen Pflichtschulen, Berufsschulen und landwirtschaftlichen Fachschulen, herausgegeben von BOKU, seibersdorf research, AGES und INNENRAUM Mess & Beratungsservice unter 6.1.3 genau zu diesem Sachverhalt, basierend auf den durchgeführten Messergebnissen folgendes klargestellt: „*Grenzwerte für CO₂ sind in Österreich nicht vorhanden. Im deutschen Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden (Umweltbundesamt 2000) wird die Meinung vertreten, dass zur Einhaltung des hygienischen Bereiches von unter 1500 ppm CO₂ ein 3- bis 4- facher Luftwechsel pro Stunde erforderlich ist, dies würde allerdings in der Praxis nur durch eine Klimaanlage bzw. Lüftungsanlage mit hohem Luftwechsel erreicht werden können.*“ Im Weiteren wird ausgeführt, dass, unabhängig von dem noch festzulegenden Grenzwert für die Kohlendioxydkonzentration zwischen 1000 und 1500 ppm und der tatsächlich benötigten Luftwechselrate, insbesondere in der Heizperiode ein Überschreiten des Hygienebereiches nur mit Fensterlüftung nicht zu vermeiden ist /1,2/.

Ergänzende Untersuchungen des Passivhaus Institutes haben diese Aussagen mit durchgeführten Messreihen bestätigt.

In der auf diese Themenstellung spezialisierten Fachtagung „Passivhaus-Schulen“ des Institutes hat sich der Arbeitskreis kostengünstiger Passivhäuser am 20. und 21. Oktober 2005 in Alsdorf dieser Problematik angenommen.

Anwesende Vertreter des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung und des Hessischen Kultusministerium haben ebenfalls auf den dringenden Handlungsbedarf in diesem Thema hingewiesen.

Aufgrund der durchgeführten aktuellen Untersuchungen zur Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden sind augenscheinlich unterstützende Lüftungsmaßnahmen notwendig, auch wenn der Gesetzgeber zu diesem Punkt keine verbindlichen Vorgaben macht.

Da Lüftungsanlagen jedoch zunächst einmal zusätzliche Investitions- und Unterhaltskosten mit sich bringen, ist eine Integration dieser Anlagen in das TGA- Gesamtkonzept und eine sinnvolle Reduzierung der Luftwechselraten unumgänglich. Über eine Kopplung der Lüftungs- und Heizanlagen sowie über die Optimierung der Dämmhülle des Gebäudes kann mittels des

Passivhausstandards ein wirtschaftlicher Betrieb und eine Amortisation der zusätzlichen Investitionskosten erreicht werden.

In vielen der zu diesem Ansatz vorgestellten Prototypen sind die getroffenen Mehraufwendungen jedoch noch wesentlich zu hoch. Sie sind nur mit dem jeweiligen Forschungscharakter zu rechtfertigen.

Dringend notwendig ist es daher Standards unter raumlufthygienischen, energie- und ressourcensparenden und kostengünstigen Gesichtspunkten als allgemein gültige Handlungsleitfäden für Planer und Nutzer von Schulgebäuden zu erstellen und zugänglich zu machen.

Dieser Bericht stellt einen Beitrag zum benötigten Handlungsleitfaden dar.

2.2 Umweltrelevanz

In Deutschland ist es erklärtes umweltpolitisches Ziel, unseren Ressourcen- und a maßgebend zu reduzieren. Der Bereich Bauen und Wohnen ist das bedeutendste Gebiet dieses Verbrauchs.

Insbesondere bzgl. der Energieeinsparung wurden die Normen und Gesetze in den letzten Jahren wesentlich angepasst, wobei in Einzelfragen weiterhin umfangreicher Klärungsbedarf besteht und Normen weit hinter dem ökonomischen und ökologischen möglichen und notwendigen Standard zurückbleiben.

Die geforderte Luftdichtigkeit der Gebäude nach EnEV und weitergehender Standards vergrößert die bekannten Probleme hinsichtlich der Raumlufthygiene und Behaglichkeit in Klassenräumen. Die ausreichende Lufthygiene in hoch wärmedämmten und luftdichten Sondergebäuden, wie z. B. Schulen ist nicht mehr ausschließlich über Fensterlüftung sicher zu stellen. Hier gilt es, ressourceneffiziente, unterstützende Anlagen zu entwickeln. Sollen diese nicht contraproduktiv zur angestrebten Energiebedarfseinsparung sein, müssen sie insbesondere hinsichtlich der notwendigen Anlagenreduzierung und hinsichtlich der Betriebskosten optimierend geplant werden.

In diesem Zusammenhang zeichnet sich zurzeit wegen der nicht ausreichend vorliegenden Erfahrungswerte eine Fehlentwicklung im Schulbau auf dem Hintergrund der EnEV ab.

Heizwärmebedarfseinsparungen gehen oft zu Lasten der Raumlufthygiene und / oder der Gesamtenergiebedarf von Schulen erhöht sich auf Grund aufwändiger Technik in den Lüftungsanlagen.

An ersten Pilotprojekten wird diesbezüglich der entwickelte Passivhausstandard für Wohngebäude hinsichtlich der Übertragbarkeit auf Schulgebäude untersucht. Hier wird aufgezeigt wie energieeffiziente Schulgebäude ohne Einbußen in der Behaglichkeit funktionieren können.

Nur so können die umweltpolitischen Ziele nachhaltig umgesetzt werden.

2.3 Zielsetzung und Anlass des Bauvorhabens

2.3.1 Zielsetzung

Es fehlen in den Schulalltag umsetzbare Normen und Richtlinien zur Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden. Der Handlungsbedarf ist in der Fachwelt in den letzten Jahren zunehmend angezeigt worden. Mit diversen Studie wurde nachgewiesen, dass ein direkter Zusammenhang zwischen Leistungsfähigkeit, Reaktionsvermögen und Aufmerksamkeit zur Luftqualität besteht. /6,7,8,9/.

Das Hochbauamt hat im vorgestellten Bauvorhaben den Versuch unternommen, exemplarisch für die zukünftigen Schulbauten der Stadt Nordhorn ein kosten- und ressourcengünstiges Konzept zu entwickeln, welches dem ausgeführten Sachverhalt Rechnung trägt.

Ein solches Referenzgebäude für Nordhorn kann ebenfalls bundesweit relevant werden.

Voraussetzung hierfür ist es jedoch, dass die von spezialisierten Planern erarbeitete Ausführungsplanung über Zusatzuntersuchungen, Simulationen und Messungen differenzierter überprüft wird und die Ergebnisse ausführlich dokumentiert werden.

Ziel ist es, in einem zweigeteilten Verfahren allgemeine Planungsreferenzen für Schulgebäude mit dauerhaft sichergestellter Innenraumlufthygiene unter Berücksichtigung der Investitions- und Unterhaltskosten und eines realistischen Nutzerprofils zu erlangen:

Projektphase 1

Im ersten Projektteil sollen zunächst Referenzen zum Planungs- und Realisierungsverfahren erarbeitet und dokumentiert werden, die als Beschlussvorlage für die Freigabe zur Ausführung dienen.

Projektphase 2

Im zweiten Teil soll die Evaluation in der Nutzung über 2 Jahre erfolgen.

Ziel der Evaluierung ist, die Luftqualität und den Aufwand zur Lufterneuerung mit seinem Energiebedarf für Wärme und Antrieb zu ermitteln und weiterhin den Anlagenbetrieb bezüglich dieser Parameter zu optimieren.

Dies bedeutet Luftmengen und Luftaustausch im Schulbetrieb zu variieren, in seinen Auswirkungen zu dokumentieren und gegebenenfalls den Stundenplänen anzupassen. Dabei werden Strategien im Rahmen einer begleitenden Simulation entwickelt, mit der Anlage umgesetzt und mittels Messwerten dokumentiert.

Weitere Evaluierungsaspekte sind der sommerlicher Wärmeschutz und der Anlagenaufbau. Dazu sollen Nachtlüftung und notwendiger Energiebedarf im Hinblick auf Überhitzung und Innenraumklima untersucht werden, sowie Regelungsstrategien für diese Aspekte optimiert werden. Zu klären ist weiterhin inwieweit oder ob im Sommer während des Unterrichts auf eine maschinelle Lüftung verzichtet werden kann.

Die konzipierte Anlage ist bewusst mit geringem technischem Aufwand realisiert worden, um die Kosten gering halten zu können. Die Art der Auslegung und Umsetzung der Aufgabe ist daher kritisch zu prüfen und einer Bewertung zu unterziehen, um für künftige Planungen bessere Vorgaben machen zu können und Einfluss auf die Empfehlungen (z.B. Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV), Hinweise zur Planung und Ausführung von raumluftechnischen Anlagen für öffentliche Gebäude) nehmen zu können. Dazu werden auch Untersuchungen zur Lüftungseffektivität insbesondere bei reduzierten Luftmengen vorgesehen.

2.3.2 Anlass

Die Freiherr-von-Stein-Realschule wird um einen Hauptschul-Trakt mit 24 Klassen und 4 Fachräumen zum Schulzentrum Mitte erweitert. In dem Neubau wird ab dem Schuljahr 2007/08 auf 2.176 m² Nutzfläche der Unterricht für ca. 600 Schüler/innen stattfinden.

Mit dem zweigeschossigen Baukörper erfolgt neben den städtebaulichen und schulstrukturellen Optimierungen gleichfalls die Untersuchung und Festlegung für zukünftige Qualitätsanforderungen bzgl. der Schulbauten der Stadt Nordhorn.

Erstmalig wurden explizit in das Nutzerbedarfsprogramm Qualitätsanforderungen an die Raumluftqualitäten, thermische Behaglichkeit (Nachtauskühlung) und Reduzierung des Heizwärmebedarfs (Zielvorstellung Passivhausstandard) aufgenommen.

Ausdrücklich wurde hier festgelegt, dass diese Qualitäten in einer integrierten Planung kostengünstig zu realisieren sind, sich also im Rahmen der Standardbudgetierung realisieren lassen müssen.

Dementsprechend wurde ein fachkundiges Planungsteam über ein 2005 eingeleitetes Wettbewerbsverfahren ausgewählt.

Hierzu wurden jeweils Arbeitsgemeinschaften mit ortsansässigen Planungsbüros und spezialisierten Planern, die bereits mehrere Gebäude mit innovativen Lüftungssystemen und mit Passivhausstandard realisiert haben, gebildet.

Arbeitsgemeinschaft 1

Lindschulte Ingenieurgesellschaft mbh
Seilbahn 7, 49529 Nordhorn
Christian Beike Architekt
Kuhdamm 5, 48531 Nordhorn

Arbeitsgemeinschaft 2

Breidenbend – Pena Architekten
Janstraße 23, 48529 Nordhorn
Prof. Ludwig Rongen Architekten
Probsteigasse 2, 41849 Wassenberg

Arbeitsgemeinschaft 3

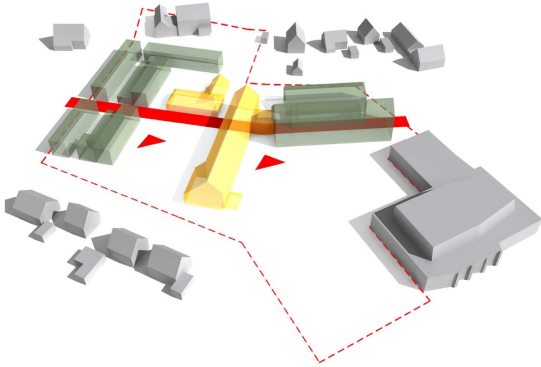
Johann Bouws, Architekt
Neuenhauserstraße 196, 48527 Nordhorn
Architektur Contor Müller Schlüter
Kolkmannhaus / Hofaue 55, 42103 Wuppertal

Arbeitsgemeinschaft 4

Gerold Potgeter + Feitsma & Egbert
Prollstraße 1, 48529 Nordhorn
Prof. Alfred Breukelmann
Grafenstraße 10, 49828 Neuenhaus

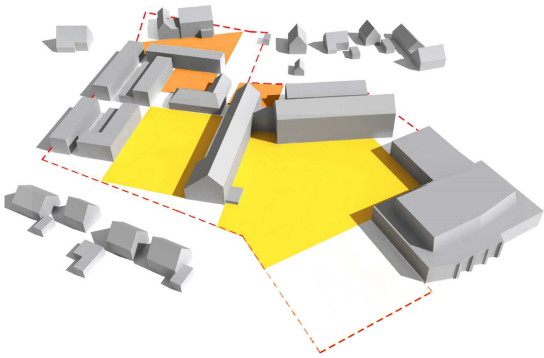
Durch das Bewertungsgremium, bestehend aus Politikern, Mitgliedern der Verwaltung, externe Architekten und Sonderfachleuten zu den geforderten Energiestandards wurde der in Auszügen anhängende Entwurf der Arbeitsgemeinschaft Johann Bouws und Architektur Contor Müller Schlüter zur Entwurfsüberarbeitung und späteren Realisierung ausgewählt.

Erweiterung Schulzentrum Mitte in Nordhorn, **städtebauliche Struktur**



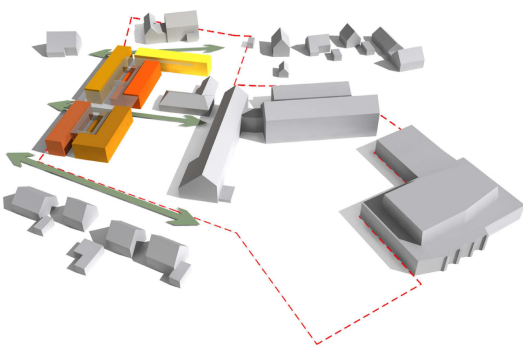
Organisation Schulzentrum

Alle Schulgebäude liegen an der querlaufenden Erschließungsachse. Im Westen befinden sich die Einheiten der Hauptschule, im Osten die der Realschule. Zentral angeordnet sind die Mensa und die gemeinsam genutzten Lehr- und Verwaltungsbereiche, welche somit von beiden Schulformen auf kurzen Wegen erreichbar sind. Über die Querstellung des Westflügels wird der öffentliche Schulhof in zwei überschaubare, räumlich gut gefasste Einheiten gegliedert. Die Haupt- und Realschule können mit dieser baulichen Organisation bei Beibehaltung ihrer Eigenständigkeit zum Schulzentrum Mitte verschmelzen.



Freiraumplanung

Die Gliederung der Freiflächen entspricht der städtebaulichen Situation und schafft über die Anordnung der Baukörper und die Verwendung des Bestandsgrüns die seitens des Auslobers gewünschte thematisierte Gliederung der Außenanlagen. Südlich der Erschließungsachse, zur Stadt orientiert, liegen die beiden öffentlichen Schulhöfe. Im nördlichen Bereich entstehen von Gebäuden und Grün unterschiedlich gefasste, private Themenhöfe als Rückzugs- und Ruheorte.



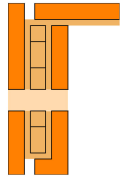
Baukörperdimensionierung

Mit dem Erweiterungsbau wird die sehr heterogene Siedlungsstruktur gefasst und über die Dimensionierung der Baukörper ein Übergang zwischen Wohnbebauung und öffentlichen Gebäuden geschaffen. Der Neubau wird in zweigeschossige Riegel gegliedert, die insbesondere angrenzend zur Wohnbebauung auf der Taunusstrasse und der Geisinkstrasse die Baukörperdimensionierung des Siedlungsbestandes aufnehmen. Entlang der Schulstrasse wird der Schulbereich gefasst, über die Öffnungen bleiben aus den Höfen und der verglasten Pausenhalle querlaufende Sichtachsen erhalten.

Abbildung 1 Auszug aus dem zu weiteren Planung freigegebenen prämierten Wettbewerbsentwurf

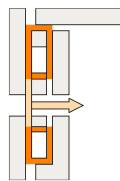
Erweiterung Schulzentrum Mitte in Nordhorn, multifunktionale Belegung

Zonierung



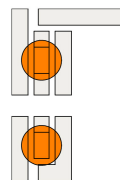
Der Heizwärmebedarf kann über die Zonierung des Gebäudes erheblich reduziert werden. Die Unterrichtsräume werden mit einem Passivhaus- Dämmstandard und entsprechender Lüftungstechnik ausgestattet. Diese Dämmqualität wird, da hier nicht benötigt, in den Neben- und Flurzonen deutlich reduziert. Das Haupttreppenhaus in der überdachten Pausenhalle wird als unbeheizter Raum ausgebildet, der mittels der Flurtüren, die auf Grund des Brandschutzes sowieso benötigt werden, von der beheizten Fläche getrennt wird.

Erschließung



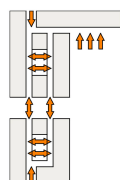
Das Gebäude erhält ein Haupttreppenhaus, welches im Zentrum, in der Pausenhalle, liegt. An dieser befindet sich, z. Zt. als Nebenzone genutzt, die optionale Lage für den ggf. im 2. BA einzubauenden Aufzug. Über die natürliche Belichtung und die Anordnung der Flure als Rundgang werden auch im kompakten Dreibund Angst- und Aggressionsräume vermieden. Das Gebäude wirkt sehr offen und freundlich.

Lerngruppe



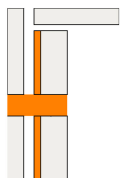
Das Gebäude wird in kleine, familiäre Einheiten unterteilt, die sich als Lerngruppen um die zentralen Atrien gliedern. Auf diese Weise wird nicht nur eine Orientierung im Gebäude vereinfacht, sondern auch die Identifikation der Schüler mit ihren Lerngruppen gefördert, hier sind die Klassen „zu Hause“

Belichtung



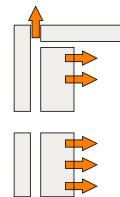
Über die Auflösung des sehr kompakten Grundkörpers in einzelne Riegel und das Einstellen der Atrien werden die Flurzonen vielfach natürlich belichtet. Innenliegende dunkle Verkehrsflächen werden so vermieden. Über die seitlich in die Atrien eingestellten Lichtbänder wird diese Belichtungsqualität auch im Erdgeschoss sichergestellt.

Ausstellung



Die Aufenthalts- und Verkehrsflächen im Gebäude werden konsequent als Ausstellungsflächen genutzt. Die Schüler können gemeinsam das im Unterricht geschaffene zeigen bzw. anschauen, Engagement und Ehrgeiz werden gefördert. Neben der großen Halle bieten aufgeweitete Verkehrswege und Vitriolen im Erdgeschoss entlang der Werk- und Fachklassen und im Obergeschoss flurseitige Schaukästen an den Nebenräume großzügigen Platz.

Außenunterricht



Die Werkräume und Fachklassen sind im EG derart angeordnet, dass ein Außenunterricht in den separierten Schulhofflächen möglich ist. Gleichzeitig bietet der nördlich gelegene „private“ Schulhof die Möglichkeit für Sonderlehrveranstaltungen im Freien. Diese Schaltung von Innen- und Außenräumen bietet darüber hinaus die Möglichkeit für, vom allgemeinen Unterrichtsbetrieb losgelösten Ausstellungen oder kleineren Schulfesten.

Erweiterung Schulzentrum Mitte in Nordhorn, **gestaltete Erlebnisräume**

Öffentlicher Schulhof

Der zur Taunusstrasse orientierte Schulhof wird als öffentliche Freifläche multifunktional verfügbar gehalten.
Über ihn erfolgt die Hauptzuwegung zum Erweiterungsbau; er dient als Spielfläche und wird als Außenbereich für die Mensa und Sonder- (Lehr-) veranstaltungen genutzt. Gefasst wird dieser Raum durch den Westflügel des Bestandsgebäudes, die Mensa, den Fachklassenriegel des Erweiterungsbaus und die hochgewachsene Hainbuchenhecke.



Privater Schulhof

Neben den Gärten der Wohnhäuser werden im hinteren Schulbereich durch die Bestandsgebäude und den Erweiterungsbau private Räume gefasst, in die der Baumbestand integriert wird.
Es entstehen so unterschiedlich thematisierte Aussenbereiche, die vom lauten, öffentlichen Schulhof separiert sind.

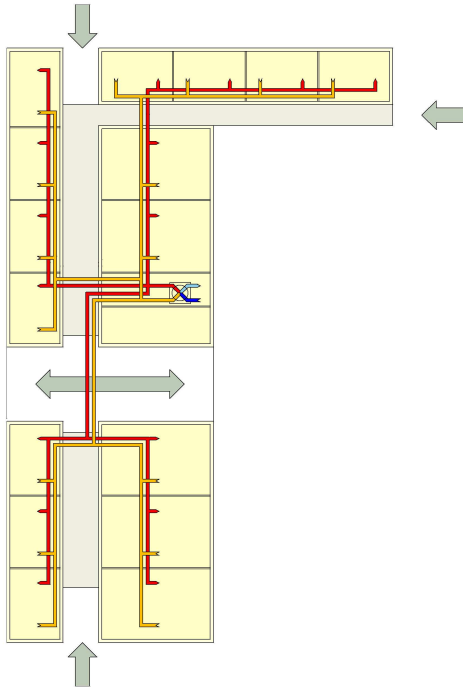


Gebäudehöfe

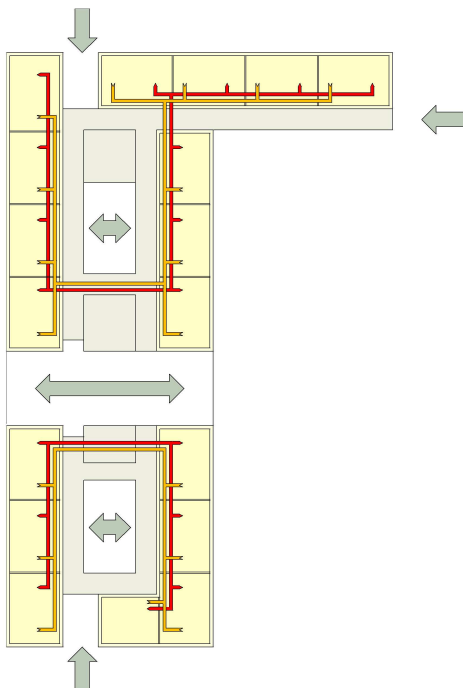
Im Gebäude setzt sich die Zonierung in unterschiedlich gestaltete Erlebnisräume fort. Hier werden familiäre, überschaubare Einheiten gebildet.
Im Untergeschoss werden die Flurzonen, entlang der Werkräume, mittels der Vitrinen zu Ausstellungsräumen, die über die Lichtlaternen in den Atrien natürlich belichtet werden.
Im Obergeschoss gruppieren sich die Klassen um die Atrien. Die Flure des kompakten Dreibunds werden so natürlich belichtet.



Erweiterung Schulzentrum Mitte in Nordhorn, kostengünstiges und nachhaltiges Bauen



Lüftungsschema EG im Winter



Lüftungsschema OG im Winter

Baustoffe, Bauteile

Die Grundtypologie des Gebäudekonstruktion entspricht hinsichtlich Materialwahl und Fügechnik der eines Industriegebäudes mit den damit einhergehenden wirtschaftlichen Vorteilen einerseits aber auch der Flexibilität durch einfache Fügechnik andererseits. Der tragende Rohbau besteht aus Spannbeton- Hohlkörperplatten. Die hochwärmedämmende Hülle wird aus im Werk komplett vorgefertigten Holzrahmenelementen mit fertiger Fassade und eingesetzten Fenstern montiert. Die Vorfertigung reduziert die Bauzeiten erheblich und sorgt aufgrund der besseren Arbeitsbedingungen im Werk für einen deutlich höheren Ausführungsstandard. Somit entsteht ein sehr robustes und ressourcenschonendes Gebäude.

Nutzungsabhängige TGA- Systeme

Aufgrund einer hochwärmedämmten und gemäß den gesetzlichen Vorschriften sehr dichten Gebäudehülle wird der Heizwärmebedarf entscheidend reduziert. Die Dichtigkeit des Gebäudes und die sehr intensive Schulnutzung führen jedoch gleichzeitig dazu, dass eine ausreichende Raumhygiene durch natürliche Belüftung mittels Stoßlüftungen praktisch kaum umsetzbar ist. Nur über eine mechanische Lüftung kann ein ausreichender Lüftungskomfort sichergestellt werden. Der Erweiterungsbau ist nicht durchgängig genutzt. Der Schulbetrieb ist nur halbtags geplant, in den Nachmittagsstunden finden ggf. Einzelveranstaltungen in begrenztem Umfang statt. Bei einer solchen Nutzung ist eine Entkopplung der Heiz- und Lüftungssysteme ökonomisch und ökologisch sinnvoll. Während der Hauptnutzungszeit werden die Systeme parallel betrieben. Die Lüftungsanlage sichert eine ausreichende Lüftungsleistung und reduziert die Lüftungswärmeverluste erheblich. Über extrem reduzierte Heizflächen ist die Behaglichkeitsregulierung möglich.

Heizung

Aufgrund des hohen Wärmedämmstandards sowie der vorhandenen Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung werden die Heizflächen stark reduziert. Zur Vermeidung zusätzlicher Konvektion werden Heizplatten mit überwiegender Strahlungswärmeanteil unterhalb der Fenster eingesetzt. Die Strahlungswärme ermöglicht bei gleicher Behaglichkeit deutlich geringere absolute Raumlufttemperaturen. Darüber hinaus ist über den hohen Strahlungswärmeanteil eine schnelle und kurzfristige Nutzung der Räume zum Beispiel in den Abendstunden mit erheblich reduzierten Energieeinsatz möglich. Aufgrund des vorliegenden auf wenige Stunden begrenzten Nutzungszeitraumes ist eine reine Beheizung über die Lüftungsanlage ökonomisch und ökologisch nicht vertretbar.

Lüftung

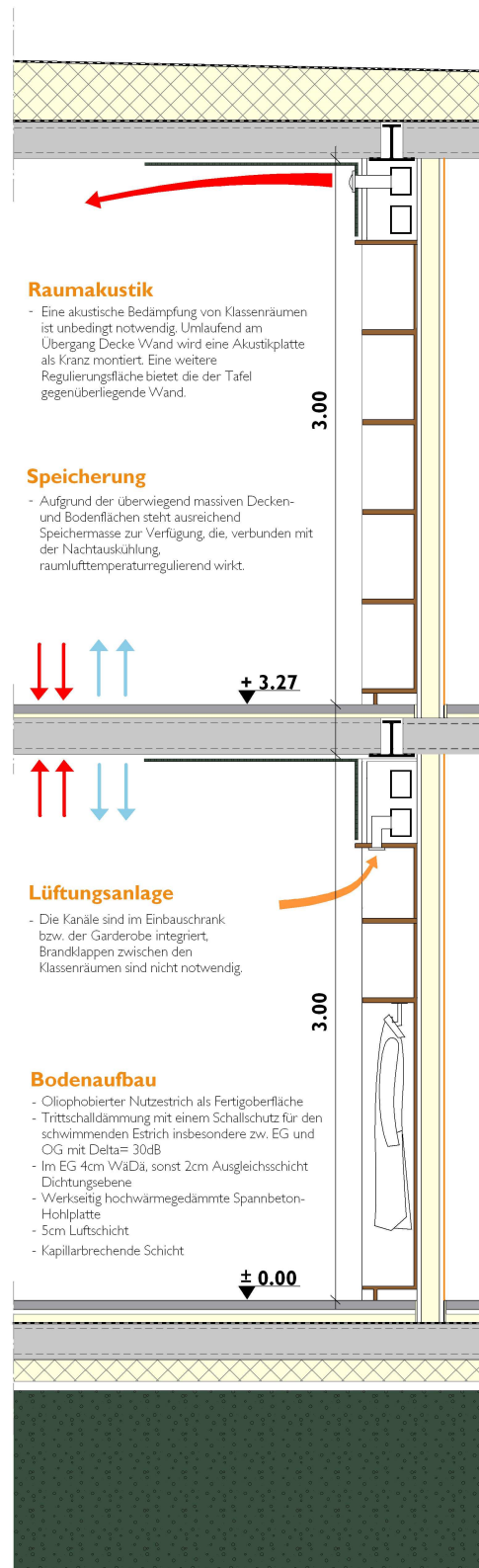
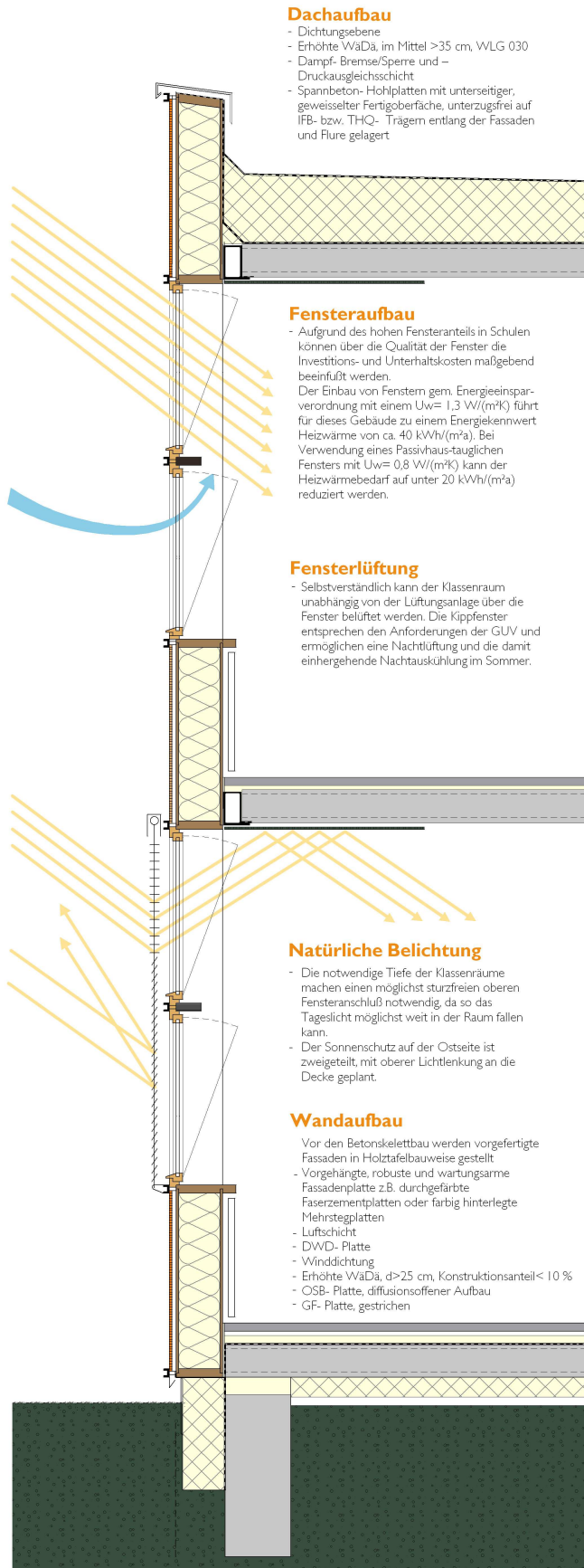
Auf ein kostenintensives Luft- Erd- Register sollte wegen der nicht vorhandenen Baugrube und des sehr hohen Grundwasserstandes verzichtet werden. Wesentlich effektiver ist die Ausführung einer hochwirksamen Wärmerückgewinnung (Wirkungsgrad > 80%) und der Einbau dieser Anlage innerhalb der gedämmten Hülle, also im zentralen Technikraum. Solche Ausführungen haben sich hinsichtlich der Investitions- und Betriebskosten als sehr effizient erwiesen. Die parallele Kanalführung in den Klassenräumen führt zur Reduzierung kostenintensiver Brandschutzklappen oder weiterer Brandschutzmaßnahmen, da der Flur als Rettungsweg installationstechnisch freigehalten wird. Aufgrund der zentralen Lage des Technikraums und den damit verbundenen kurzen Lüftungskanälen kann auf eine Volumenstromregelung verzichtet werden.

Sommerlicher Wärmeschutz

Die Vermeidung von Überhitzung der Klassenräume im Sommer wird passiv über eine Nachtauskühlung sichergestellt. Darüber hinaus ist auf Grund der Ausrichtung des Gebäudes und auf Grund des westlich gelegenen Wäldchens aus thermischen Gründen lediglich auf der Ostfassade ein außenliegender Sonnenschutz notwendig. Die nicht verkleideten massiven Bauteile, die als Speichermasse wirken, und die passive Querlüftung sichern eine gute Temperaturregulierung im Gebäude, indem die Bauteile nachts die tagsüber gespeicherte Wärme wieder abgeben können. Über die Oberlichter der Flurverglasung und die querliegende Pausenhalle kann eine Durchströmung des gesamten Gebäudes unabhängig von der Windrichtung sichergestellt werden.

Energiebedarf

Die im Gegensatz zu einem Wohngebäude zeitlich deutlich eingeschränkte Nutzungszeit erfordert andere Bewertungsmaßstäbe und eine andere Auswahl von Energiekonzepten als im Wohnungs- oder Bürobau. Aufgrund der hohen Nutzungsbelegung (ca. 1 Person / 2 m² statt ca. 1 Person / 15m² im Wohngebäude) sind der erforderliche Luftwechsel und die damit einhergehenden Lüftungswärmeverluste von maßgeblicher Bedeutung. Daher wird hier der Einsatz einer Lüftungsanlage vorgeschlagen, die jedoch nur im Hauptbetrieb eingesetzt wird. Zum wirtschaftlichen Betrieb der Nebennutzungszeiten wird ein reduziertes Heizflächensystem vorgehalten. Die Bewertungsmatrix eines Passivhaus-Projektierungspaketes sollte somit nicht ohne die beschriebenen bautypologisch bedingten Anpassungen erfolgen. So wird ein spezieller Schulbautypologischer Passivhaus-standart erarbeitet.



3. Projektphase 1

3.1 Planung und Ausschreibungsverfahren mit 3 Gebäudestandards

Prämisse für die Planung war, dass die zu treffenden Maßnahmen zum effizienten Energiestandard unter besonderer Berücksichtigung der Raumluftqualität im Rahmen des vorgegebenen, sehr niedrigen Budgets zu verwirklichen sind und nicht als „Öko-Accessoires“ mit erheblichen Zusatzkosten auf ein Standardgebäude aufgesetzt werden.

Zwecks Überprüfung der Wirtschaftlichkeit des ausgewählten Entwurfs wurden zunächst die Investitionskosten der unterschiedlichen Standards und die statistischen mittleren Kostenkennwerte für allgemeinbildende Schulen des Bundeskosteninformationszentrums Deutscher Architektenkammern (BKI) gegenübergestellt. Diese Werte sind in den Untersuchungen noch mit 16% MwSt aufgeführt, da die Umstellung der Umsatzsteuer erst nach den abgeschlossenen Untersuchungen erfolgt. Die vergleichende Wertung der Varianten gilt uneingeschränkt auch nach der Steuererhöhung.

Gemäß BKI, Stand 2005, liegt der Durchschnittspreis für allgemeinbildende Schulen jeweils für die Kostengruppen 300 und 400, inkl. der zum Zeitpunkt der Durchführung gültigen MwSt in Höhe von 16 % bei durchschnittlich

	von	mittel	bis
• EUR/m ³ BRI	240,-	290,-	355,-
• EUR/m ² BGF	980,-	1140,-	1300,-
• EUR/m ² NF	1530,-	1840,-	2190,-

Das geplante Schulzentrum Mitte hat folgende Kenngrößen

• BRI	13.884,12 m ²
• BGF	3.354,97 m ²
• NF	2.176,13 m ²

Bezogen auf die oben aufgelisteten Werte ergibt sich hier folgendes Bild:

	von	mittel	bis
BRI	3.332.189,-	4.026.395,-	4.928.863,-
BGF	3.287.871,-	3.824.666,-	4.361.461,-
NF	3.329.479,-	4.004.079,-	4.765.725,-
Mittelwert (gerundet)	3.316.500,-	3.951.700,-	4.685.400,-

Der Mindest- Durchschnittswert (von) soll nach Vorgabe der Stadt Nordhorn für kostengünstige Schulbauten wenn möglich noch unterschritten werden. Nur so sind diese Gebäude im Rahmen der vorgegebenen Haushaltslage finanzierbar. Dieser Zielwert wird auch für das Schulzentrum Mitte vorgegeben. Mehrkosten für die Sicherung der Lufthygiene und der Reduzierung des Wärmebedarfs werden seitens der Stadtverwaltung nicht akzeptiert.

In der Planung sind von den Architekten und Fachingenieuren somit kosten- und ressourcenschonende Sondermaßnahmen zu suchen, die eine Realisierung der Schulerweiterung mit Lüftungsanlage und mit Passivhausstandard auch in diesem äußerst engen Budget ermöglichen. Hierbei wurde die im Bestand vorhandene Wärmeerzeugungsanlage genutzt. Dies führte zu Einsparungen für den Neubau in Höhe von ca. 50.000,- EUR.

Abschließend zur Entwurfsplanung wurden folgende Kosten bzgl. der untersuchten Standards ermittelt (Kostengruppe 300 und 400 inkl. 16% MwSt) 1:

Standard EnEV	2.797.482,- EUR
Standard EnEV mit Lüftung	3.043.802,- EUR
Passivhausstandard	3.082.140,- EUR
Min.- Mittelwert BKI	3.316.500,- EUR

Tabelle 1: Ergebnisse der Kostenberechnung zu den verschiedenen Ausbaustandards (detaillierte Auflistungen siehe Anlage)

Auffallend ist, dass der wesentliche Investitionskostenunterschied zwischen der Variante mit und ohne Lüftungsanlage besteht. Die vergleichsweise sehr geringen Zusatzkosten, die dann bei einer Anhebung auf Passivhausstandard entstehen, können vernachlässigt werden. In der später beschriebenen Betrachtung zu den Auswirkungen auf die Betriebskosten wird deutlich, dass der Passivhausstandard wegen der wesentlichen Einsparungen im Verbrauch die Standard EnEV Variante mit Lüftung als wirtschaftliche Planungsalternative ausschließt.

Über die Kostenberechnung konnte die Einhaltung der o. a. Zielwerte für den Passivhausstandard nachgewiesen werden. Somit wurde dieser Standard als Referenzplanung zur Ausschreibung freigegeben.

Da jedoch seitens der Stadtverwaltung eine endgültige Entscheidung zur Ausführungsfreigabe erst nach Feststellung des Kostenanschlages erfolgen konnte, wurden der Standard EnEV mit Lüftung und der Passivhausstandard parallel über Bedarfspositionen ausgeschrieben.

Die Submissionsergebnisse bestätigten die Kostenberechnungen. Somit erfolgte eine Vergabe zum Passivhausstandard im o. a. Budget.

Die in der Kostenkontrolle z. Zt. aufgezeigte vorläufige Kostenfeststellung liegt ebenfalls im Budget.

Eine detaillierte Betrachtung der Kostenaufstellungen zeigt, dass die Kostenaufteilung gemäß BKI ungefähr bei 80 % für die Kostengruppe 300 und 20 % für die Kostengruppe 400 liegt. Für den ausgewiesenen durchschnittlichen Mindestwert würde dies ergeben, dass hier Kosten aus der Kostengruppe 300 in Höhe von EUR 2.653.200,- und für die Kostengruppe 400 in Höhe von EUR 663.300,- anzusetzen wären.

Verglichen mit den Ausschreibungsergebnissen wird ersichtlich, dass gem. vorläufigem Kostenanschlag im Bereich der Haustechnik der Passivhausstandard, d. h. mit Lüftung und mit wesentlich reduziertem Wärmebedarf annähernd zu den ausgewiesenen BKI-Kosten realisiert werden kann.

Wesentliche Einsparungen könnten im Bauwerk / Baukonstruktion erzielt werden, hier liegt der vorläufige Kostenanschlag für den Passivhausstandard bei 81,5 % der Mindestwerte gemäß BKI-Kostenindex.

Nachstehend sind die gegenübergestellten Standards erläutert:

1. Es wurde die im Bestand vorhandene Wärmeerzeugungsanlage genutzt. Dies führte zu Einsparungen für den Neubau in Höhe von ca. 50.000,- EUR.

3.1.1 EnEV-Standard ohne Lüftung

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit wurde das Gebäude, wie vorangehend erläutert, zum angestrebten Passivhausstandard in einer Vergleichsvariante nach EnEV geplant. Der wesentliche Unterschied in der Konstruktion liegt im Bereich der Fenster, die zum Zeitpunkt der Ausschreibung noch einen erheblichen Kostenunterschied bedingten ². Weitere in ihrer thermischen Dämmwirkung gegenüber dem Passivhausstandard reduzierte Bauteile sind:

- Der Bodenaufbau mit nur 20 cm Glasschaumschüttung statt 35 cm $U= 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Reduzierte Dämmstärke des Daches 18 statt 38 cm, $U= 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Reduzierte Dämmstärke an Wänden mit vorgehängter Fassade 10 cm statt 25 cm, $U= 0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Verglasung mit Wärmeschutzglas 2 fach statt 3 fach Verglasung, $U_G= 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Fensterrahmen mit $U=1,6$ statt $0,75 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Luftwechsel $0,6 \text{ h}^{-1}$

Trotz der teilweise starken Reduktion des Wärmeschutzes für die EnEV Variante ergibt sich noch immer eine deutliche Unterschreitung der zulässigen Grenzwerte. Die berechnete EnEV Variante liegt energetisch noch deutlich besser als der geforderte Wert der Gebäudehülle. H_t' beträgt $0,42 \text{ W/m}^2\text{K}$ und liegt so 33 % unterhalb des zulässigen Wertes von $0,63 \text{ W/m}^2\text{K}$. Die für die EnEV-Variante ‚abgespeckten‘ Konstruktionen sind jedoch teilweise aus konstruktiven Gründen nicht weiter zu reduzieren, so dass kein wesentliches Kostenpotential in diesen verborgen ist.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist deshalb für das Passivhaus konservativ, da die Referenzvariante einen zu niedrigen Energiebedarf aufweist.

Im Bereich Heizung und Lüftung sind die zum Betrieb des Gebäudes notwendigen Komponenten berücksichtigt; d.h. Heizflächen und Kesselleistung zur Abdeckung des berechneten und in dieser Variante stark erhöhten Wärmebedarfs, ebenso wie Abluftanlagen für innenliegende WC-Bereiche.

Als Energiekennzahl wurden auf der genannten Basis $68 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ berechnet, die Nachweisführung erfolgte mit dem PHPP Berechnungsverfahren.

3.1.2 EnEV-Standard mit Lüftung

Alternativ untersucht wurde eine EnEV- Variante, die mit einer Lüftungsanlage für die Klassen ausgestattet ist. Der Einfluss dieser Lüftungsanlage auf die Energiekennzahl wurde wiederum mit dem PHPP Verfahren bestimmt. Berücksichtigt wurde eine Anlage mit Wärmerückgewinnung mit einem Wärmerückgewinnungsgrad von 0,65 % (Kreuzstromwärmetauscher). Die Luftmengen wurden nach AMEV Empfehlung /3/ ausgelegt. Sie entspricht für Anlagen mit Quellaftung $22 \text{ m}^3/\text{hPerson}$. Die Auslegung entspricht in diesem Punkt der des Passivhauses. Gegenüber der Fensterlüftung der EnEV Variante, die einen stündlichen Luftwechsel gemäß der Berechnungsverordnung von 0,6 aufweist (Luftdichtigkeitsprüfung wird angesetzt) liegen die Luftwechsel nun entsprechend der geförderten Luftmengen, die sich aus den Anforderungen der Nutzung ergeben. Die in der Nutzungszeit hohen Luftwechsel werden jedoch über den Tag gemittelt.

Die Anlage entspricht in seinem Aufbau und seiner Auslegung weitgehend der Anlage, konzipiert für das Passivhaus. Abweichend gegenüber einer Passivhausanlage ist die angesetzte Effizienz der Ventilatoren. Es wurde daher eine leicht erhöhte Stromkennzahl angesetzt ($1 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ mehr als im Passivhaus); auch dieser Ansatz ist eher konservativ, da die wesentlichen Unterschiede in der Lüftungstechnik die Effizienz der Antriebe ist und erheblicher Aufwand zum Erreichen der Anforderungen von Passivhäusern notwendig ist.

Durch die Lüftungsanlage ergibt sich eine Reduktion der Energiekennzahl auf $45 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Der zum Betrieb der Belüftung notwendige Strombedarf wurde mit $6 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ angesetzt.

² Aufgrund der Förderungsanreize durch die KfW und auch durch die zunehmende Verwirklichung von Passivhäusern hat sich der Unterschied in den Kosten zwischen 2-fach und 3-fach Glas in der jüngsten Zeit stark reduziert

3.1.3 Passivhausstandard

Der Passivhausstandard wurde als Planungsziel mit Priorität verfolgt und optimiert, dies drückt sich insbesondere in den gegenüber Vergleichsbauten reduzierten Kosten in der Baukonstruktion aus und dies trotz der zum Erreichen des Passivhausstandards notwendigen Konstruktionen und Dämmstärken. Die Haustechnik wurde entsprechend der Anforderungen an Passivhäuser umgesetzt, maßgebend sind diesbezüglich die effizienten Antriebe und Ventilatoren in der Lüftungstechnik und die notwendige Effizienz der Wärmerückgewinnung (75%) ³.

Die unter 3.1.1 aufgelisteten Bauteile mit den dem Passivhausstandard angeglichenen Dämmstärken sind hier noch einmal zusammengefasst:

- Fenster $U_G = 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0,52$; $U_f = 0,75 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Hauptfassade in opaken Bereichen (Brüstung) $U = 0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Fassaden mit vorgehängter Fassade (massiver Hinterbau) $U = 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Böden zum Erdreich $U = 0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Dach und Decken gegen Außenluft $U = 0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Türanlagen und Verglasung im Innenbereich $U = 1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$

Mit dem Berechnungsverfahren PHPP konnte eine Energiekennzahl von $17 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ nachgewiesen werden.

In Abweichung zum Passivhauskonzept für Wohngebäude wurde auf den Einbau von Heizflächen nicht verzichtet, der Grund für diese kostenerhöhende Maßnahme war:

- Das Gebäude wird mit einer zentralen Lüftungsanlage ausgerüstet, gegenüber einer Wohnungslüftungsanlage ergeben sich durch die hohe Personenbelegung Luftwechselzahlen in der Nutzungszeit von über 3 h^{-1} . Der Betrieb einer solchen Anlage außerhalb der Nutzungszeit mit reduzierter Luftmenge ist zum Erhalt der Innentemperatur nicht sehr energieeffizient
- Nutzungen in Teilbereichen mit sehr geringen Personenbelegungen wie z.B. Elterngespräche sind mit einer zentralen Lüftungsanlage kaum bedarfsgerecht durchführbar
- Die Primärenergieanforderung ist mit einer zentralen Lüftungsanlage, die auf den maximalen Luftwechsel ausgelegt ist, unerreichbar, wenn diese für die Beheizung eingesetzt wird.
- In großen Gebäuden ist der Nutzereinfluss nicht vernachlässigbar, das bedeutet, dass die Lüftungsanlage stark durch geänderte Druckbedingungen beeinflusst werden können und eine Beheizung deshalb u. U. nicht immer funktioniert. Insbesondere die Überströmung von der Klasse in die Flure und Nebenräume ist deshalb häufig kaum realisierbar, da allein durch den Zu- und Fortgang von Personen die internen Druckbedingungen zu stark beeinflusst werden können
- Die AMEV-Richtlinie /3/ für die notwendigen Luftmengen je Person geht bei Quelllüftung von $22 \text{ m}^3/\text{h}$ und Person aus. Bei Induktionslüftung wird eine Luftmenge von $30 \text{ m}^3/\text{h}$ Person vorgegeben. Eine Beheizung bei Quelllüftung nur mit Luft ist nicht möglich, da der Verdrängungseffekt nicht auftritt, wenn die Luft über Raumtemperatur erwärmt eingeblasen wird. Zur Diskussion der notwendigen Luftmengen siehe auch die Ergebnisse der Simulation in Kap 3.2..

³ Die Wärmerückgewinnung in großen Lüftungsanlagen (hier ca. $20000 \text{ m}^3/\text{h}$) erreicht in der Regel nicht die hohen Werte von Systemen mit Gegenstromwärmetauschern wie sie für kleinere Anlagen erhältlich sind. Das geplante Regeneratortrad müsste zum Erreichen höherer Werte in seinem Durchmesser stark erhöht werden, was jedoch die Gebäudehöhe nicht zulässt

3.1.4 Wirtschaftlichkeit des Passivhausstandards

Basierend auf den Kosten und den berechneten Energiekennzahlen der vorgenannten Varianten

EnEV- Standard
EnEV- Standard mit Lüftung
Passivhausstandard

wurde eine Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt. Diese beruht auf dem Annuitätenverfahren, bei dem innerhalb des Betrachtungszeitraums Investitionskosten, Betriebskosten (Energie-Wartungs- und Instandhaltungskosten) berücksichtigt werden. Die Preissteigerung für Energie wird mit einem mittleren Faktor innerhalb der Betrachtungszeit berücksichtigt, welcher mit einer angenommenen Preissteigerungsrate für den Betrachtungszeitraum bestimmt wird. Dabei werden innerhalb des Betrachtungszeitraumes (hier 20 Jahre) mittlere jährliche Kosten bestimmt. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass Varianten direkt miteinander anhand der unterschiedlichen durchschnittlichen jährlichen Kosten verglichen werden können. Eine Amortisation kann jedoch in dieser Auflistung nicht ohne weiteres ausgewiesen werden (s. dazu die zusätzliche Tabelle im Anhang).

Als Grundlage für die Betrachtung wurde berücksichtigt:

Energiebezugsfläche m ²	3164		
Kosten Strom €/kWh	0,16		
Kosten Wärme €/kWh	0,065	Steigerungs- faktor Energie	Annuität
Preissteigerung Energie 4	7%	2,01	0,074
Berechnungszeitraum Jahre	20		
Zinssatz	4%		

	Passivhaus	EnEV Lüftung	EnEV Standard
Energiekennzahl kWh/m ² a	17	45	79
Stromkennzahl kWh/m ² a	23	24	18
Kosten			
Investion KG300-400	2657017	2623967	2411622
Mehrkosten bez. EnEV	245395	212345	
Mehrkosten bez. EnEV Lüftung	33050		
Investion (Annuität) für Mehrkosten €/a	18159	15714	
Jährliche Energiekosten			
Strom €/a	23409	24427	18320
Wärme €/a	7029	18607	32665
Wartung 2% für Mehrkosten Lüftung und Heizung	2295	2760	
Gesamtkosten €/a	50893	61507	50985

Tabelle 2: Wirtschaftlichkeit des ausgeführten Baustandards im Schulzentrum Nordhorn

⁴ diese wurde aus den Preissteigerungen der vergangenen Jahre ermittelt. Zwischen 2000 und 2007 stieg der Gaspreis um 13,8% im Mittel, der Strompreis um 4,9 %, wobei die Steigerungsraten 2006 und 2007 teilweise größer waren. Bei Strom hat es nach der Freigabe der Strompreise eine kurzzeitige Reduktion gegeben, so dass die Steigerungsraten gemittelt niedriger als beim Gas ausfallen. 7% stellt einen Mittelwert für Gas und Strom dar, ist nach Prognosen eher konservativ

Deutlich wird, dass das Passivhaus trotz des erhöhten Standards bzgl. des EnEV Gebäudes Kostenvorteile bietet. Die Ausführung eines Gebäudes nach EnEV Standard mit Lüftung erhöht die Jahreskosten jedoch erheblich, da die zusätzlichen Komfortqualitäten nicht mit Einsparungen in den Betriebskosten einhergehen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die maschinelle Lüftung, die für die Nutzung von Schulen dringend zu empfehlen ist, aus Kostengründen an eine Passivhausausführung zu koppeln ist. Die Energieeinsparungen eines Passivhauses ermöglicht die Kompensation von Mehrkosten, die sich durch Lüftungstechnik und verbesserte Bauteile ergeben.

3.2 *Simulation des Passivhausstandards*

3.2.1 *Einführung und Vorgehensweise*

3.2.1.1 *Zielsetzung*

Ziel der Simulation ist die Entwicklung und Bewertung von Planungs- und Betriebsparametern im Bereich Heizung und Lüftung, die zu einer möglichst effizienten und kostengünstigen Installation führen und darüber hinaus das angestrebte Einsparpotential sicherstellen bzw. auch ermöglichen.

Die Simulation umfasst somit die drei Themenbereiche Lüftung und Raumluftqualität, Heizung und Energiebedarf, sowie den sommerlichen Komfort⁵. Evident ist, dass sowohl Heizung und Lüftung als auch Maßnahmen zum Sonnenschutz und sommerlichen Wärmeschutz nicht unabhängig voneinander gesehen werden können, sondern sich vielmehr beeinflussen und Rückwirkungen aufeinander haben. Gerade in energetisch optimierten Gebäuden spielt die exakte Abstimmung eine wesentliche Rolle. Erfahrung aus betreuten Projekten ist, dass bei einer Vielzahl von Gebäuden diese Abstimmung zum einen im Bereich der Wechselwirkung zwischen den Gewerken nicht vollzogen wurde und/oder in der Umsetzung von Regelparametern in der Steuerung bzw. Gebäudeleittechnik nicht korrekt erfolgte, die Folge war ein von den Planungswerten abweichender Energieverbrauch. Die Simulation ist somit nicht nur ein Instrument Komfort und Energiebedarf zu prognostizieren, sondern vielmehr Auslegungs- und Regelparameter zu ermitteln und gleichzeitig energetisch und bezüglich ihrer Relevanz für den Komfort zu bewerten.

Durch diese Vorarbeiten wird somit ein energetisch optimierter Gebäudebetrieb erreicht.

Das übergeordnete Ziel ist aber, aus den Ergebnissen am Objekt allgemeine Parameter abzuleiten, die auch auf andere Objekte in der Planung übertragen werden können und somit für eine effiziente Gebäudenutzung angewandt werden können. Die eingrenzende Größe ist natürlich durch die Nutzung gegeben, da eine Schulnutzung sehr spezielle Anforderungen stellt:

- Kurze Nutzungszeiten
- Hohe Personendichte in der Nutzungszeit

Vorteilhaft für ein solches Vorhaben ist, dass Schulen relativ ähnlich aufgebaut sind, da sie sogar länderübergreifend ähnlichen Richtlinien unterliegen:

- Ähnliche Belegungszahlen 25-30 Schüler pro Klasse
- Identische Nutzungszeiten (45 min Stunden mit 15-20 min Pause nach 2 Schulstunden)
- Vorgegebene Flächen pro Klasse
- Vorgaben für Sonnenschutz

⁵ der sommerliche Komfort wird weiterführend in Projektphase 2 abgehandelt

3.2.1.2 Vorgehensweise

Für die Analyse von zeitabhängigen und komplexen thermischen Vorgängen, wie dem energetischen Verhalten eines Baukörpers, ist die dynamische Simulation ein approbates Mittel, das Zusammenwirken von sich ändernden Größen wie Solareinstrahlung, innerer Wärmefreisetzung z.B. durch Personen, Windeinflüsse, Außentemperatur und Lüftung zu bestimmen. Es ermöglicht zudem andere auch nicht zeitabhängige Parameter zu integrieren und somit Regelungsvorgänge abzubilden. Dies wurde deshalb auch im vorliegenden Fall angewandt. Benutzt wurde das Programm TRNSYS /4/, welches für solche Berechnungen entwickelt wurde und wegen seiner Genauigkeit und Berechnungsmöglichkeiten in vielen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Anwendung findet. Der Vorteil von TRNSYS ist zudem, dass es durch seine Struktur auch für andere Vorgänge offen ist und so auch z.B. Konzentrationen der Raumluft mit diesem Programm bestimmt werden können, indem diese Vorgänge in die Simulationen eingebunden werden.

3.2.1.3 Randbedingungen

Die Abbildung eines gesamten Gebäudes in der Simulation ist in der Regel zur Ermittlung der genannten Parameter nicht erforderlich. Es wird in der Regel die Simulation auf eine Gebäudeachse beschränkt, die für das Gebäude relevant ist und die aus mehreren Zonen besteht, die unterschiedliche Orientierung und Nutzungsbereiche enthalten.

Abgesehen von den Sondernutzungsbereichen, Küche und Fachräumen, die für eine Verallgemeinerung auch in der Nutzung zu speziell sind, kommen als Zonen nur Klassen in Eck- und Mittellage für eine solche Betrachtung in Frage. Die folgende Abbildung zeigt den simulierten Bereich, es handelt sich um die Gebäudeecke im EG des Bauteils 1 (Süd/Ostecke). Zur Berücksichtigung der Orientierung und der Lage im Gebäude wird derselbe Grundriss mit der Orientierung Nord/West im Obergeschoss simuliert.

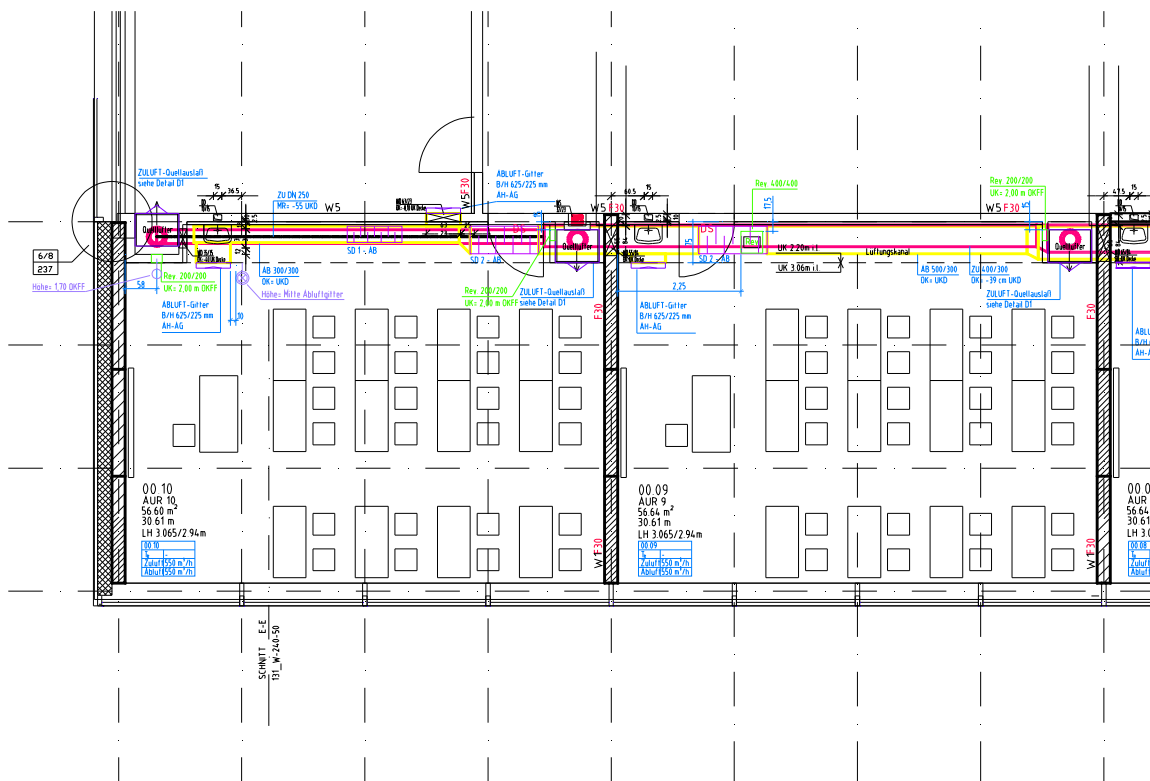


Abbildung 2 Simulierter Gebäudebereich im EG mit Orientierung Süd-Ost bzw. gespiegelt mit Orientierung Nord-West und Lage im OG

Der Gebäudebereich wurde entsprechend seiner Konstruktion in der Simulation beschrieben, die folgenden Konstruktionen wurden berücksichtigt:

- Fassade Holzträgerkonstruktion mit einem U-Wert von $0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Wand zur Gebäude Stirnseite Beton mit Außendämmung $U=0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Boden bestehend aus Betonplatte mit Estrich/Trittschalldämmung auf Glasschaumschotter
- $U=0,195 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Innenwände zwischen den Räumen: Beton
- Zwischendecken: Beton mit Akustikpaneel
- Innenwände zum Flur: Akustikpaneel GK-Platte, Schalldämmung., GK-Platte Holzwerkstoffplatte
- Dach: Beton mit Wärmedämmung 38 cm $U=0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$

Insgesamt ist das Gebäude durch eine sehr hohe interne Masse charakterisiert, diese dient der Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes und zur Aufnahme der hohen internen Lasten im Unterricht.

Die Gebäudenutzung wurde wie folgt abgebildet:

- Nutzung der Räume mit Schülern gemäß Stundenplan mit 24 Schülern je Raum und einer Lehrperson
- Beginn um 7.50 Uhr Doppelstunde 90 min mit 5 minütiger Zwischenpause (Gebäude belegt)
- große Pause 15 bzw. 20 min ohne Belegung der Räume
- Ende des Unterrichts um 13.15 Uhr
- Lüftungsanlage Ein 7.30 Uhr
Aus 13.30 Uhr
Variation der Luftmengen
- Heizung Einschaltzeiten und Regelung ist Ergebnis der Simulation

3.2.2 Lüftung

3.2.2.1 Anforderungen

Ziel der Lüftung ist eine hinreichende Luftqualität innerhalb der Unterrichtszeiten, die die Schüler in die Lage versetzt dem Unterricht aufmerksam zu folgen. Untersuchungen haben gezeigt, dass hohe CO_2 -Konzentrationen einen Abfall der Konzentrationsfähigkeit und der Reaktionsfähigkeit bewirken /9/.

Wie eingangs gezeigt, kann eine hinreichende Luftqualität nur durch eine maschinelle Lüftungsanlage sichergestellt werden. Mit den Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen konnte gezeigt werden, dass eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung in passivhaustauglicher Ausführung zu bevorzugen ist. Die Auslegung einer solchen Anlage ist daher zu untersuchen, d.h. es gilt die Luftmengen und die Betriebsweise festzulegen,

Unterschiedliche Luftmengen wurden in bisher dokumentierten Passivhausprojekten realisiert, diese variieren im Bereich von $12\text{-}17 \text{ m}^3/\text{Ph}$. Der ASHRAE Standard 62.1 (2007)/5/ in dem die Thematik in Schulen sehr detailliert behandelt wird, fordert für Klassenräume mit Schülern älter als 9 Jahre $18 \text{ m}^3/\text{Ph}$. Im Rahmen der Simulation wurde daher ermittelt welche Luftmengen unter angenommenen Strömungsbedingungen im Schulzentrum Mitte zu welchen CO_2 -Konzentrationen führen.

Ausführungsdetails wie die Luftführung im Raum sind für die Arbeitsweise von Lüftungsanlagen von großer Bedeutung, können jedoch nicht mit einer thermischen Simulation berücksichtigt werden, da keine CFD-Berechnungen durchgeführt werden. Der Einfluss der Raumlüftung auf die Wirksamkeit des Luftaustausches wurde deshalb durch feste Parameter in der thermischen Simulation berücksichtigt. Als Parameter in der Simulation werden daher für die Lüftungswirksamkeit bzw. der Austauschwirkungsgrad vorgegeben, dieser kann für unterschiedliche Arten der Luftführung anhand dokumentierter Werte /10,11/ vorgegeben werden; es werden die Strömungsart Mischluftströmung und Quellluftströmung als wesentlich unterschiedliche Prinzipien unterschieden.

Der Austauschwirkungsgrad für die reine Verdrängungsströmung beträgt $\eta_L = 1$, für die Mischluftströmung liegt er im Bereich von 0,5 bei vollständiger Durchmischung.

Die Verdrängungslüftung erfordert jedoch eine impulsarme Einbringung der Frischluft im Bodenbereich und ist daher in vielen Anwendungen aufgrund der großen Zuluftöffnungen mit höherem Installationsaufwand verbunden. Der Vorteil der Verdrängungslüftung ist, dass mit kleineren

Luftmengen eine hohe Luftqualität erzeugt werden kann, was für Passivhäuser enorme Vorteile bringt, insbesondere wenn durch Personenbelegung auch hohe Luftwechsel notwendig werden. Aus diesem Grund wird in der AMEV Richtlinie auch eine reduzierte Luftmenge pro Person bei Quelllüftung angegeben.

AMEV Richtwerte: Luftmenge pro Person und Stunde

- Verdrängungslüftung 22 m³/h
- Mischlüftung 30 m³/h

Wird von einer CO₂-Abgabe von 15-20 l/h je Person bei sitzender Tätigkeit ausgegangen, so enthalten die AMEV Werte eine Lüftungswirksamkeit von 90 % für die Verdrängungslüftung und von 50% für die Mischlüftung.

In der Simulation wurden beide Varianten aufgegriffen und die sich einstellende Konzentration für das Gas CO₂ berechnet.

Der zeitliche Verlauf in den folgenden Graphiken spiegelt den Unterrichts- und Pausenverlauf wieder.

3.2.2.2 Ergebnisse der Lüftungssimulation

Die folgenden Graphiken zeigen die sich einstellende Konzentration, die sich in einer Klasse ergibt, wenn diese im Unterricht genutzt wird. Der aktuelle Stundenplan ist berücksichtigt. Weitere berücksichtigte Parameter: Fenster geschlossen, Anzahl der Personen 25, Aktivitätsgrad I d.h. Ausatmung CO₂ 15 l/Ph

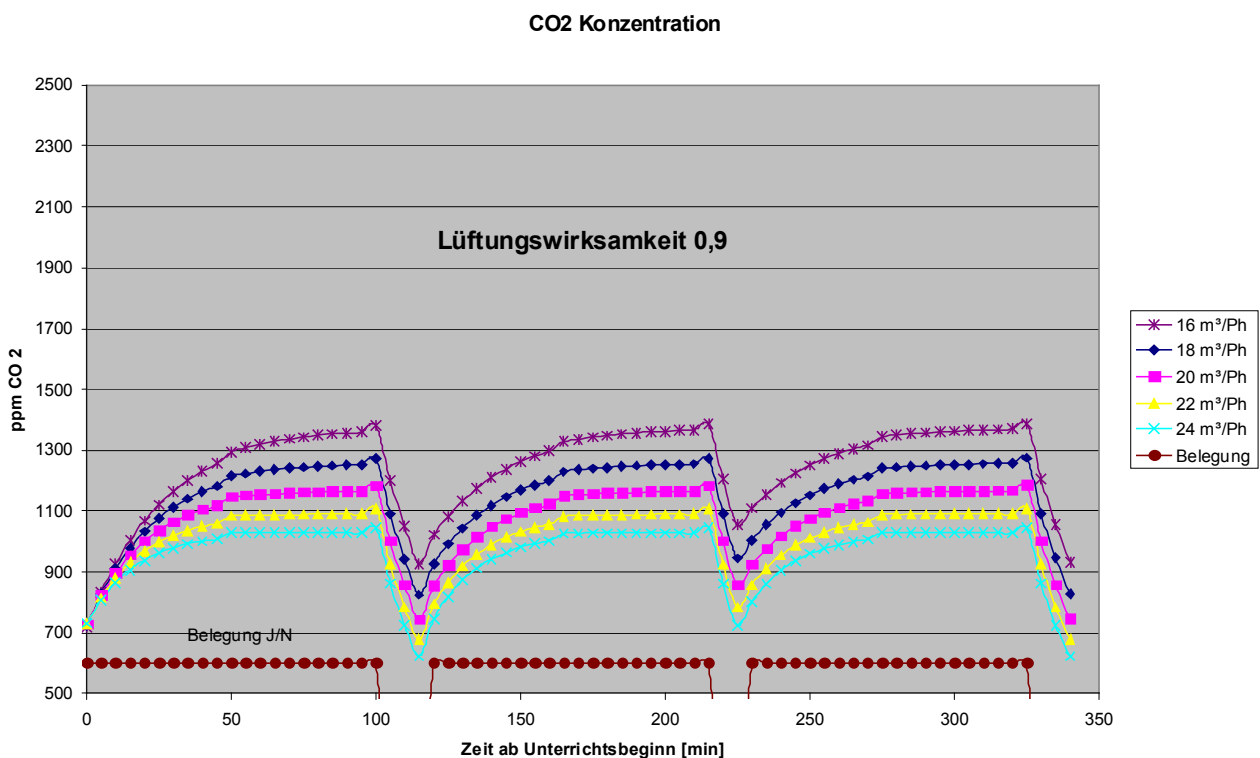


Abbildung 3: CO₂-Konzentration in einer Klasse in Abhängigkeit der personenbezogenen zugeführten Luftmengen und der Unterrichtszeit bei Verdrängungslüftung

Alle betrachteten Auslegungsvolumenströme halten den CO₂-Grenzwert von 1500 ppm ein, wobei dieser Grenzwert bezüglich der Leistungsfähigkeit und Lernfähigkeit noch zu hinterfragen wäre.

Die gleiche Berechnung wurde für eine Anlage mit Mischlüftung durchgeführt, die folgende Graphik zeigt den Verlauf

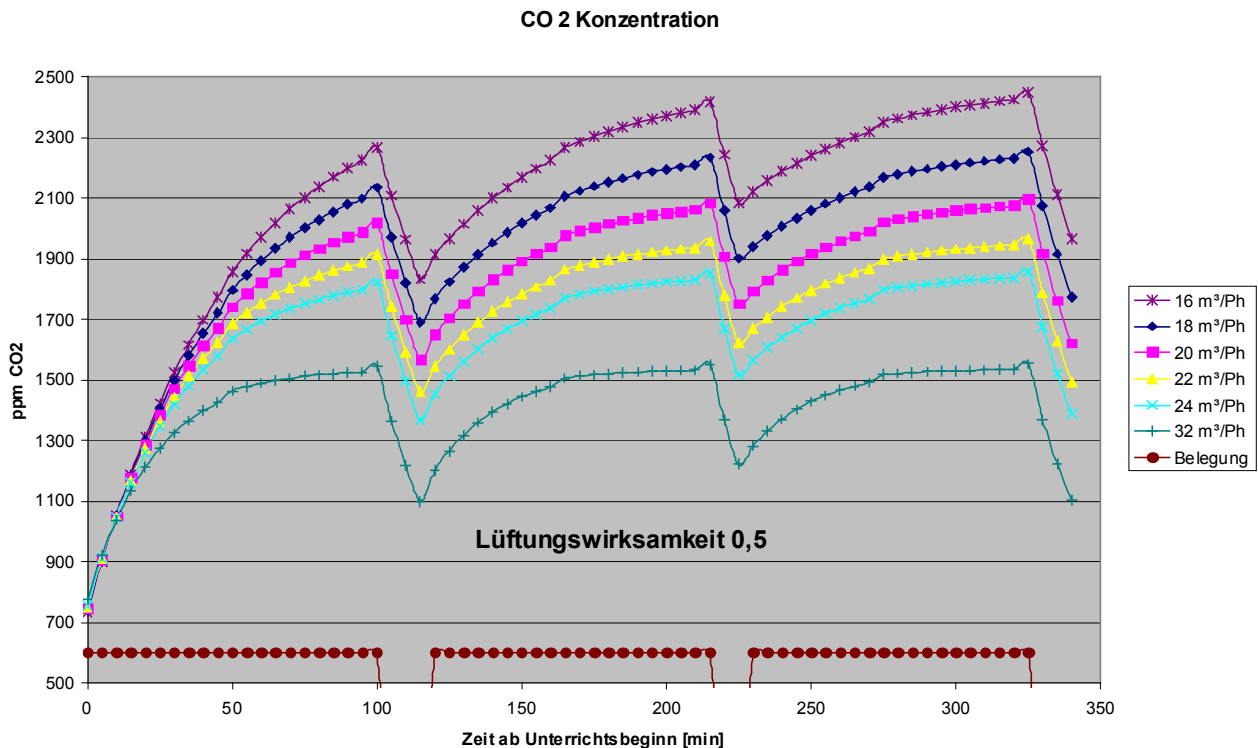


Abbildung 4: CO₂-Konzentration in einer Klasse in Abhängigkeit der personenbezogenen zugeführten Luftmengen und der Unterrichtszeit bei Mischlüftung

Das Ergebnis zeigt deutlich, dass bei Ausführung der Anlage mit Mischlüftung der Grenzwert von 1500 ppm nur mit einem personenbezogenen Volumenstrom von >32 m³/h eingehalten werden kann. Die Konzentration befindet sich in diesem Fall längere Zeit auf diesem Niveau, es besteht kein Potential um unzureichende Einstellungen in einzelnen Bereichen oder Betriebsabweichungen ausgleichen zu können.

In Bezug auf das Passivhaus würde eine solche Auslegung gegenüber der Quelllüftung eine Energiekennzahl von 22 kWh/m²a bedingen, was einer Steigerung von 30% entspricht. Von großer Relevanz sind jedoch zusätzlich die Kanalquerschnitte, die die Kubatur und Gebäudekosten beeinflussen.

3.2.2.3 Fensterlüftung

Zum Vergleich mit den durchgeführten Simulationen für einen Betrieb der Schule mit einer Lüftungsanlage wurde ermittelt, welche Luftqualität sich ergibt, wenn, wie von vielen empfohlen, weiterhin mit den Fenstern gelüftet wird. Es wurden dafür verschiedene Szenarien gewählt und der sich einstellende Luftwechsel vorgegeben. Dieser Luftwechsel entspricht dem durch Öffnen der Fenster zu erwartenden Luftwechsel in unterschiedlichen Betriebssituationen. Der zu erwartende Luftwechsel ist klein wenn die thermische Kraft klein ist, d.h. wenn es nur geringe Temperaturunterschiede zwischen innen und außen gibt und die Windstärke klein ist. Der Luftwechsel ist groß bei kalter Außentemperatur und auch bei Wind. Angenommen wurde daher ein Luftwechsel von 1,5 bis 8-h zur Berücksichtigung der verschiedenen auftretenden Bedingungen. Die Öffnung der Fenster wurde wie folgt berücksichtigt:

Die Fenster sind während der Pausen geöffnet (Dena/Bundesumweltamt –Empfehlung). Zusätzlich wurde eine 5 minütige Öffnung während einer Schulstunde angenommen

Die folgende Graphik zeigt die berechneten CO₂-Konzentrationen. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein Luftwechsel von 8-h nur bei sehr kalter Witterung und bei Querlüftung erreichbar ist,

dieser Fall ist daher sehr optimistisch. Ein Luftwechsel von 5-h ist ebenfalls nur unter sehr günstigen Bedingungen erreichbar und daher als Annahme für das ganze Jahr ebenfalls zu optimistisch. Ebenfalls muss in diesem Zusammenhang grundsätzlich auf die mit den nachstehend aufgezeigten Szenarien einhergehende Zugserscheinung und den Kälteeinfall, sowie den wesentlich höheren Heizwärmebedarf hingewiesen werden. Die damit einhergehende mangelhafte Behaglichkeit im Klassenraum führt in der Realität zumindest zum Entfall der Stoßlüftung in der Schulstunde. Somit sind die ausgewiesenen Konzentrationen zwar theoretisch ansetzbar, wegen des mehrfach in Messungen nachgewiesenen abweichenden Nutzerverhaltens jedoch als sehr optimistisch einzuschätzen. Die aufgezeigten Werte stellen Mindestwerte dar, die tatsächlichen Konzentrationen werden höher liegen.

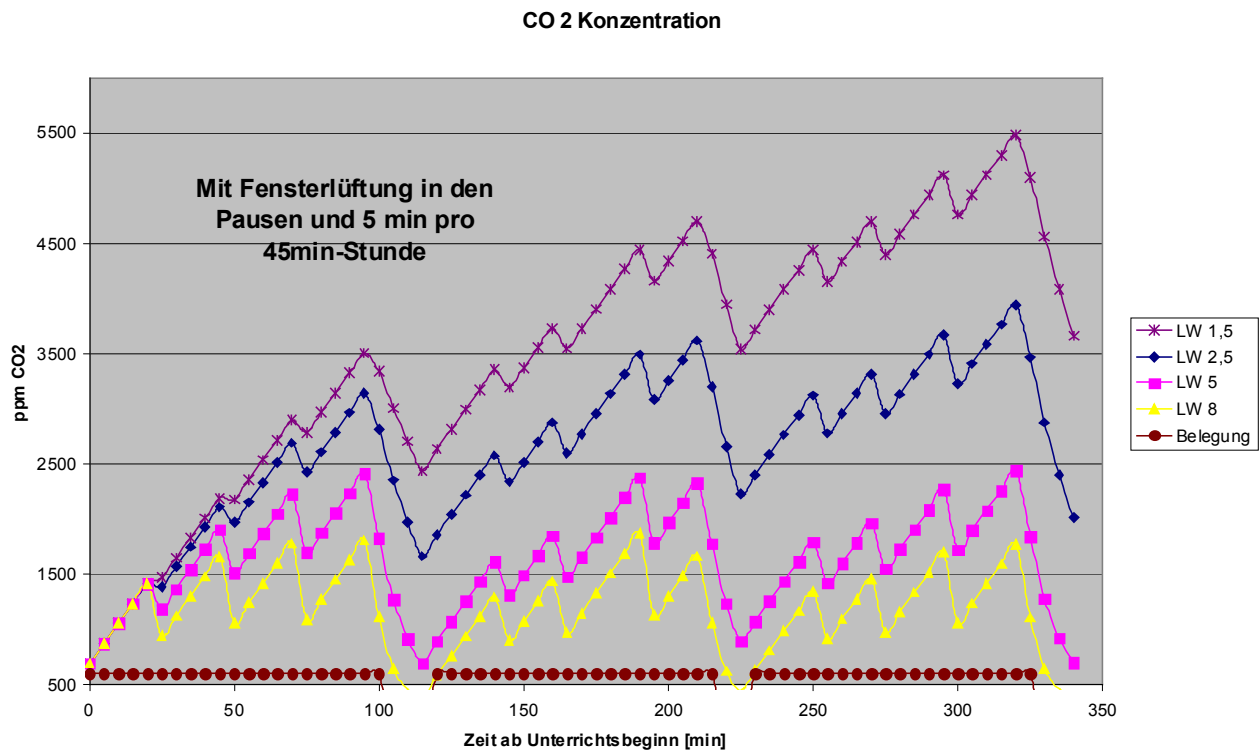


Abbildung 5: CO₂-Konzentration in einer Klasse in Abhängigkeit des Luftwechsel bei Fensterlüftung; jeder Abfall der Konzentration beruht auf einer Öffnung der Fenster

In der vorstehenden Abbildung wird deutlich, dass die Fensterlüftung selbst bei optimistischen Annahmen keine ausreichende Luftqualität liefern kann.

3.2.2.4 *Bauliche Umsetzung der Lüftungsanlage*

Die Anordnung der Klassen innerhalb des Gebäudes hintereinander bedingt auch eine entsprechende Anbindung an das Luftverteilernetz. Aus brandschutztechnischen Erwägungen ist es im Gebäude des Schulzentrums Nordhorn dazu günstiger, die Kanalführung innerhalb der Klassen vorzunehmen⁶, um die Flure als Rettungswege frei zu halten, bzw. den Installationsaufwand gering zu halten. Die vorgenommene Installation der Lüftungskanäle auf Seiten der Flurwand bietet zu dem den Vorteil, dass kein zusätzliches bauliches Volumen für die Technik geschaffen werden muss, was die Kosten günstig beeinflusst.

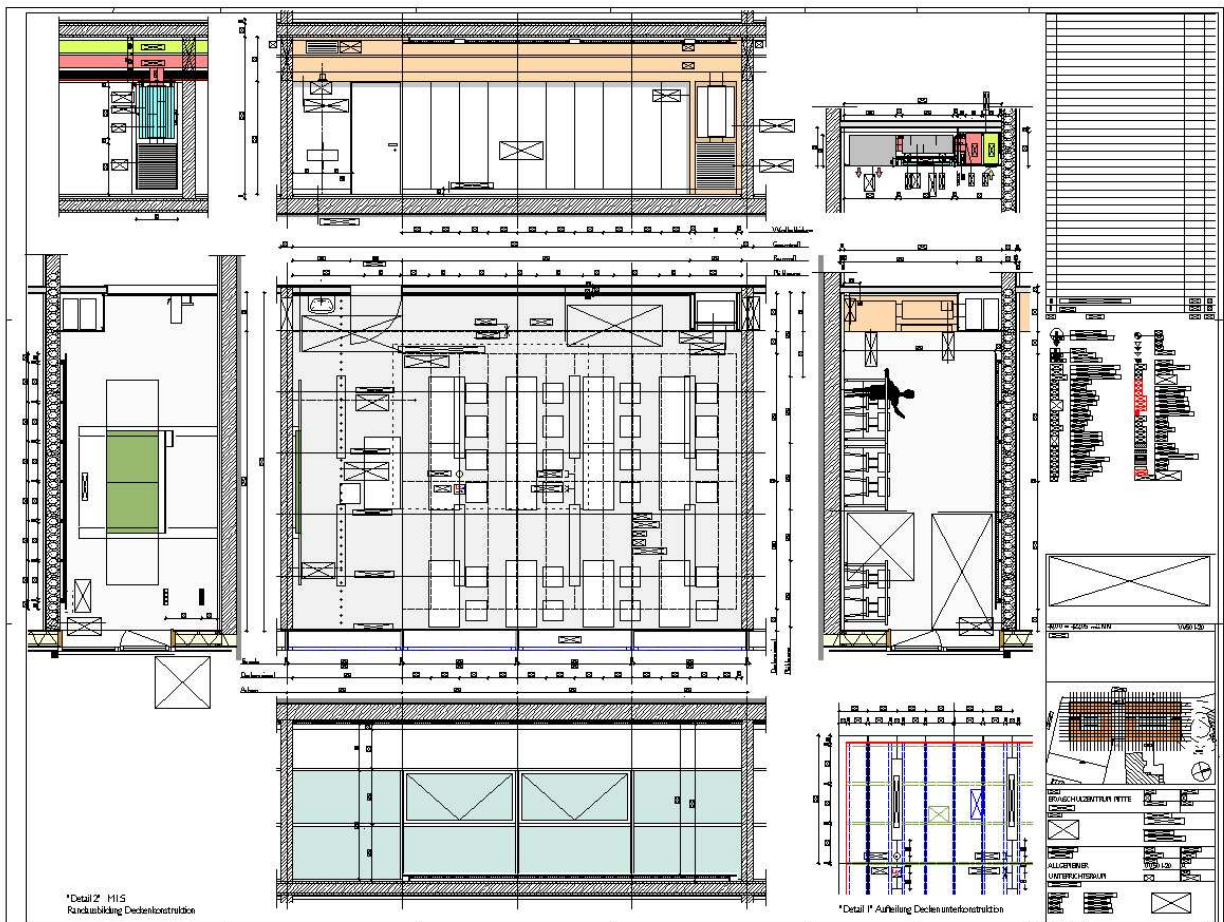


Abbildung 6: Abwicklung Klassenraum

⁶ generell sollte in Schulen von einem Brandschutzsachverständigen die Absicherung eingehend analysiert werden, um eine kostengünstige Verlegung der Kanäle zu erreichen

Zur Sicherstellung eines akzeptablen Austauschgrades wird auf die häufig in Passivhäusern praktizierte Überströmung von Luft aus Aufenthaltsbereichen bzw. den Klassen in Abluffbereiche hier nicht angewandt, obwohl sie energetische Vorteile hat und eine reduzierte Luftqualität in WC's akzeptabel wäre. Problematisch ist bei Nutzung einer solchen Luftführung in Schulen, dass durch den hohen Personenverkehr häufig Türen geöffnet werden und sich damit die Druckbedingungen ändern würden. Weiterhin sind die Anforderungen an den Schall- und Brandschutz bei Überströmung von den Klassen in die Rettungswege nur mit hohem Aufwand und Kosten erreichbar. Aus diesen Erwägungen heraus wird zur Sicherstellung der inneren Luftqualität eine Zu- und Ablufführung in jeder Klasse favorisiert.

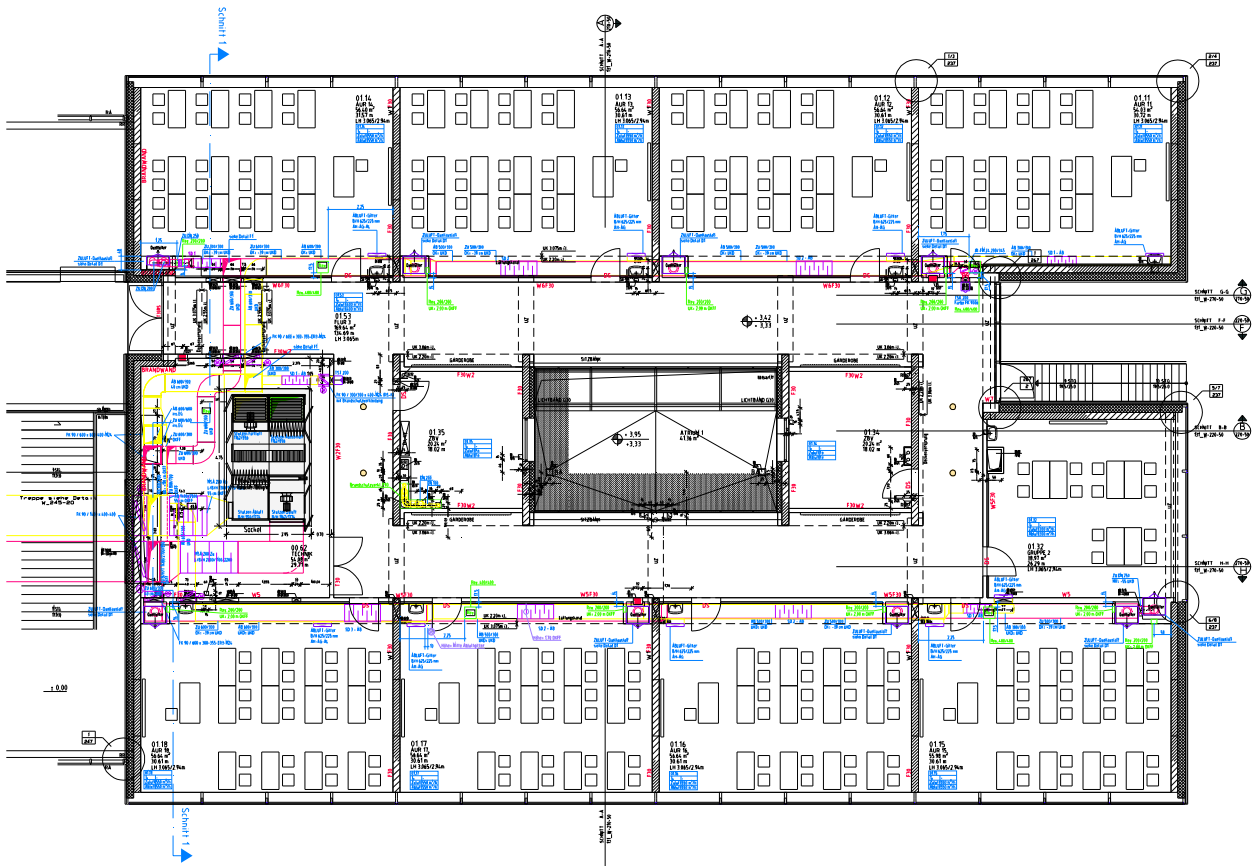


Abbildung 7: Ausschnitt aus der Lüftungsplanung (Obergeschoss Bauteil 1)

3.2.3 Heizung

Die Ermittlung des Heizenergiebedarfs bzw. die Überprüfung des Passivhausnachweises ist nur ein untergeordneter Aspekt zur Durchführung der Simulation, wichtiger ist es, dieses Mittel zur Auslegung und Dimensionierung der Komponenten zu verwenden. Eine minimal dimensionierte Heizung ermöglicht auch nur einen minimalen Nutzereinfluss und gewährleistet, dass die prognostizierten Energieverbräuche auch erreicht werden.

Die Auslegung der Heizflächen ist in Passivhäusern generell ein Problem, da die Anwendung der Auslegungsnorm EN 12831 in der Regel zu weit überhöhten installierten Heizleistungen führt. Zu hohe Heizleistungen führen im Anlagenbetrieb zu Regelabweichungen und zu meist erhöhten Raumtemperaturen. Darüber hinaus ergeben sich erhöhte Betriebsverluste im System, da alle Komponenten entsprechend größer dimensioniert werden müssen.

Dem gegenüber reduzieren niedrige Heizleistungen den Nutzereinfluss auf den Energiebedarf (z.B. bei offenstehenden Fenstern; aufgrund der dann schnell abfallenden Temperatur verringern sich die Öffnungszeiten.)

Es ist notwendig, die Dimensionierung der Heizung mit erhöhtem Planungsaufwand zu betreiben. Die Auslegung wurde daher in der Simulation überprüft und Abweichungen von der Norm bestätigt. Als Aspekte wurde darüber hinaus untersucht, welche Betriebsweise der Heizung die ermittelte Energiekennzahl auch sicherstellt.

3.2.3.1 Heizleistung

Die Auslegung der Heizkörper (zur Begründung der Heizkörper siehe 3.1.3) erfolgte nach den derzeitigen Richtlinien (EN 12831) jedoch unter Verzicht auf Aufheizschläge, ohne Berücksichtigung von internen Lasten, unter Reduktion des Wärmebrückeneinflusses und unter Berücksichtigung, dass die Lüftungsanlage die Luft mit Solltemperatur zuführt.

Es ergibt sich nach diesen Berechnungen eine Heizleistung von 16 W/m^2 , dieser Wert diente als Grundlage für die weiteren Untersuchungen.

3.2.3.2 Betrieb der Heizung

Allgemein wird eine Unterbrechung der Beheizung in Passivhäusern als nicht sinnvoll erachtet. Diese Aussage ist für Wohngebäude sicher auch richtig, da in Wohngebäuden üblicherweise nur mit Luft beheizt wird und meistens keine Nutzungsunterbrechungen stattfinden. Beides trifft für die Schulnutzung nicht zu, daher sollte die Beheizung wegen der geringen Nutzungszeiten unabhängig von der Belüftung sein.

Im betrachteten Gebäude liegt die Nutzungszeit unter 1000 h pro Jahr, so dass ein erhebliches Einsparpotential besteht, wenn eine Absenkung der Temperatur außerhalb der Nutzungszeiten zugelassen wird. Zu untersuchen ist daher, ob- ohne zusätzlich installierte Heizleistung- die Soll-Temperatur schnell genug wieder hergestellt werden kann, um die Verluste bei Fehlnutzung (z.B. Öffnen der Fenster) zu begrenzen.

Die folgende Graphik zeigt den Temperaturverlauf in einem Mittel- und Endraum, bei Unterbrechung der Beheizung.

Deutlich wird aus den folgenden Abbildungen, dass die Temperaturen stärker als vermutet nachts abfallen. Aufgrund der hohen Gebäudemasse und der gezeigten Komforttemperatur, die auch die Temperatur der Wände berücksichtigt, ist offensichtlich, dass die Masse bei sehr kalter Witterung nicht vollständig aufgeheizt ist, die Heizzeiten sind dazu zu kurz. Die Lufttemperatur fällt bei kalter Witterung bis auf 16 °C ab, wenn die Heizung ausgeschaltet ist. Insgesamt ist der Komfort hoch und erfüllt die Komfortanforderungen nach EN 15251. Ausnahme ist der morgendliche Beginn des Unterrichts, hier ergeben sich etwas geringere Komforttemperaturen, die jedoch ähnlich denen in Gebäuden gebaut nach EnEV sind ($18\text{-}19\text{°C}$). Dies betrifft insbesondere den Wochenanfang. Es ist jedoch erkennbar, dass durch die hohe Wärmefreisetzung durch die SchülerInnen die Temperaturen schnell ansteigen. Der Startzeitpunkt für den Beginn der Heizung ist in den nachstehenden

Abbildungen 5 Uhr morgens, ein späterer Startpunkt wurde deshalb ebenfalls untersucht (s. Abschnitt 3.2.3.4).

Die Energiekennzahl liegt für die Klassenräume bei 15 kWh/m²a, was 15% günstiger als nach der Berechnung mit dem PHPP-Verfahren ist. Ursache für diese Abweichungen dürften die Annahmen im PHPP bezüglich der Nutzbarkeit der internen Wärmegewinne sein. Durch den intermittierenden Betrieb der Heizung wird die Gebäudemasse stärker speichernd und kann deshalb mehr Wärme aufnehmen. Die Nutzbarkeit der internen Gewinne ist daher höher als im PHPP angesetzt, dies kann sicher nicht verallgemeinert werden, da das Schulzentrum Nordhorn zum einen eine hohe aktivierbare Gebäudemasse besitzt und zum anderen der Heizbetrieb daraufhin optimiert wurde.

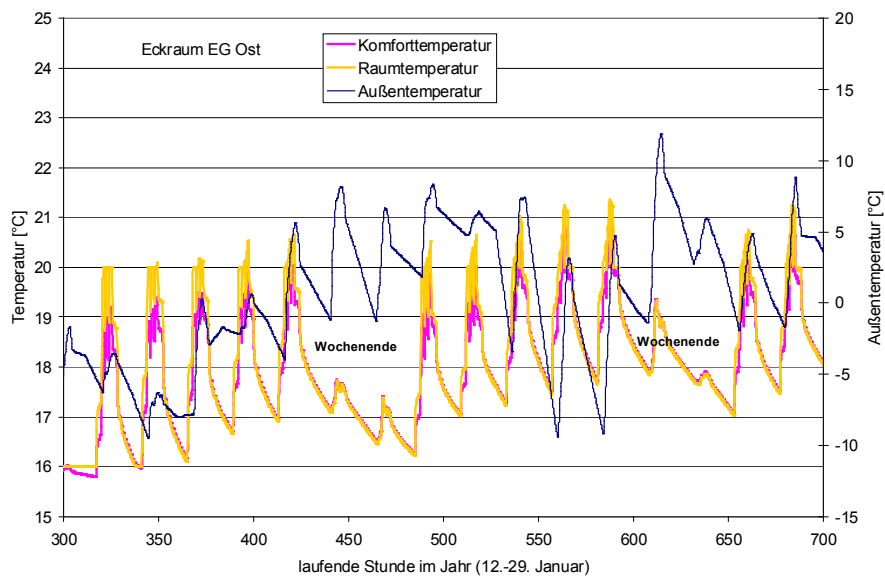


Abbildung 8: Temperaturen in einem Eckraum in einer Periode mit tiefen Außentemperaturen

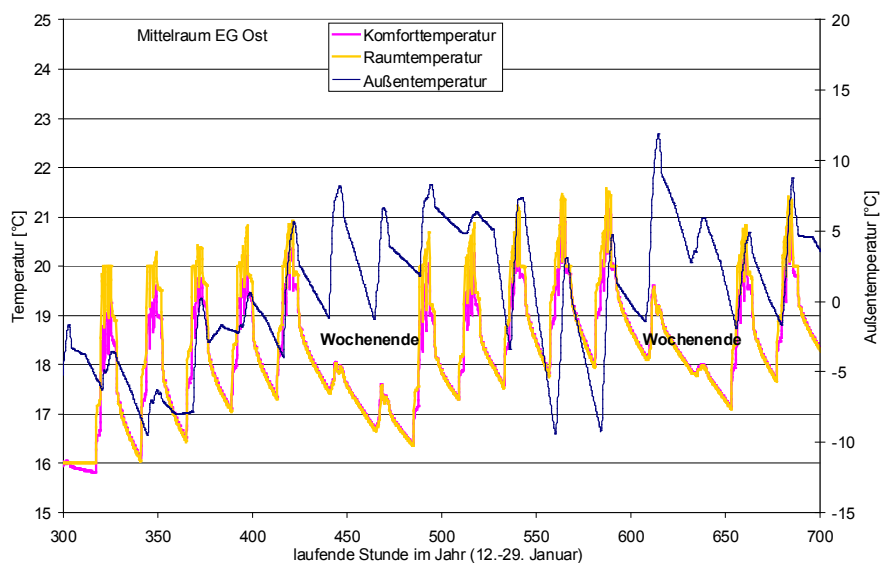


Abbildung 9: Temperaturen im Mittelraum in einer Periode mit tiefen Außentemperaturen

3.2.3.3 Komfort

Der Komfort in Gebäuden wird über die sogenannte Komforttemperatur oder operative Raumtemperatur beschrieben, die sich aus der Raumlufthtemperatur und der Temperatur der Umschließungsflächen, also Wand-, Boden-, Decken- und Fenstertemperatur, zusammensetzt.

Bei einer für Schulen festgesetzten Raumlufthtemperatur von 20°C ist die Komforttemperatur deshalb, aufgrund des Temperaturgefälles über die Bauteile nach außen, immer niedriger als die Raumlufthtemperatur. Passivhäuser haben aber den Vorteil, dass aufgrund des hohen Dämmstandards der Unterschied zwischen Luft- und Komforttemperatur sehr klein ist und der Komfort deshalb hoch ist.

Die folgende Graphik zeigt den Komfort im kritischeren Eckraum, aufgetragen ist die operative Raumlufthtemperatur, die den Komfort ausdrückt in Abhängigkeit der vorherrschenden Außentemperatur. Die Auftragung enthält nur Punkte innerhalb der Nutzungszeit.

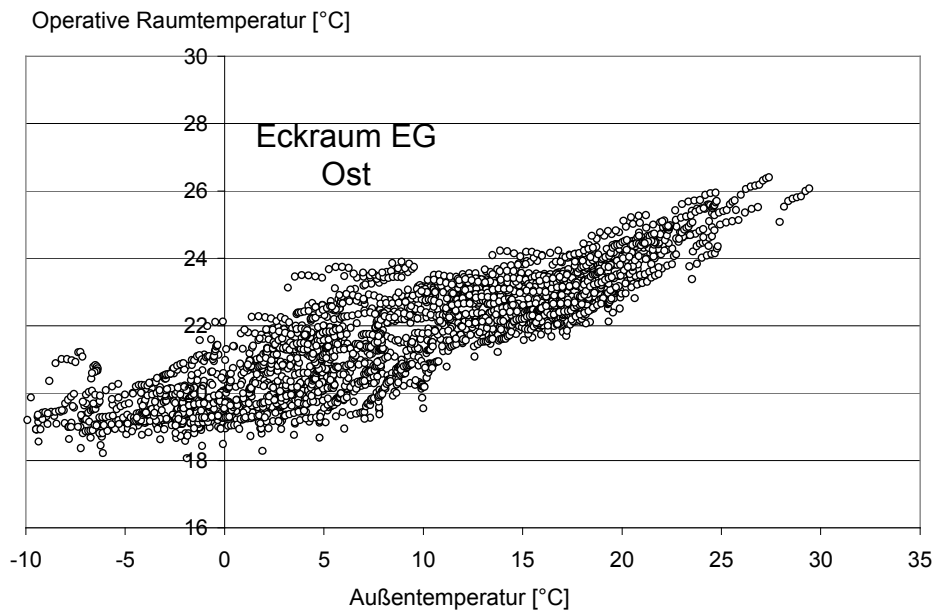


Abbildung 10: Komforttemperatur im kritischsten Raum (Eckraum) für den Fall der Beheizung mit Nachtabsenkung auf 16°C (ein Punkt steht für den Komfort innerhalb einer Zeitspanne von 10 min)

Die vorstehende Abbildung zeigt deutlich, dass die niedrigsten Komforttemperaturen, die bei etwa 18,2 °C liegen, nicht bei den kältesten Außentemperaturen auftreten, es handelt sich um die morgendlichen ersten 10 min nach Wochenenden mit Auskühlung bis auf die Stütztemperatur von 16°C.

In der Beurteilung des Komforts ist weiterhin zu berücksichtigen, dass in der Simulation die Heizung virtuell simuliert wird, d.h. die Heizfläche ist in der Komfortbetrachtung als heiße Fläche nicht berücksichtigt. Da die Fläche ca. 1,5 m OKFF angebracht ist, hat sie jedoch einen erheblichen Einfluss. Weiterhin liegt der Mittelraum im Komfort deutlich günstiger, da er eine Außenwand weniger besitzt. Die Untersuchungen dienen jedoch in erster Linie der Ermittlung eines optimierten Heizbetriebes, so dass auf eine vollständige Darstellung verzichtet wird. Zur Verbesserung des Komforts wurden weitere Optimierungen der Regelung vorgenommen, das folgende Kapitel zeigt die zugehörigen Ergebnisse.

⁷ Die Norm DIN EN 15251 (2007) /12/ empfiehlt als Komforttemperatur 20°C für Unterrichtsräume, dies steht jedoch im Widerspruch zu Richtlinien zur Beheizung von Schulen (AMEV) /13/, die 20°C als Raumlufthtemperatur vorgeben.

3.2.3.4 Optimierung des Heizbetriebes (Regelung)

Die folgende Tabelle zeigt den unterschiedlichen Heizenergiebedarf des simulierten Bereichs in verschiedenen Regelungsvarianten.

	Eckraum kWh/m ² a	Mittelraum kWh/m ² a
PHPP (ganzes Gebäude)	17	
durchgehend beheizt	18,1	16,2
Absenkttemperatur 16°C Heizbeginn 5 Uhr	14,8	13,9
Absenkttemperatur 17°C Heizbeginn 6 Uhr	15	14,1

Tabelle 3: Energiekennzahl eines Eck- und Mittelraumes in Abhängigkeit der Beheizung

Die Unterschiede sind erwartungsgemäß recht gering. Zur Beurteilung der Absenkttemperatur wird daher der Komfort bzw. die Raumtemperatur als ergänzendes Kriterium herangezogen.

Die in Abbildung 10 bei niedrigen Außentemperaturen gezeigten Punkte im Komfortbereich von etwa 18,5-19°C treten bevorzugt nach Wochenenden auf, eine Veränderung der Regelung und auch eine Erhöhung der Heizleistung durch eine Anhebung der Kennlinie wird daher für diese Zeiten als Verbesserung untersucht. Die folgende Graphik zeigt die Beheizung eines Eckraumes mit späterem Startpunkt am Montagmorgen (6°Uhr), einer verringerten Absenkttemperatur (17°C) und einer erhöhten Steigung der Heizungskennlinie. Der Vorteil dieser Änderungen ist, dass sie alle durch Einstellungsparameter realisierbar sind und daher ohne Kosten der tatsächlichen Nutzungsgewohnheiten angepasst werden können.

Der Einfluss auf die Energiekennzahl bei Erhöhung der Heizleistung durch Anhebung der Kennlinie ist nicht unerheblich, sie steigt gegenüber der Variante 17°C/6 Uhr um 25%, insgesamt ist bei allen Einstellmöglichkeiten jedoch der Bedarf der Variante „durchgehende Beheizung“ als Obergrenze zu sehen.

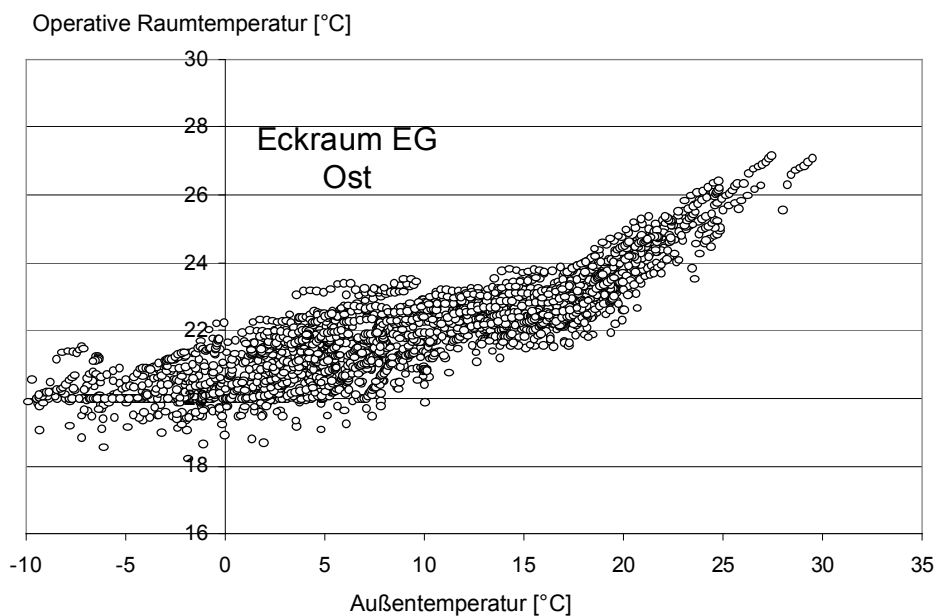


Abbildung 11: Komfort mit einer verbesserten Aufheizregelung in Abhängigkeit der Außentemperatur, Nachtabsenkung auf 17°C, Heizbeginn 6 Uhr

Es ist jedoch anzumerken, dass auch die Variante „durchgehende Beheizung“ bei niedriger Außentemperatur zeitweise nur Komforttemperaturen im Bereich von 19 °C erreicht. Ursache sind die Verglasungstemperaturen und auch die Wandtemperatur, die immer unterhalb der Raumlufthtemperatur (geregelt auf 20°C) liegen. Erst mit einer Regelung der Raumlufthtemperatur auf über 20 °C kann auch eine entsprechend erhöhte Komforttemperatur zu Unterrichtsbeginn erreicht werden. Eine solche Regelung wäre jedoch energetisch nicht sinnvoll. Die folgende Abbildung zeigt einen Tagesgang von Raumlufthtemperatur und Komforttemperatur, deutlich wird, dass die Temperaturen stark auf die Belegung reagieren. Der Komfort erreicht bereits nach 20 min die 20°C Grenze, wobei der Komfort schon zu Unterrichtsbeginn höher als in „normalen“ Wohngebäuden ist.

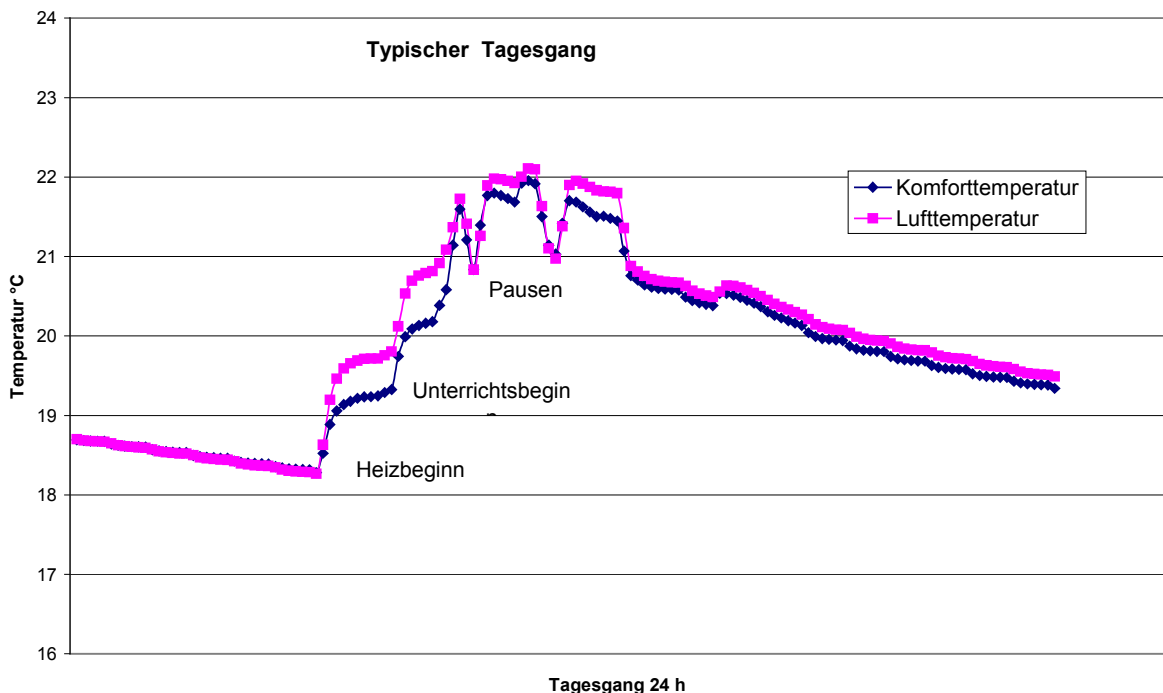


Abbildung 12: Tagesgang von Komfort- und Raumlufthtemperatur an einem typischen Tag in der Heizperiode (Außentemperatur nachts bis -5°C , tagsüber bis 4°C) Solltemperatur 20°C , Start der Heizung 6 Uhr (Ein Punkt in der Graphik entspricht einem 10 min-Wert)

Eine Regelung mit Heizungsunterbrechung wird daher als energetisch optimal angesehen. Da für diese keine zusätzliche Heizleistung installiert werden muss, ist auch der Nutzereinfluss begrenzt, und die angestrebten Energiekennzahlen sollten erreicht werden.

3.2.3.5 Abschalttemperatur (Heizgrenztemperatur)

Die Heizgrenztemperatur legt fest ab welcher Außentemperatur eine Beheizung unterbunden wird. Typische Werte für Passivhäuser sind ca. 12°C . Die Heizgrenztemperatur ist durch interne Wärme- und Solargewinne und niedrige Wärmeverluste bedingt und ist ein Gebäudeparameter unter Berücksichtigung der gebäudespezifischen Nutzung. Eine niedrige Heizgrenztemperatur spart Kesselverluste und Verteilungsverluste, da das Heiznetz und der Kessel eine kürzere Zeit während eines Jahres erwärmt sind. Weiterhin wird Hilfsenergie für den Antrieb der Pumpen gespart. Als Heizgrenztemperatur für das Schulzentrum Mitte wurde 10°C ermittelt. Dies ist in Abbildung 11 ersichtlich, da bei Außentemperaturen über 10°C die Komforttemperatur von 20°C erreicht bzw. überschritten wird.

Die Einsparungen lassen sich durch die Simulation jedoch nicht beziffern, da keine Verteil- und Kesselverluste berücksichtigt sind und diese in der Simulation auch nicht betrachtet werden.

3.2.3.6 Nutzereinfluss

Der Nutzer hat, auch gewollt, die Möglichkeit zwei Fenster in den Klassen in Kippstellung zu bringen. Dies beeinflusst die Lüftungsanlage in der Weise, dass die Wärmerückgewinnung sich geringfügig durch geänderte Raumlufttemperaturen verschlechtern wird. Aufgrund der raumweise zugeführten Zuluft und auch Abluft ergeben sich jedoch keine Änderungen, die den Druck in der Anlage selbst ändern, so dass sich keine nennenswerten Änderungen für benachbarte Bereiche ergeben. Die wesentlichste Änderung betrifft den zusätzlichen Luftaustausch über die Fenster, der zu erhöhten Energieverlusten führt und betrifft somit die Heizung. Da die Heizleistung jedoch auf ein Minimum reduziert ist, ist das Potential für zusätzlich zugeführte Energie gering. Darüber hinaus ist die Heizung über eine Raumtemperaturaufschaltung zusätzlich abgesichert, d.h. die Heizung geht nicht an, wenn die Referenzräume ein Temperaturlimit überschritten haben.

In der Simulation wurde ein Negativnutzerszenario vorgegeben, dass ein zeitweises Öffnen der Fenster beinhaltet und den unbelehrbaren Nutzer repräsentiert. Es wurde angenommen, dass dieser wie gewohnt die Fenster in der Pause öffnet und auch zeitweise im Unterricht. Typischerweise ergibt sich daraus ein erhöhter Luftwechsel, dieser wurde mit zusätzlich 1,5 -h in den angesprochenen Zeiten angenommen. Der Einfluss auf die Energiekennzahl beträgt:3

Eckraum 24,1 kWh/m²a
Mittelraum 22,7 kWh/m²a

Rechnerisch entspricht dies einer 60 %igen Erhöhung der Energiekennzahl, ein Ergebnis, das auch schon in anderen Untersuchungen ermittelt wurde. Da die zugeführten Energiemengen begrenzt sind, wird sich ein solches Verhalten aber nur zeitweise einstellen, niedrigere Innentemperaturen und Komfort wirken einer solchen Verhaltensweise entgegen.

Eine Fensterlüftung wird jedoch wahrscheinlich verstärkt vorgenommen, wenn die Innentemperatur bestimmte Grenzwerte übersteigt. Diese Maßnahme ist zwar häufig nicht mit einer Absenkung der Temperatur verbunden, da die dann meist höher als die Raumlufttemperatur ist, jedoch wird ein solches Verhalten häufig beobachtet. Die öffnenden Fenster sind aus diesem Grund auch bewusst klein dimensioniert, um keine Fensterlüftung zu ermöglichen, die zu Irritationen über die vorherrschende Lüftungsart führen würde. Die Lüftungsanlage sollte deshalb auch im Sommer betrieben werden, da nur sie einen entsprechenden Komfort und auch die notwendige Luftqualität sicherstellen kann.

3.2.4 Sommerlicher Wärmeschutz

Der sommerliche Wärmeschutz wurde im Rahmen der Planung durch die folgenden Komponenten gelöst:

- Außen liegende Verschattung auf der Südostseite
- Strahlungsgeregelte Steuerung des Sonnenschutzes
- Massive Konstruktion
- Nachtlüftungsregelung der Lüftungsanlage

Der Nachweis nach DIN 4108 ist erfüllt.

Auf einen Sonnenschutz auf der Nordwestseite konnte wegen der derzeitigen Unterrichtszeiten (Unterrichtsende 13.15 Uhr) und der vorhandenen natürlichen Verschattung durch nahe stehende, dichte Laubbäume verzichtet werden. Für den Fall einer Unterrichtsverlängerung wurden die Montageelemente für einen Sonnenschutz jedoch vorgerüstet. Überhitzung tritt im Winter und in der Zeit bis zur Laubbildung der Bäume nach den Berechnungen nicht auf.

Zur Vermeidung von Überhitzung durch Personenwärme wurden die gewählten Bauteile, mit Ausnahme der inneren Flurwand, die als akustisches Element genutzt wurde, massiv (Beton) ausgeführt.

Wie vorstehend gezeigt sind die morgendlichen Aufheizzeiten in einem akzeptablen Bereich und ermöglichen einen maximalen sommerlichen Komfort durch hohes Speichervermögen der Bauteile. Zur Abfuhr der während des Tages aufgenommen Wärme, schaltet sich die Lüftungsanlage nachts automatisch an, wenn die Außentemperatur niedriger als die Innentemperatur ist und die Raumlufttemperatur oberhalb einer vorgegebenen Temperaturgrenze liegt.

Im Rahmen der Simulation in Phase 2 werden die Betriebsparameter für die Regelung optimiert, um zu verhindern, dass nutzbare Wärme abgelüftet wird und um die Einschaltgrenzen für die Nachtlüftung zu ermitteln. Ferner gilt es die Betriebspunkte der Wärmerückgewinnung zu finden und in der Regelung umzusetzen.

4. Projektphase 2 (Ausführung im Schlussbericht)

4.1 Einbau einer Lüftungsanlage zur Verbesserung der Raumluftsituation

4.2 Erweiterung der Steuerung und Datenerhebung in der Gebäudeleittechnik als Grundlage für das nachgeschaltete Evaluationsverfahren im Bereich Lüftung und Heizung

4.3 Erweiterung der TGA- Anlage zur Visualisierung des Gebäudebetriebs in Form einer Anzeigetafel in der zentralen Pausenhalle und Anschlüssen in der Fachklasse Chemie

4.4 Zweijährige Evaluation im Schulbetrieb mit kontinuierlicher Erfassung der Verbrauchs- und Klimawerte, Einregulierung der TGA, und Erfassung der Auswirkung des Nutzerverhaltens

4.5 Parallele Präsentation des Evaluationsverfahrens im Schulbetrieb, inkl. Sonderlehrveranstaltungen und besonderer Lehrmittel

5. **Fazit und Ausblick**

Die zum Bauvorhaben Schulzentrum Mitte durchgeführten Simulationen haben die in der Fachliteratur aufgezeigten Abhängigkeiten von Raumhygiene und unterschiedliche Lüftungsszenarien bestätigt. Auch für diese Schule konnte nachgewiesen werden, dass die Fensterlüftung selbst bei optimistischen Annahmen keine ausreichende Luftqualität im Schulbetrieb liefern kann.

Detailliert ausgewiesen wurde, dass mit einer Mischlüftung in eingeschränkter Weise und mit einer Verdrängungslüftung uneingeschränkt die CO₂-Konzentration in den Klassenräumen unter dem Grenzwert von 1.500 ppm gehalten werden kann. Eine zusätzliche Fensterlüftung ist möglich, jedoch nicht erforderlich.

In der ersten Projektphase wurden in der Planung unterschiedlichste Ausführungsvarianten gegenüber gestellt, in denen sowohl die anlagentechnische Steuerung, die Abhängigkeiten der bauphysikalischen Komponenten untereinander und die ökonomischen Parameter verglichen wurden. Die über Simulation ermittelten Einstellungen werden in der 2. Projektphase im Betrieb mit dem tatsächlichen Nutzerverhalten abgeglichen und ggf. optimierende Nachjustierungen vorgenommen. Entsprechende Einstellungsmöglichkeiten wurden in der Auslegung der Anlagentechnik vorgezogen.

Unabhängig von der noch durchzuführenden Feinjustage kann bereits nach der 1. Projektphase grundsätzlich festgestellt werden, dass die maschinelle Lüftung der Klassenräume auf jeden Fall mit einer energetischen Optimierung weit unter die Forderungen nach EnEV (hier Passivhausstandard) gekoppelt werden sollte.

Die mit der Installation einer Lüftungsanlage einhergehenden erhöhten Investitionskosten können so über die Reduzierung der Betriebskosten (reduzierter Wärmebedarf) kurz- bis mittelfristig kompensiert werden. In Anlehnung an die Betrachtungen der Kostenfaktoren zum Schulzentrum Mitte kann davon ausgegangen werden, dass eine Kostenneutralität nach 10 bis 15 Jahren eingestellt werden kann. Detaillierte Angaben können zum Schlussbericht gegeben werden.

Ebenfalls aufgezeigt werden konnte, dass die Qualitätsanhebung des Schulstandards auf eine Ausführung mit der notwendigen Lüftungsanlage bzw. auf Passivhausstandard nicht unbedingt mit einer Anhebung des Baukostenindex einhergeht. Nachgewiesen wurde, dass bei engagierter integraler Planung ein solcher Standard durchaus im üblichen Kostenrahmen nach BKI realisierbar ist.

Die Weiterentwicklung des Passivhausstandards im Nichtwohnungsbau hat in den letzten Jahren, insbesondere in der Anlagentechnik zu erheblichen kostenreduzierenden Modifikationen geführt. Die anfänglich notwendigen Sonderkonstruktionen werden mittlerweile in Serie produziert.

Da sich die Entwicklung des Energiestandards auch im Nichtwohnungsbau langsam in Richtung Passivhausstandard abzeichnet, wird sich der Trend zur Entwicklung einfacher und kostengünstiger Passivhaus- Bauteile weiter fortsetzen.

Die Notwendigkeit einer unterstützenden mechanischen Lüftung in Klassenräumen wurde wiederholt nachgewiesen, die Realisierung eines Schulstandards mit Lüftungsanlage und reduziertem Heizwärmebedarf kann im Rahmen des Kostenindex BKI realisiert werden und stellt mittelfristig die kostengünstigere Ausführungsvariante dar.

Auf der Basis der Erkenntnisse aus verschiedenen realisierten Referenzprojekten sollte hierzu der dringend benötigte Handlungsleitfaden für Schulgebäude auf dem aktuellen Stand der Technik erstellt werden!

6. Literatur

- /1/ Leitfaden für Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden, Herausgeber : Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes, Berlin 2000 und diesbzgl. Presse- Information 87/2004 der Umweltbundesamtes
- /2/ Endbericht zur Innenraumsituation in oberösterreichischen Pflichtschulen, Berufsschulen und landwirtschaftlichen Fachschulen, Herausgeber : Umweltland Oberösterreich mit BOKU, seibersdorf research, AGES und INNENRAUM Mess & Beratungsservice, Wien 2003
- /3/ AMEV (Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnikstaatlicher und kommunaler Verwaltungen) Aufsteller und Herausgeber: Hinweise zur Planung und Ausführung von Raumluftechnischen Anlagen für öffentliche Gebäude (RLT-Anlagenbau 2004), Berlin 2004
- /4/ TRNSYS, A Transient System Simulation Program, Vers. 16.0, Univ. v. Wisconsin, Madison 2007
- /5/ Ventilation for acceptable indoor quality. ASHRAE Standard 62.1, 2007
- /6/ Seppänen, O., Fisk, W. J., Lei Q. H.: Ventilation and performance in office work Indoor Air 16 (1) , 28–36 (2006)
- /7/ Coley, D. A., Greeves, R., Saxby, R.K.: The Effect of Low Ventilation Rates on the Cognitive Function of a Primary School Class. Int. Journal of ventilation, Vol. 6.2, 2007 S. 107-112
- /8/ Myhrvold, A.N., Olsen, E., Lauridsen, O. Indoor environment in Schools- Pupils' Health an Performance in regard to CO₂ Concentrations., The 7th Int. Conf. On Indoor Air Quality and Climate Vol.4. pp 369-371, Japan 1996
- /9/ Sneedje, G., Norbeck, D. et.al.: Mental performance by secondary school pupils in relation to the quality of indoor air. Indoor Air 96, The 7th Int. Conf. On Indoor Air Quality and Climate Nagoya, Japan 1996
- /10/ C.Filleux, S.Krummenacher, D.Aiulfi. P.Churad. Zeitgemäße Lüftungssysteme, Aktuelles Wissen und Leitfaden für die Projektierung bei Dienstleistungsgebäuden. VSHL Zürich 1994
- /11/ A.Schälin, Q.Chen, A.Moser, P.Suter: Raumströmungsatlas, ETH Zürich 1994
- /12/ DIN EN 15251 2007, Eingangsparamter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden- Raumlufqualität, Temperatur, Licht und Akustik. Deutsche Fassung EN 15251:2007, Berlin 2007
- /13/ AMEV (Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnikstaatlicher und kommunaler Verwaltungen) Aufsteller und Herausgeber: Planung und Bau von Heizanlagen in öffentlichen Gebäuden (Heizungsanlagenbau 95), Bonn 1995

7. Anlagen

- **Anlage 1**
Kostenberechnung der geplanten 3 Gebäudestandards
- **Anlage 2**
Wirtschaftlichkeitsberechnung des Passivhausstandards
- **Anlage 3**
Auszug Ausführungsplanung
- **Anlage 4**
Fotodokumentation