

# **Energetische Sanierung von Bildungsstätten – Entwicklung von kostenoptimierten Sanierungsmaßnahmen**

Von der  
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina  
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines  
**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**  
genehmigte

**Dissertation**

von  
**Dipl.-Ing. Arne Diedrich**  
geboren am 23. Mai 1984  
aus Gifhorn

Eingereicht am: 17. Oktober 2017  
Disputation am: 19. Dezember 2017

Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Norbert Fisch  
Univ.-Prof. em. Per Krusche

Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig  
zur Erlangung des Grades  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Eingereicht am: 17. Oktober 2017

Disputation am: 19. Dezember 2017

Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Norbert Fisch  
Univ.-Prof. em. Per Krusche

## **DANKSAGUNG**

Diese Arbeit entstand während meines Promotionsstudiums sowie meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Gebäude- und Solartechnik der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Für die finanzielle Förderung möchte ich mich bei der Reiner Lemoine-Stiftung sehr herzlich bedanken. Die Bewilligung dieses Stipendiums und das Interesse an diesem Thema haben wesentlich zum Erfolg dieser vorliegenden Arbeit beigetragen.

Sehr herzlich möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Norbert Fisch für die Betreuung meiner Dissertation bedanken. Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. em. Per Krusche, der diese Arbeit als Berichterstatter begleitet hat. Zudem möchte ich mich beim Prüfer Herrn Univ.-Prof. Werner Kaag und bei Herrn Univ.-Prof. Berthold H. Penkhues bedanken, der den Vorsitz der Prüfungskommission übernommen hat. Für die gewinnbringenden Fachdiskussionen während der Konzepterstellung und der Ausarbeitung möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Lars Kühl, Herrn Prof. Volker Huckemann, Herrn Dr.-Ing. Stefan Plesser und Herrn Thomas Wilken bedanken.

Für die redaktionelle Unterstützung bin ich Frau Dr.-Ing. Jennifer König, Frau Christina Spika, Frau Leonie Früh-Sydow und Herrn Florian Witowski sehr dankbar. Einen großen Dank gebührt allen Kolleginnen und Kollegen sowie Hilfswissenschaftlern während meiner Zeit am IGS.

Schließlich möchte ich mich bei meiner Partnerin Melanie Dick von Herzen bedanken, die durch ihre anhaltende Motivation und mentale Unterstützung zur Fertigstellung dieser Arbeit beigetragen hat.



## KURZFASSUNG

Die Bundesregierung verfolgt zur Umsetzung der gesetzten Klimaschutzziele bis 2050 [1], [2], [3] eine Reduzierung des Energieverbrauchs von Gebäuden. Der gesetzte Fokus auf die energetische Sanierung des Gebäudebestands weist gegenüber der Neubautätigkeit ein höheres Beitragspotenzial zum Erreichen dieser ambitionierten Ziele auf (vgl. [4] S. 24 ff., S. 38. ff. und 62 ff.). Die Umsetzung von baulichen Maßnahmen zur Reduzierung des Energiebedarfs unterliegt dabei den Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV). Die Einführung der EnEV im Jahr 2002 sowie die Novellierungen 2007, 2009 und 2014 (vgl. [5], [6], [7], [8]) haben die z.T. komplexen Anforderungen schrittweise verschärft.

Ausgangspunkt dieser Arbeit ist der hohe Sanierungsbedarf von 18.000 Schulen in Deutschland (vgl. [9] S. 37 f.). Im Jahr 2009 förderte das Zukunftsinvestitionsgesetz (vgl. [10] § 3) u.a. die energetische Sanierung von Bildungsstätten. Ziele dieser Sanierungen waren die Verringerung des Energieverbrauchs und CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie die Verbesserung des Innenraumkomforts.

In einer Feldstudie wurden 17 Schulsanierungen aus den Jahren 2008 bis 2010 untersucht, die unterschiedliche Konzepte zur Einhaltung der EnEV-Anforderungen aufweisen. Die Bewertung der erreichten Energieeffizienz unter Berücksichtigung des Einsatzes regenerativer Energien sowie die Wirtschaftlichkeit bildeten die Schwerpunkte der Untersuchung. Die Betrachtung der Qualität des Innenraumkomforts ergänzte die Evaluierung.

Ziele der Arbeit sind die Entwicklung von kostenoptimierten Sanierungsmaßnahmen für Bildungsstätten und die Zusammenführung zu einem ganzheitlichen Konzept. Dabei soll eine höhere Kosten-Nutzen-Effizienz gegenüber den evaluierten Schulbauten nachgewiesen werden und eine Übertragbarkeit auf den Gebäudebestand gegeben sein. Mittels dieser Übertragbarkeit sollen zukünftig Planungsprozesse vereinfacht und die Umsetzungen verbessert werden.

Die Erkenntnisse der Feldstudie zeigen, dass der Fokus auf der Reduzierung des Wärmeverbrauchs liegt und die Integration regenerativer Energien in die Wärme- und Stromversorgung vernachlässigt wird. Der Kostenanteil zur Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes entspricht rund 70 % aller energetisch relevanten Sanierungskosten. In lediglich vier der 17 Gebäude wurden wärmeproduzierende Anlagen auf Basis erneuerbarer Energien umgesetzt.

Die Sanierungsmaßnahmen, die zu einer Verringerung des Stromverbrauchs beitragen, führen nach VDI 2067 zu einer Reduzierung der Jahresgesamtkosten und sind in der Regel wirtschaftlich (vgl. [11] S. 7 ff.). Die Substituierung des Wärmeverbrauchs durch die Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes nimmt zweitrangig auf den ökonomischen Erfolg Einfluss. Lediglich zwei der evaluierten Schulsanierungen erzielen eine Verringerung der Jahresgesamtkosten. In der Regel erhöhen sich die Jahresgesamtkosten durch die Sanierungen um bis zu  $25 \text{ €}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ .

Integrale Gedanken zur Verbesserung des Innenraumkomforts sind durch die Installation raumluftechnischer Anlagen mit wärmerückgewinnenden Systemen zu erkennen. In mechanisch belüfteten Klassenräumen ist eine Verringerung der CO<sub>2</sub>-Konzentration gegenüber den natürlich belüfteten Räumen festzustellen. Die Einhaltung einer guten Luftqualität nach VDI 6040 (vgl. [12] S. 4) führt zu einer Leistungssteigerung der Schüler und Lehrer nach Wargocki (vgl. [13] S. 4 ff.) um > 5 %. Diese Erkenntnisse decken sich mit den Ergebnissen nach König (vgl. [14] S. 154 ff.).

Es erfolgt eine Ableitung kostenoptimierter Maßnahmen für Komponenten der thermischen Gebäudehülle in Abhängigkeit zum Wärmeversorgungs-konzept und den eingesetzten Energieträgern. Unter dem Begriff des Kostenoptimums wird der Zustand eines ausgewogenen Kosten-Nutzen-Verhältnisses verstanden, das sich nach VDI 2067 aus Kapital, Betriebs- und Bedarfskosten (vgl. [11] S. 7 ff.) bildet. Die Ableitung stellt eine überhöhte Qualität des baulichen Wärmeschutzes an 53 % aller untersuchten Bauteile fest. Diese Maßnahmen weisen überhöhte Sanierungskosten auf, die aus ökonomischer Sicht nicht zu rechtfertigen sind.

Die Zusammenführung dieser Maßnahmen zu einem ganzheitlichen Sanierungskonzept berücksichtigt zudem technische Anlagen zur Beleuchtung und Belüftung der Gebäude sowie zur regenerativen Wärme- und Stromproduktion. Die Ableitung eines kostenreduzierten Betriebs von RLT-Anlagen zeigt Potenziale zur weiteren Reduzierung des Energiebedarfs auf, ohne dabei die Luftqualität zu verschlechtern. Die regenerative Wärme- und Stromproduktion erzielt eine Verringerung des Primärenergiebedarfs und der CO<sub>2</sub>-Emission sowie eine Reduzierung der Jahresgesamtkosten.

Die beispielhafte Anwendung des entwickelten Konzepts an einem Referenzgebäude aus der Feldstudie zeigt, dass die Umsetzung einer dezentralen, regenerativen Wärme- und Stromproduktion sowie deren Nutzung von Vorteil sind. Dieser Ansatz kann sich gegenüber den Konzepten, die allein auf der Reduzierung des Wärmebedarfs basieren, ökonomisch und ökologisch effektiver darstellen, ohne dabei höhere Jahresgesamtkosten zu verursachen.

Zukünftig ist eine gezielte Investition in den Gebäudebestand möglich, die mit der Reduzierung von Energiekosten zur Entlastung der kommunalen Haushaltskassen führt. Schulen können energetisch effizienter saniert und, bei gleichzeitiger Steigerung des Innenraumkomforts, ökonomisch betrieben werden. Ein integraler Ansatz wird mit den Ergebnissen dieser Arbeit als einheitliche Planungsgrundlage angeboten und lässt die Übertragbarkeit auf andere Projekte zu.

Das ganzheitliche Sanierungskonzept kann bereits heute die klimapolitischen Ziele der Bundesregierung bis 2050 [1], [2], [3] erfüllen. Die Bilanzgrenze des Konzepts bildet in diesem Zusammenhang das Gebäudegrundstück. Das Konzept wird als zukünftiger Sanierungsstandard „**Klimaschutzschule**“ vorgeschlagen und kann die nach EDBP (vgl. [15] Abs. (24), S. 16) geforderte Vorbildfunktion öffentlicher Gebäude stärken.

## ABSTRACT

By following the climate protection goals set for 2050 [1], [2], [3] the German federal government pursues a substantial decrease in energy consumption of buildings. Prioritization of energy-related renovation of the building stock over new construction offers a higher potential to reach the ambitious goals (cp. [4] p. 24 ff., p. 38 ff. and p. 62 ff.). The realisation of constructional measures is subject to the high demands of the Energy Saving Ordinance (EnEV) on the energy efficiency of buildings. The introduction of EnEV in 2002 and its amendments in 2007, 2009 und 2014 (cp. [5], [6], [7], [8]) led to a tightening of the extensive requirements.

The starting point of this dissertation is the high demand for renovations of 18,000 schools in the German school infrastructure (cp. [9] p. 37 f.). Since 2009 the Future Investment Act (cp. [10] § 3) supports the energy-related renovation of educational institutions. The realisation of these executions aims at decreasing energy consumption and carbon dioxide emissions in addition to the improvement of the indoor environment quality.

In a field study this dissertation examines the renovations of 17 schools between 2008 and 2010. The analysed schools followed different concepts to achieve conformance with EnEV. The evaluation was based on their achieved energy efficiency, taking into consideration the use of regenerative energies as well as economic feasibility. In addition, the indoor environment quality considered the evaluation.

This dissertation aims to highlight and develop cost-efficient measures for educational institutions and the merging to an integral concept. This concept has to offer a higher cost and energy efficiency compared to the evaluated buildings and must be applicable to the stock of the school infrastructure. This transferability is intended to simplify future planning processes and to accelerate the renovation of public buildings.

The findings of the field study show that the main focus is put on the reduction of heat consumption, whereas the integration of regenerative energies into the supply concepts is neglected. The portion of costs used for improving the thermal insulation equates to about 70 % of all energy related construction costs observed in the field study. Merely four of the 17 buildings included renewable energies as the base of their heat producing facilities.

A dependency between the change of the current consumption and the economic success of a renovation is established. The overall measures that result in a decrease of current consumption offer a decrease in total annual costs. This fact leads to an economic advantage over the measures that result in an increased current consumption. The substitution of heat consumption through improvement of the structural thermal protection takes secondary influence on the economic success. Only two of the evaluated schools achieved a decrease in total annual costs according to VDI 2067 (cp. [11] p. 7 ff.) and can therefore be rated as economical. The total costs are increased by up to 25 €/m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a after these renovations.

Integral thoughts about learning effectiveness and indoor environment quality become visible through the installation of building ventilation systems with heat recovery systems. In mechanically ventilated classrooms the carbon dioxide concentration is lower than in naturally ventilated rooms. As stated by Wargocki et al. (cp. [13] p. 4 ff.) the assurance of good air quality according to VDI 6040 (cp. [12] p. 4) predicts an improved performance of pupils by more to 5 %. These results correspond to the findings of König (cp. [14] p. 154 ff.).

Cost-optimized measures for components of the thermal building envelope are derived as a function of heat supply concepts and the energy sources used. The concept of a cost benefit is the state of a balanced cost-benefit ratio, which is made up of capital, operating and demand costs according to VDI 2067 (cp. [11] p. 7 ff.). When deducing the upper limit of structural thermal protection, an “over-insulation” becomes apparent in 53 % of all evaluated components. These measures exhibit excessive construction costs that can't be justified from an economic point of view.

The integration of these measures into a holistic renovation concept also takes into account technical installations for the lighting and ventilation of buildings as well as the heat and electricity production based on renewable energies. The derivation of a cost-reduced operation of ventilation systems shows potentials for a further reduction of the energy requirement without impairing the air quality. The decentralized heat and electricity production and self-use result in a reduction in primary energy demand and CO<sub>2</sub>-emissions as well as a reduction in annual total costs.

The exemplary application of the developed concept to a reference building from the field study shows that the implementation of decentral, regenerative heat and electricity production is beneficial. In comparison to overall measures that are based solely on the reduction of heat consumption, this approach is economically and ecologically more efficient, without causing increased construction costs.

Through realization of the holistic renovation approach in the future, targeted investments that lead to the relief of communal budgets will be possible. Schools can be renovated in a more energy efficient way and operated with more economic success, without neglecting the subject of indoor environment quality. Based on the results of this study a comprehensive approach is offered as a consistent planning foundation which can be transferred to be used in other projects.

Already today the merging of these measures can lead to an over compliance of the goals set by the federal government with their climate protection policies to be reached by 2050 [1], [2], [3] in terms of a building's balance limit. The holistic renovation approach will be suggested as future renovation standard „**Klimaschutzschule**“ and can invigorate the exemplary character of public buildings stipulated by EDBP (cp. [15] para. (24), p. 16).

## NOMENKLATUR

### Abkürzungen und Begriffe:

<b>ABS</b>	Allgemeinbildende Schulen	<b>NGF</b>	Nettogrundfläche
<b>BBS</b>	Berufsbildende Schulen	<b>NRI</b>	Nettorauminhalt
<b>BGF</b>	Bruttogrundfläche	<b>PBP</b>	Pay-Back-Period
<b>BRI</b>	Bruttorauminhalt	<b>PLV</b>	Preis-Leistungs-Verhältnis
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlendioxid	<b>PMV</b>	Predicted Mean Vote
<b>EDBP</b>	European Directive of Building Performance	<b>PPD</b>	Predicted Percentage of Dissatisfied
<b>EnEG</b>	Energieeinsparungsgesetz	<b>PWWH</b>	Pumpen-Warmwasser-Heizung
<b>EnEV</b>	Energieeinsparverordnung	<b>RLT-(Anlage):</b>	Raumluftechnische (Anlage)
<b>EVG</b>	Elektronisches Vorschaltgerät	<b>SFP</b>	Spezifische Ventilatorleistung
<b>FFA</b>	Fensterflächenanteil	<b>SSV</b>	Sonnenschutzverglasung
<b>FS</b>	Förderschulen	<b>SWWH</b>	Schwerkraft-Warmwasser-Heizung
<b>IDA</b>	Raumluftkategorie	<b>TF</b>	Technische Funktionsfläche
<b>ISO</b>	Isolierverglasung	<b>VF</b>	Verkehrsfläche
<b>KF</b>	Klimafaktor (Witterungsbereinigung)	<b>WDVS</b>	Wärmedämmverbundsystem
<b>KGF</b>	Konstruktionsgrundfläche	<b>WLG</b>	Wärmeleitgruppe
<b>KVG</b>	Konventionelles Vorschaltgerät	<b>WRG</b>	Wärmerückgewinnende Systeme
<b>KWK</b>	Kraft-Wärme-Kopplung	<b>WSV</b>	Wärmeschutzverglasung
<b>NF</b>	Nutzfläche	<b>WSVo</b>	Wärmeschutzverordnung

### Einheiten:

<b>a</b>	Jahr	<b>MWh</b>	Megawattstunden
<b>d</b>	Tag	<b>Pa</b>	Pascal
<b>g</b>	Gramm	<b>s</b>	Sekunde
<b>GW</b>	Gigawatt	<b>t</b>	Tonne
<b>GWh</b>	Gigawattstunden	<b>W</b>	Watt
<b>h</b>	Stunde	<b>Wh</b>	Wattstunden
<b>K</b>	Kelvin		
<b>kg</b>	Kilogramm		
<b>Kh</b>	Kelvinstunde		
<b>kW</b>	Kilowatt		
<b>kWh</b>	Kilowattstunden		
<b>l</b>	Liter		
<b>m</b>	Meter		
<b>m<sup>2</sup></b>	Quadratmeter (A)		
<b>m<sup>3</sup></b>	Kubikmeter (V)		
<b>MW</b>	Megawatt		

**Symbole und Größen:**

<i>A/V<sub>e</sub></i>	Gebäudekompaktheit [1/m]	<i>p</i>	Leistungsfähigkeit (eines Menschen)
<i>B<sub>ersatz</sub></i>	Ersatzbeschaffung [-]	<i>q</i>	Zinsfaktor [-]
<i>C</i>	Konzentration [-]	<i>Q</i>	Wärmemenge [kWh]
<i>c<sub>lo</sub></i>	Bekleidungsisolationswert [W/(m²•K)]	<i>Q̇</i>	Wärmestrom [W]
<i>COP</i>	Coefficient of Performance [-]	<i>r</i>	Preisänderungsfaktor [-]
<i>E<sub>a</sub></i>	jährliche Energiekosteneinsparung	<i>R</i>	Wärmedurchlasswiderstand [(m²•K)/W]
<i>Ē<sub>m</sub></i>	Wartungswert [lx]	<i>t</i>	Zeit [h]
<i>f<sub>c</sub></i>	Verschattungsfaktor [-]	<i>T</i>	Betrachtungszeitraum [a]
<i>f<sub>p</sub></i>	Primärenergieumwandlungsfaktor [-]	<i>T<sub>N</sub></i>	Nutzungszeit [a]
<i>g</i>	Gesamtenergiedurchlassgrad [-]	<i>U</i>	Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m²•K)]
<i>H'τ</i>	mittl. Transmissionswärmeverlust [W/(m²•K)]	<i>Ṡ<sub>A</sub></i>	Außenluftvolumenstrom [m³/(Person•h)]
<i>IK</i>	Investitionskosten	<i>v<sub>ar</sub></i>	Luftgeschwindigkeit [m/s]
<i>JAZ</i>	Jahresarbeitszahl [-]	<i>Ṡ<sub>t</sub></i>	Luftvolumenstrom [m³/h]
<i>k</i>	Anpassungsfaktor	<i>α</i>	Annuitätenfaktor [-]
<i>K</i>	Kosten	<i>ε</i>	Höhenkorrekturfaktor [-]
<i>met</i>	Aktivitätsgrad [-]	<i>η</i>	Ausnutzungsgrad [-]
<i>n</i>	Luftwechselrate [1/h]	<i>λ</i>	Wärmeleitfähigkeit [W/(m•K)]
<i>n<sub>50</sub></i>	Luftwechselrate bei 50 Pa Druckdifferenz [1/h]	<i>ρ</i>	Rohdichte [kg/m³]
<i>p</i>	(physikalische) Leistung	<i>θ</i>	Temperatur [°C]
<i>ppm</i>	parts per million [-]	<i>φ</i>	Leistung, Energie-/Wärmestrom [W]

**Indizes:**

<b>a</b>	Jahr	<b>N,B</b>	Annuität der betriebsgebundenen Kosten [€/a]
<b>ar</b>	Luft	<b>N,E</b>	Annuität der Erlöse [€/a]
<b>aux</b>	Hilfsenergien	<b>N,G</b>	Gesamtannuität [€/a]
<b>b</b>	nutzenergetisch	<b>N,K</b>	Annuität der kapitalgebundenen Kosten [€/a]
<b>bw</b>	Bezugswert zur Temperatur [°C]	<b>N,S</b>	Annuität der sonstigen Kosten [€/a]
<b>c</b>	Verschattung	<b>N,V</b>	Annuität der bedarfsgebundenen Kosten [€/a]
<b>e</b>	außen/extern	<b>op</b>	operativ
<b>ef</b>	Abluftventilator	<b>p</b>	primärenergetisch
<b>f</b>	endenergetisch	<b>r</b>	Strahlung
<b>f</b>	Fensterrahmen	<b>R</b>	Raum
<b>g</b>	Verglasung	<b>rm, ed</b>	gleitender Mittelwert
<b>h</b>	Heizen	<b>S</b>	solar
<b>HL</b>	Heizlast	<b>se</b>	innerer Übergang
<b>i</b>	innen/intern	<b>sf</b>	Zuluftventilator
<b>inf</b>	Infiltration	<b>si</b>	äußerer Übergang
<b>j</b>	(räumlicher) Bereich	<b>Soll</b>	Soll-Wert
<b>L</b>	Beleuchtung	<b>T</b>	Transmission
<b>min</b>	mindest/minimal	<b>V</b>	Lüftung
<b>N</b>	Nutzungszeit	<b>w</b>	Fenster

**INHALTSVERZEICHNIS**

<b>KURZFASSUNG</b> .....	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>III</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Energieverbrauch und Klimaschutzziele .....	1
1.2 Schulbaubestand .....	4
1.3 Problemstellung und Zielsetzung .....	6
1.4 Vorgehensweise .....	7
1.5 Technische Umsetzung .....	8
<b>2 Stand des Wissens und der Forschung</b> .....	<b>9</b>
2.1 Die Entwicklung der Schularchitektur in Deutschland .....	9
2.2 Aktuelle Situation des Schulbaubestands in Deutschland .....	13
2.3 Neubau- und Sanierungsbedarf innerhalb des deutschen Schulbaus .....	15
2.4 Gesetzliche Anforderungen zur Energieeinsparung in Gebäuden .....	17
2.5 Energieverbrauch von bestehenden Bildungsstätten in Deutschland .....	19
2.6 Energetische Gebäudestandards .....	19
2.6.1 EnEV-Standard: .....	20
2.6.2 KfW-Effizienzhaus-Standard .....	20
2.6.3 3-Liter-Haus-Standard .....	20
2.6.4 Passivhausstandard .....	20
2.6.5 Nullenergiestandard .....	21
2.6.6 Plus-Energie-Standard .....	21
2.6.7 Gegenüberstellung der Energiestandards .....	22
2.7 Energetische Bewertung von Gebäuden .....	23
2.8 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....	26
2.8.1 Statische Berechnungen .....	26
2.8.2 Dynamische Berechnungen .....	28
2.9 Wirtschaftliche Gegenüberstellung von Gebäudestandards .....	32
2.10 Innenraumkomfort (IEQ) .....	33
2.10.1 Thermischer Komfort .....	33
2.10.2 Hygrischer Komfort .....	38
2.10.3 Hygienischer Komfort .....	39

<b>3</b>	<b>Methoden zur Analyse des Gebäudebestands und der Sanierungsmaßnahmen .....</b>	<b>42</b>
3.1	Flächen- und Volumenermittlung .....	43
3.1.1	Grundflächen und Raumvolumen.....	43
3.1.2	Qualität der Sichtverbindungen (visueller Komfort).....	43
3.1.3	Zonierung der Gebäude .....	44
3.2	Energetische Bewertung von Gebäudehüllen .....	44
3.3	Energetische Bewertung der technischen Gebäudeausrüstung .....	47
3.3.1	Heizungsanlagen.....	47
3.3.2	Warmwasserbereitung.....	47
3.3.3	Raumluftechnische Anlagen.....	47
3.3.4	Berechnung der Norm-Heizlast .....	49
3.3.5	Beleuchtungsanlagen .....	50
3.4	Dokumentation des Energieverbrauchs.....	51
3.5	Abgleich des Energieverbrauchs mit dem Energiebedarf.....	52
3.6	Feststellung der Bauwerks- und Baunebenkosten .....	52
3.7	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....	53
3.7.1	Veränderung der Jahresgesamtkosten .....	54
3.7.2	Amortisationszeiten .....	54
3.7.3	Äquivalenter Energiepreis .....	54
3.7.4	Ökologische Wirtschaftlichkeit.....	55
3.8	Untersuchung zur Nutzerakzeptanz.....	55
3.9	Bewertung des Innenraumkomforts .....	56
3.9.1	Thermischer Komfort .....	57
3.9.2	Hygrischer Komfort.....	58
3.9.3	Hygienischer Komfort .....	59
<b>4</b>	<b>Ergebnisse aus der Analyse des Gebäudebestands.....</b>	<b>60</b>
4.1	Flächen- und Volumenermittlung .....	60
4.1.1	Grundflächen und Raumvolumen nach DIN 277.....	60
4.1.2	Qualität der Sichtverbindungen (visueller Komfort).....	61
4.1.3	Zonierung der Gebäude .....	62
4.2	Bestandsaufnahme der Gebäudehüllen .....	63
4.2.1	Flächenverhältnisse der Bauteile .....	63
4.2.2	Dächer .....	65

4.2.3	Fußböden gegen Erdreich und Kellerdecken.....	66
4.2.4	Außenwände.....	68
4.2.5	Fenster.....	69
4.2.6	Zusammenstellung der Bauteile .....	70
4.3	Bestandsaufnahme der technischen Gebäudeausrüstung.....	71
4.3.1	Heizungsanlagen.....	71
4.3.2	Warmwasserbereitung.....	73
4.3.3	Raumlufttechnische Anlagen.....	74
4.3.4	Berechnung der Norm-Heizlast .....	75
4.3.5	Beleuchtungsanlagen .....	77
4.4	Energieverbrauch.....	78
4.4.1	Wärmeverbrauch .....	78
4.4.2	Stromverbrauch .....	80
4.4.3	Primärenergieverbrauch / CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	82
4.5	Nutzerakzeptanz der unsanierten Gebäude .....	82
4.5.1	Bewertung des Innenraumkomforts anhand des Nutzervotums .....	82
4.5.2	Bewertung der Regulierbarkeit von Komfortparametern.....	84
4.6	Zusammenfassung zur Bestandsaufnahme der unsanierten Gebäude .....	85
<b>5</b>	<b>Ergebnisse aus der Analyse der Sanierungsmaßnahmen.....</b>	<b>88</b>
5.1	Beschreibung der energetischen Sanierungsmaßnahmen.....	88
5.1.1	Gebäudehülle .....	88
5.1.2	Anlagentechnik .....	95
5.2	Energetische Einsparung.....	101
5.2.1	Bewertung der verwendeten Berechnungsmethoden zur Energieeinsparung.....	101
5.2.2	Energetische Bewertung der Einzelmaßnahmen (Gebäudehülle).....	103
5.2.3	Energetische Bewertung der Einzelmaßnahmen (Anlagentechnik).....	105
5.2.4	Bewertung der energetischen Gesamtsanierungsmaßnahmen.....	107
5.3	Feststellung der Bauwerks- und Baunebenkosten .....	109
5.3.1	Kostenaufstellung nach DIN 276 .....	109
5.3.2	Betrachtung der energetisch relevanten Kosten .....	110
5.4	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....	111
5.4.1	Ökonomische Wirtschaftlichkeit.....	114
5.4.2	Ökologische Wirtschaftlichkeit.....	122

5.5	Innenraumkomfort .....	123
5.5.1	Thermischer Komfort .....	123
5.5.2	Hygrischer Komfort .....	127
5.5.3	Hygienischer Komfort .....	128
5.6	Nutzerakzeptanz der sanierten Gebäude .....	130
5.6.1	Verbesserung des Innenraumkomforts .....	130
5.6.2	Verbesserung der Regulierbarkeit von Komfortparametern .....	132
5.7	Erkenntnisse aus den evaluierten Schulsanierungen .....	133
<b>6</b>	<b>Entwicklung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahmen .....</b>	<b>136</b>
6.1	Technische Gebäudeausrüstung .....	136
6.1.1	Raumluftechnische Anlagen .....	136
6.1.2	Beleuchtungsanlagen .....	139
6.1.3	Photovoltaikanlagen .....	141
6.1.4	Wärmeerzeugungsanlagen .....	144
6.2	Gebäudehülle .....	148
6.2.1	Methode .....	148
6.2.2	Ergebnisse .....	149
6.3	Erkenntnisse aus der Entwicklung kostenoptimierter Sanierungsmaßnahmen .....	163
6.3.1	Entwicklung übertragbarer Sanierungsmaßnahmen an technischen Anlagen .....	163
6.3.2	Entwicklung kostenoptimaler Sanierungsmaßnahmen an Gebäudehüllen .....	167
<b>7</b>	<b>Anwendung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahmen .....</b>	<b>170</b>
7.1	Gebäudehülle .....	171
7.2	Anlagentechnik .....	171
7.3	Gegenüberstellung der Bauwerkskosten .....	172
7.4	Energieeffizienz .....	173
7.4.1	Reduzierung des Endenergiebedarfs (Wärme) .....	173
7.4.2	Reduzierung des Endenergiebedarfs (Strom) .....	174
7.4.3	Reduzierung des Primärenergiebedarfs .....	175
7.4.4	Reduzierung der CO <sub>2</sub> -Emission .....	176
7.5	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....	176
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>181</b>
8.1	Erkenntnisse aus den evaluierten Sanierungen .....	181
8.2	Ableitung kostenoptimaler Maßnahmen und Aufstellung des ganzheitlichen Konzepts .....	183
8.3	Beispielhafte Anwendung des Sanierungskonzepts .....	188

8.4	Ausblick .....	190
<b>9</b>	<b>Veröffentlichungen und Vorträge .....</b>	<b>192</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>193</b>
<b>11</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>199</b>
<b>12</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>205</b>
<b>13</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>207</b>
13.1	Anhang: Kapitel 4 und Kapitel 5.....	207
13.1.1	Gebäude 01 .....	208
13.1.2	Gebäude 03.....	209
13.1.3	Gebäude 04.....	210
13.1.4	Gebäude 05.....	211
13.1.5	Gebäude 06.....	212
13.1.6	Gebäude 07 .....	213
13.1.7	Gebäude 08.....	214
13.1.8	Gebäude 10.....	215
13.1.9	Gebäude 11 .....	216
13.1.10	Gebäude 12.....	217
13.1.11	Gebäude 13.....	218
13.1.12	Gebäude 41 .....	219
13.1.13	Gebäude 57 .....	220
13.1.14	Gebäude 69.....	221
13.1.15	Gebäude 78.....	222
13.1.16	Gebäude 81 .....	223
13.1.17	Gebäude 82.....	224
13.2	Anhang: Fragebogen .....	225



# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Energieverbrauch und Klimaschutzziele

Der Ressourcenverbrauch für den Verkehr, die Industrie und das Gewerbe steigt seit dem Beginn der Industrialisierung im 18. Jahrhundert zunehmend an. Bis zur Erfindung der Dampfmaschine findet primär die Verbrennung von Holz zur Erzeugung von Licht und Wärme Anwendung. Mit der Einführung industrieller Produktionsweisen steigt der Bedarf für Kohle an. Der Bau von Transportmitteln ermöglicht die Verbreitung regional vorkommender Ressourcen, wie Kohle und später auch Öl, außerhalb der Abbaugelände. Die Produktion von Stadtgas durch den Prozess der Kohlevergasung dient vor allem in urbanen Bereichen der Beleuchtung von Gebäuden und Straßen (vgl. [4] S. 24 ff.). Zum Ende des 19. Jahrhunderts weist Kohle den größten Anteil aller verwendeten Energieträger auf. Mit der aufkommenden Gewinnung von Erdöl, das zunehmend zum Heizen und für den Transport von Gütern und Personen genutzt wird, übersteigt dessen Verbrauch Mitte des 20. Jahrhunderts den Kohleverbrauch (vgl. [16]). Bis heute bilden Gas, Öl und Kohle den größten Anteil aller verwendeten Energieträger weltweit. China fördert beispielsweise 56 % der weltweit abgebauten Steinkohle (vgl. [17] Tab. 35). Ein Großteil dient zur Stromerzeugung. Die Kernkraft erweitert seit den 1960er Jahren die bestehenden Prozesse der Elektrizitätserzeugung. Die erneuerbaren Energien weisen gegenüber endlichen Energieträgern die quantitativ geringste Nutzung weltweit auf. Abbildung 1 stellt die globale Entwicklung des Ressourcenverbrauchs dar (Stand: 2014) (vgl. [16]).

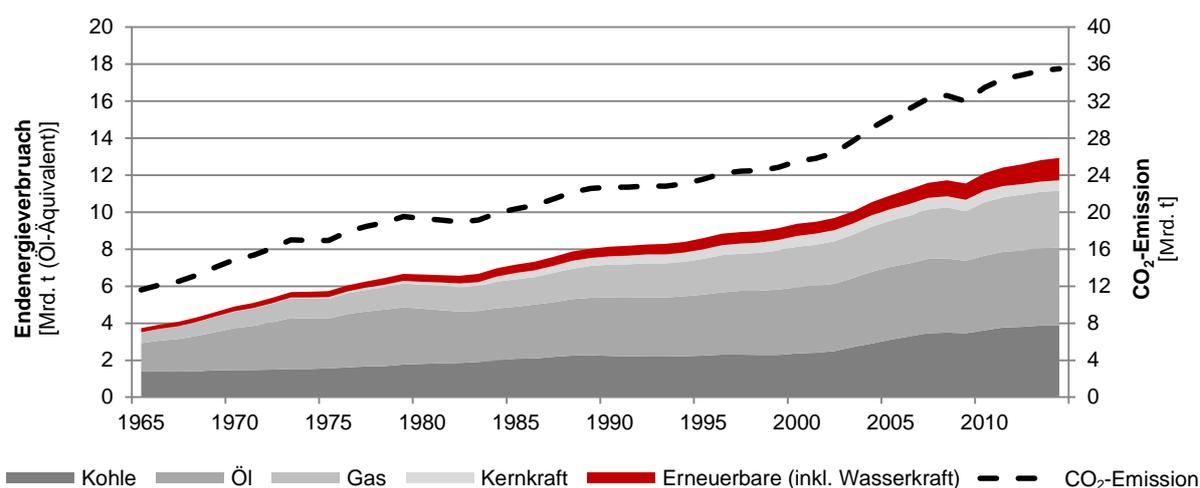
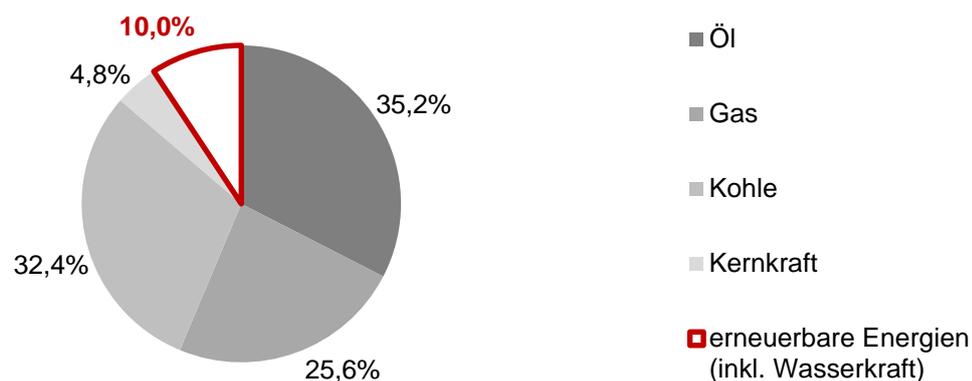


Abbildung 1 Weltweiter Endenergieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emission [16]

Durch den stetig zunehmenden Energieverbrauch steigt seit Beginn des 19. Jahrhunderts die Konzentration an Kohlendioxid in der Außenluft gegenüber 1800 um 36 % an und verzeichnet

eine jährliche Erhöhung der Konzentration um 2,5 ppm. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration ( $C_{CO_2}$ ) in der Außenluft weist einen weiterhin steigenden Wert von rund 380 ppm auf und ist zwischen ländlichen und urbanen Räumen zu unterscheiden. Während in städtischen Räumen der Wert über dem globalen Durchschnitt liegt, sind in ländlichen Gebieten geringere Konzentrationen zu verzeichnen. Der Anstieg der jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen hat die Konzentration in der Luft weltweit in den letzten 50 Jahren verdreifacht. Die Auswirkung des weltweiten Verbrauchs von fossilen Energieträgern hat folglich auf die Zunahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Außenluft direkte Auswirkungen und trägt zur Veränderung des Klimas bei (vgl. [4] S. 38 ff.).

Während der Ausstoß von Kohlenstoffdioxid weltweit insgesamt zunimmt, konnte dieser z.B. in Europa in den letzten Jahren reduziert werden. Rund 75 % des weltweiten Primärenergieverbrauchs resultiert aus dem Verbrauch von Erdgas, Mineral- und Erdöl sowie festen Brennstoffen. Der Anteil erneuerbarer Energieträger beläuft sich auf 10 % (vgl. [16]). Abbildung 2 zeigt die weltweite Verteilung des Primärenergieverbrauchs aufgeschlüsselt nach Energieträgern (Stand: 2014).



**Abbildung 2** Prozentuale Verteilung des weltweiten Primärenergieverbrauchs (Stand: 2014) [16]

Der Anteil der Strom- und Wärmebereitstellung mit fossilen Energieträgern beträgt in Deutschland gemessen am Primärenergieverbrauch rund 80 % (Stand: 2014). Der Anteil der Kernkraft beläuft sich auf 8,1 %. Die Einbindung erneuerbarer Energien weist anteilig 11 % inklusive der Nutzung von Wasserkraft auf und liegt über dem globalen Durchschnitt (vgl. [18] Tab. 4). Die festen Stoffe, wie z.B. Biomasse, sowie Biogas bilden unter den erneuerbaren Energieträgern den größten Anteil. Der in Deutschland aus erneuerbaren Energien erzeugte Strom beträgt anteilig am Brutto-Stromverbrauch 28 %. Der regenerative Anteil zur Wärmeproduktion beträgt 11 %. Die höchsten installierten Leistungen zur regenerativen Stromerzeugung stellen die Windkraft (41 GW) und Photovoltaik (38 GW<sub>p</sub>) in Deutschland dar (2014) (vgl. [19] Tab. 20). Abbildung 3 zeigt die installierten Leistungen technischer Anlagen sowie die produzierten Wärme- und Strommengen (primärenergetisch).

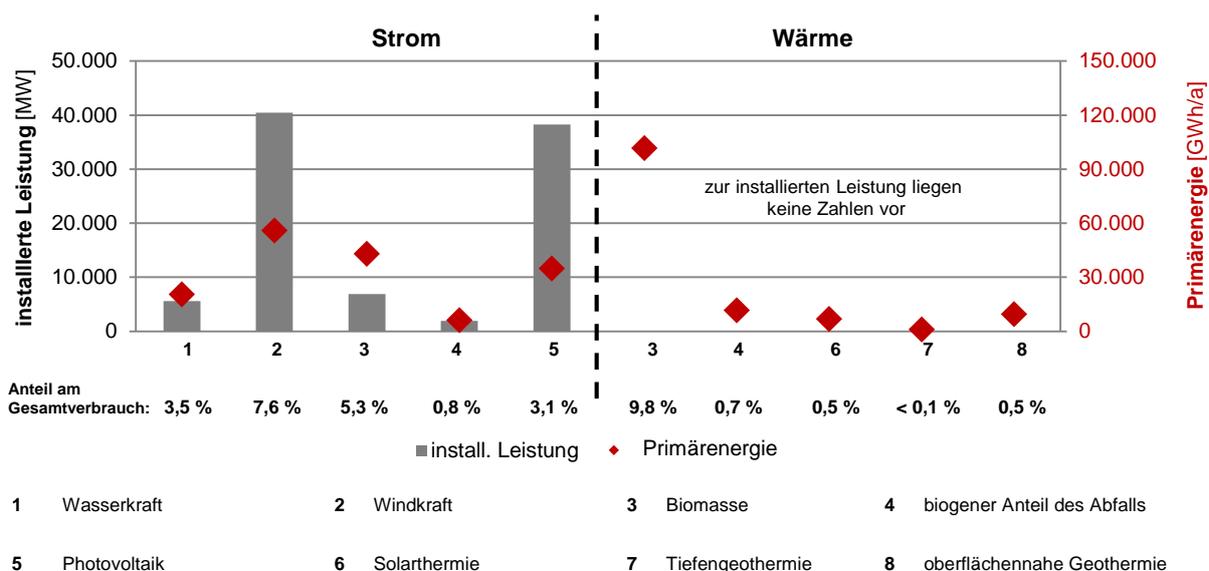


Abbildung 3 Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland (Stand: 2014) [19]

Rund 40 % des Gesamtenergieverbrauchs der Europäischen Union resultieren aus dem Gebäudebestand, weitere 10 % aus deren Herstellung, Abriss, Recycling und dem Transport von Baumaterialien (vgl. [15] Abs. 3, S. 1; [4] S. 38 ff.).

Auf Grundlage des Beschlusses des deutschen Bundestages im Jahr 2010 [1] sowie durch das integrierte Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung [2] werden Klimaschutz- und Energieeinsparziele in Deutschland auf nationaler Ebene definiert. Ziele sind u.a. die Schaffung eines „wirksamen Klima- und Umweltschutzes“ sowie einer „wirtschaftlich tragfähigen Energieversorgung“ bei gleichzeitiger Sicherstellung von „wettbewerbsfähigen Energiepreisen“ [1].

Diese Ziele verfolgen eine Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes in Deutschland gegenüber 1990 bis 2020 um 40 % und bis 2050 um mindestens 80 %. Der Stromverbrauch soll bis 2050 um 25 % reduziert und der gesamte Verbrauch an Primärenergien halbiert werden. 60 % des gesamten Energieverbrauchs sollen bis 2050 aus der Verwendung erneuerbarer Energieträger resultieren [3]. Abbildung 4 zeigt die klimapolitischen Ziele der Bundesregierung.

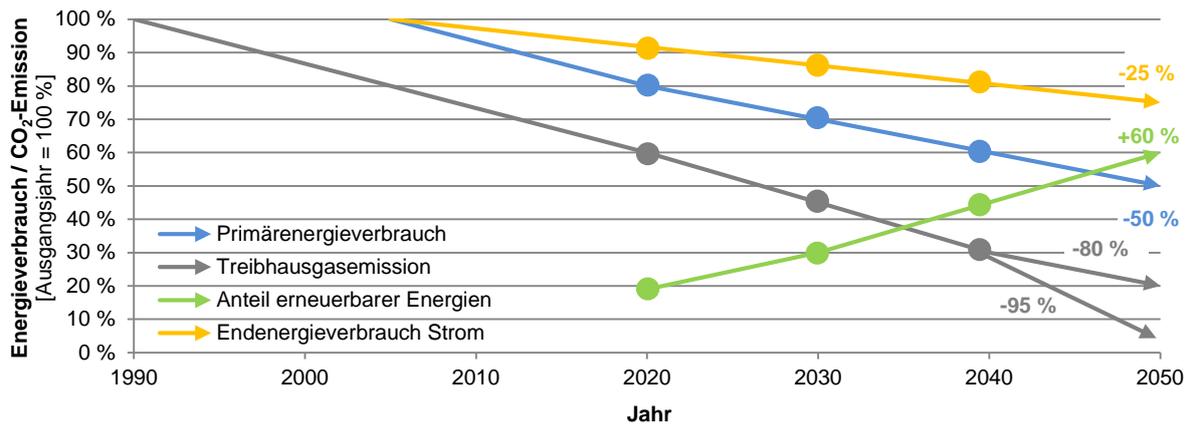


Abbildung 4 Ziele der deutschen Energie- und Klimapolitik nach [1], [2] und [3]

## 1.2 Schulbaubestand

Die Anzahl der allgemeinbildenden und berufsbildenden Schulen beläuft sich in Deutschland auf rund 53.500 Gebäude (vgl. [9] S. 31 f.). Die Schulgebäude weisen einen Anteil von rund 18 % aller öffentlichen Gebäude auf (Abbildung 5). Die Bruttogrundfläche (BGF) aller allgemeinbildenden und berufsbildenden Schulen beträgt 107 Mio. m<sup>2</sup><sub>BGF</sub> und entspricht rund einem Drittel der BGF aller Gebäude in „sozialer und kommunaler Infrastruktur“ (vgl. [9] S. 33 f.). Die durchschnittliche BGF der Schulen in Deutschland beträgt 2.000 m<sup>2</sup><sub>BGF</sub> (Abbildung 6).

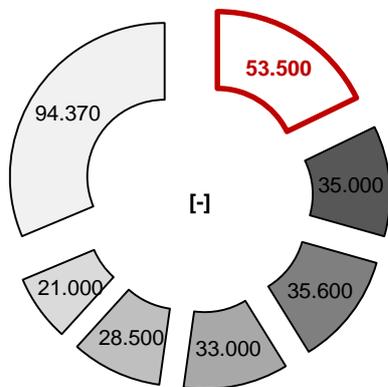


Abbildung 5 Anzahl der Gebäude in „sozialer und kommunaler Infrastruktur“ [9]

- allgemeinbildende und berufsbildende Schulen
- Kindertagesstätten
- Gebäude für Bereitschafts- und Rettungsdienste
- Sporthallen
- Umkleidegebäude, ungedeckte Sportanlagen
- kirchliche Gemeindehäuser
- restliche Gebäude

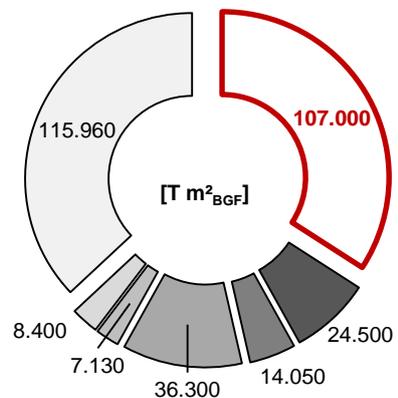


Abbildung 6 Bruttogrundfläche (BGF) aller Gebäude in „sozialer und kommunaler Infrastruktur“ [9]

Der Gebäudebestand in „kommunaler und sozialer Infrastruktur“ wurde in Deutschland zum größten Teil zwischen 1949 und 1978 erbaut und beläuft sich auf 50 % aller öffentlichen Gebäude. Die hohe Bautätigkeit in dieser Zeit liegt in der Zerstörung vieler Gebäude im Zweiten

Weltkrieg und deren Wiederaufbau begründet. Der Anteil der Gebäude, die vor dem Zweiten Weltkrieg errichtet wurden, beläuft sich im Bezug zum heutigen Gebäudebestand auf rund 23 % (vgl. [9] S. 31 f., [20] S. 169 f.).

Innerhalb der intensiven Bauphase nach dem Zweiten Weltkrieg bis in die 1970er Jahre sind keine Anforderungen und gesetzliche Vorschriften an das energiesparende Bauen sowie das Bewusstsein zur Ressourcenschonung vorhanden. Die zu der Zeit günstigen Energiepreise schwächen das Bewusstsein zusätzlich. Die DIN 4108-2 tritt initial im Jahr 1952 [21] in Kraft und stellt erstmals Anforderungen an den „Wärmeschutz von Aufenthaltsräumen“.

Die Neubautätigkeit von öffentlichen Gebäuden erfährt zwischen den Jahren 1950 und 1970 ihren Höhepunkt (vgl. [9] S. 31 f.). Diese Entwicklung ist mit der Errichtung von allgemeinbildenden und berufsbildenden Schulen zu vergleichen (vgl. [20] S. 169 f.). Während eine hohe Anzahl an Gebäuden aus den 1950er bis 1970er Jahren stammt, gewinnt die Sanierung dieser Gebäude in den folgenden Jahren weiter an Bedeutung. Die Neubautätigkeit erfährt seit den 1980er Jahren einen stetigen Rückgang. 5 % des heutigen Gebäudebestands weisen ein Alter von weniger als 15 Jahren auf.

Die Gebäude aus der intensiven Bauphase stammen größtenteils aus der Zeit vor Inkrafttreten der ersten Wärmeschutzverordnung (WSVo) von 1977 [22]. Sie unterliegen zum Zeitpunkt ihrer Errichtung geringsten Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz aus heutiger Sicht. Die Hälfte des Energieverbrauchs aller kommunalen Gebäude resultiert aus dem Betrieb von Bildungsstätten (vgl. [20] S. 195). Die Sanierung dieser Gebäude weist folglich ein hohes Potenzial auf, einen Beitrag zur Umsetzung der gesetzten Klimaschutzziele [1], [2], [3] zu leisten.

Durch die finanzielle Situation der Kommunen ist ein Investitionsrückgang im Bereich der energetischen Sanierung kommunaler Gebäude zu verzeichnen. Aufgrund der Nicht-Investition in den baulichen Gebäudebestand ist ein Sanierungsstau entstanden. Der Investitionsbedarf im kommunalen Schulbau beläuft sich bundesweit von 2005 bis 2020 auf 73 Mrd. Euro (vgl. [20] S. 210 f.).

Im Jahr 2009 tritt das „Gesetz zur Umsetzung von Zukunftsinvestitionen der Kommunen und Länder (Zukunftsinvestitionsgesetz – ZuInvG)“ mit dem Ziel in Kraft, die Störung eines gesamtwirtschaftlichen Gleichgewichts abzuwehren und den Kommunen Investitionen in Förderbereichen unterschiedlicher Infrastrukturen zu gewähren (vgl. [10] §§ 1 und 3). Ein Förderschwerpunkt ist die energetische Gebäudesanierung innerhalb der Bildungsinfrastruktur. Neben einem „wirtschaftlichen Aufschwung“ sowie der Verbesserung des Lernumfelds, zielt das Gesetz auf die Reduzierung des Energieverbrauchs sowie des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes ab. Ab dem Jahr 2009 werden rund 3.300 Schulen in Deutschland energetisch saniert (vgl. [9] Anl. 2, S. 33 f.).

### **1.3 Problemstellung und Zielsetzung**

Die energetische Sanierung von Schulen weist ein hohes Beitragspotenzial zur Umsetzung der klimapolitischen Ziele der Bundesregierung auf [1], [2], [3]. Provokativ wird behauptet, dass die bisher getätigten Mittel, wie z.B. aus dem Konjunkturpaket II (Zukunftsinvestitionsgesetz) [10], nicht die erhofften positiven Effekte für den Klimaschutz und kommunale Haushaltskassen erzielt haben. Dabei wird unterstellt, dass integrale Gedanken zu Lerneffizienz, Raumkomfort und Behaglichkeit sowie die Integration regenerativer Energien in die Versorgungskonzepte der Gebäude vernachlässigt wurden.

Die vorliegende Arbeit untersucht die Sanierung von 17 Bildungsstätten aus den Jahren 2008 bis 2010. Die Bewertung der Sanierungen erfolgt durch das Aufzeigen der erreichten Energieeffizienz unter Berücksichtigung des Einsatzes regenerativer Energien, der ökonomischen Bewertung von Einzel- und Gesamtmaßnahmen sowie der erzielten Qualität des Innenraumkomforts.

Die Erkenntnisse der Untersuchungen sollen die Entwicklung von kostenoptimierten Sanierungsmaßnahmen sowie die Zusammenführung dieser Maßnahmen zu einem ganzheitlichen Sanierungskonzept ermöglichen. Die normative und gesetzliche Umsetzbarkeit des entwickelten Konzepts sowie die Übertragbarkeit für zukünftige Gebäudesanierungen sind nachzuweisen.

Das zu entwickelnde Konzept soll Potenziale zur Reduzierung des Energieverbrauchs sowie der CO<sub>2</sub>-Emission aufdecken, ohne dabei das Thema des Innenraumkomforts zu vernachlässigen. Die Anwendung soll eine gezielte Investition in den sanierungsbedürftigen Gebäudebestand aufzeigen und die Einbindung erneuerbarer Energien in die Versorgungskonzepte stärken.

Zukünftig soll die Anwendung des entwickelten Konzepts einen größeren Beitrag zur Umsetzung der Klimaschutzziele bis 2050 [1], [2], [3] leisten und kommunale Haushaltskassen entlasten. Die Umsetzung soll zur Verbesserung des Innenraumkomforts und folglich zur Steigerung der Leistungsfähigkeit von Schülern führen.

## 1.4 Vorgehensweise

1. Die Gebäudetypologien der Bildungsstätten werden gegenübergestellt, und eine Zustandsbeschreibung des unsanierten Gebäudebestands wird durchgeführt. Der Bestand wird im Hinblick auf die Qualität des baulichen Wärmeschutzes sowie der Effizienz und Auslegung anlagentechnischer Systeme untersucht. Der Energieverbrauch und die Schadstoffemission durch den Gebäudebetrieb werden dokumentiert. Als Rückkopplung aus den ermittelten Volumen und Flächen sowie der Anzahl an Gebäudenutzer werden spezifische Benchmarks zum unsanierten Gebäudebestand gebildet. Die Akzeptanz der unsanierten Gebäude seitens der Nutzer wird mittels Umfragen aufgezeigt.
2. Die energetischen Gesamtsanierungsmaßnahmen sowie die Einzelmaßnahmen an der Gebäudehülle und den technischen Anlagen werden dokumentiert und beschrieben. Die Zustände der unsanierten sowie sanierten Bildungsstätten werden nach DIN V 18599 [23] energetisch abgebildet und bewertet. Die Berechnungen der jeweiligen Bedarfsreduzierungen werden den tatsächlichen, durch die Sanierungsmaßnahmen verringerten Energieverbräuchen gegenübergestellt. Eine Aussage zur Prognosesicherheit der verwendeten „Werkzeuge“ wird hierdurch ermöglicht. Durch die energetische und ökonomische Bewertung einzelner Sanierungsmaßnahmen sowie der Gesamtmaßnahmen anhand unterschiedlicher Methoden werden Aussagen zur Effektivität der Sanierungsmaßnahmen getroffen. Potenziale zur Verbesserung der Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit werden aufgezeigt und bewertet.
3. Die Messung und Dokumentation der Innenraumlufttemperatur ( $\theta_{i,ar}$ ), der relativen Innenraumluftfeuchtigkeit ( $\varphi_{i,ar}$ ) sowie der CO<sub>2</sub>-Konzentration ( $C_{CO_2}$ ) in der Raumluft von Referenzräumen ermöglicht die Bewertung des thermischen, hygrischen sowie hygienischen Komforts. Die Ergebnisse aus der messtechnischen Untersuchung werden mit den Nutzervoten gegenübergestellt. Eine Aussage zur Leistungsfähigkeit der Schüler erfolgt auf Basis des erfassten Innenraumkomforts und ermöglicht einen Rückschluss auf den Betrieb anlagentechnischer Systeme sowie der energetischen Qualität von Gebäudehüllen.
4. Kostentoptimierte Sanierungsmaßnahmen werden für Bauteile der thermischen Gebäudehülle sowie technische Anlagen abgeleitet. Die Datenbasis aus der Gebäudeevaluation dient dabei als Grundlage der Untersuchung. Das Erreichen des Kostenoptimums versteht sich als Gleichgewicht aus Energieeinsparung sowie der Investition, das anhand unterschiedlicher ökonomischer Verfahren und Preisänderungsfaktoren bestimmt wird. Die gezielte Investition in den Gebäudebestand wird anhand der Erkenntnisse aus den Untersuchungen aufgezeigt. Die Verbesserung des Innenraumkomforts sowie die Steigerung der Leistungsfähigkeit von Schülern werden in der Untersuchung berücksichtigt.

5. Zum Nachweis der Thesen werden die kostenoptimierten Sanierungsmaßnahmen zu einem ganzheitlichen Sanierungskonzept entwickelt und mit den evaluierten Gesamtsanierungsmaßnahmen verglichen. Unter Anwendung des entwickelten Konzepts sollen ein besseres Kosten-Nutzen-Verhältnis erreicht sowie Potenziale zur gezielten Investition in den Gebäudebestand aufgezeigt werden. Der Nachweis wird vor dem Hintergrund der gesetzten Klimaschutzziele sowie der Verbesserung des Innenraumkomforts und der Leistungsfähigkeit der Schüler geführt. Mit Verifizierung des Nachweises ist das Sanierungskonzept bei der Umsetzung zukünftiger Sanierungsmaßnahmen anwendbar und auf den Schulbaubestand in Deutschland übertragbar.

### **1.5 Technische Umsetzung**

Die EDV-Software „SolarComputer“ (Version 5.11) der SOLAR-COMPUTER GmbH dient zur energetischen Bewertung der Gebäude nach DIN V 18599 [23]. Die Dokumentation und Ausarbeitung der Rohdaten sowie die visuelle Darstellung basiert auf der Nutzung des Kalkulationsprogramms EXCEL (Version 2013) der Microsoft Corporation. Zur Bewertung des Innenraumkomforts findet das Simulationsprogramm „TRNSYSlite“ (Version 5.1.69) der Transsolar Energietechnik GmbH Anwendung und wird durch Messtechnik der Onset Computer Corporation (Hobo Data Logger) unterstützt.

## 2 STAND DES WISSENS UND DER FORSCHUNG

### 2.1 Die Entwicklung der Schularchitektur in Deutschland

Michael Luley beschreibt in seinem Werk „Eine kleine Geschichte des deutschen Schulbaus - Vom späten 18. Jahrhundert bis zur Gegenwart“ ein großes „Schulelend“ im „niederen Bildungswesen“ bis „weit ins 19. Jahrhundert hinein“ (vgl. [24] S. 17; [25] S. 44). Neben einer schlechten pädagogischen Betreuung mangelte es besonders an adäquaten Klassenräumen und Schulhäusern. Zum Teil wurde der Unterricht in angemieteten Räumen oder in Privatwohnungen durchgeführt. Die Begriffe der „Reihenschule“ oder „Gemeinde-Armenhaus“ (vgl. [25] S. 44) stammen aus dieser Zeit, welche neben schlechten hygienischen Bedingungen auch durch hohe Belegungsdichten gekennzeichnet sind (vgl. [26] S. 165 f., S. 335).

Johann Amos Comenius sowie Christian Gotthilf Salzmann weisen bereits im 17. bzw. im 19. Jahrhundert auf Maßnahmen zur Verbesserung der Innenraumqualität in Schulen hin. Sie forderten erstmalig die Versorgung der Klassenräume mit Tageslicht sowie eine Verbesserung der hygienischen Bedingungen in den Innenräumen der Schulen (vgl. [27] S. 89; [28] S. 94 f.). Der Ausbau des öffentlichen Bildungswesens erweist sich ab der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts als „spezielle Bauaufgabe“ (vgl. [24] S. 21; [25] S. 13). Ab der zweiten Hälfte des Jahrhunderts entspricht der Schulbau durch „Prinzipien der Schulbauorganisation“ u.a. „hygienischen Gesichtspunkten“ (vgl. [24] S. 21) und gerät dabei „immer mehr zu einer administrativ-institutionellen Angelegenheit“ (vgl. [25] S. 13).

Die Organisation des Schulbaus entsprach von nun an auch hygienischen Anforderungen. Das steigende Bevölkerungswachstum und „bauliche Missstände im niederen Bildungswesen“ bedingten den Ausbau von Volksschulen ab dem 19. Jahrhundert. Die „strenge Überwachung“ des Schulbaus obliegt in dieser Zeit den Baubehörden. Die Entwicklung von „Mustergrundrissen“ durch die Bauverwaltungen führen zu einem „starrten Entwurfsschematismus“ (vgl. [24] S. 22). Die Tendenz zur Errichtung größerer Schulgebäude ist zu erkennen (vgl. [29] S. 63 ff.). Die Organisation als Zweibund mit aneinander gereihten Klassenräumen und einem mittig gelegenen Flur war ein häufig verwendeter Grundriss. Aufgrund der Geschlechtertrennung sowie der separierten Zugänge und Treppen werden die Gebäude oft als „Doppelschulen“ beschrieben. Die Organisation des Zweibundes führte zu einer mangelnden Belichtung und Belüftung der Erschließungsflächen, sodass man von dieser Organisationform auch aus diesen Gründen später wieder abwich. Die Installation von Beleuchtungs-, Heizung- und Toilettenanlagen brachten einen technischen Fortschritt in die Schulgebäude (vgl. [24] S. 28).

Die Jahre zwischen 1890 und 1920 sind als Zeit der „intensiven Reformpädagogik“ bekannt; sie greift auf die Ansätze von Comenius, Rousseau und Pestalozzi zurück. Einheitliche Erziehung ohne Berücksichtigung von Stand, Geschlecht oder Konfession wurde zunehmend gefordert (vgl. [29] S. 33).

„Die Forderung nach „Kindgemäßheit“ in Verbindung mit dem Anliegen nach einer gemeinschafts- und arbeitsorientierte Erziehung führte im Zeichen der Reformpädagogik zu einem weitreichenden Wandel der Ansprüche an die Schulbauarchitektur“ (vgl. [24] S. 31 ff.; [25] S. 296 ff.). Einige Schulmodelle beschreiben die Tendenzen und Entwicklungen:

- Die „Zukunftsschule“ Berthold Ottos fordert die Vermittlung des Lehrstoffes „an Ort und Stelle“. Deshalb sind Spaziergänge vorzusehen und der Unterricht in den Freiraum zu verlagern. Lehrer sollen dabei von den älteren Schülern unterstützt werden (vgl. [30] S. 17 f.). Zudem spricht Otto von der punktgerichteten Anordnung der Schulbänke, damit die Schüler in einem Kreis sitzen und sich gegenseitig sehen können. Aufenthaltsräume für Freistunden und überdachte Sitzplätze sind im Freien anzuordnen (vgl. [24] S. 33 f.; [30] S.18).
- Das Modell der „Kreisschule“ bündelt „Gymnasien, Ober-, Mittel- und Fortbildungsschulen, das gesamte Lehrlingswesen, landwirtschaftliche Betriebe und volkshochschulähnliche Einrichtungen an einem Ort“ (vgl. [24] S. 33). Der Fachunterricht soll sich auf einzelne Zentren konzentrieren. Die Zusammenschließung der Schulformen ähnelt dem Ansatz von Gesamtschulen. Der Schulbau nimmt ab den 1960er Jahren die Idee Ottos auf.
- Die „Lebensgemeinschaftsschule“ von Peter Petersen fordert die „Aufhebung der Jahresklassen“ und Vermeidung von „Massenschulen“ mit über 500 Kindern. Eingeschossige Anlagen waren das Resultat auf den bis dahin dominierenden „Kasernenbau“. Jeder Kleingruppe ist ein eigenes Zimmer mit Kombinationsräumen für naturwissenschaftliche und handwerkliche Tätigkeiten zuzuordnen. Die Schule soll leicht bewegliche Tische und Stühle bereitstellen (vgl. [24] S. 34 f.; [31] S. 34)
- Das Modell der „Arbeitsschule“ von Georg Kerschensteiner sieht eine Erziehung der Kinder zu „Sachlichkeit, Gemeinschaftsgesinnung und Eigenständigkeit“ vor. Die architektonische Übertragung findet sich in der „Einrichtung geistiger Arbeitsstätten und Bibliotheken für Geschichte, Geographie, Naturkunde und Raumlehre“ wieder (vgl. [24] S. 36 f.; [31] S. 31 ff.). Besondere Aufmerksamkeit widmet das Modell dem Handwerk. Die Fortsetzung der Arbeitsschule findet sich, mit ihrem starken Praxisbezug der Lehrinhalte, später in der DDR in Form der polytechnischen Bildung wieder.

Der Entwurf der Volksschule Niederursel vom Architekten F. Schuster aus dem Jahr 1929 löst die strenge Symmetrie der kasernenartigen Schulbauten durch die Einflüsse der Reformpädagogik auf. Die Anordnung der Gebäude bildet einen Innenhof. Während sich auf den Längsseiten der Gebäude die Klassenräume befinden, sind in den Gebäudeteilen auf den Stirnseiten die Fach- und Verwaltungsräume untergebracht. Je zwei Klassenräume werden über Treppenhäuser erschlossen. Dieses Prinzip ist als „Schuster-Typ“ bekannt (vgl. [24] S. 38). Die Anordnung der Klassenräume ermöglicht die Belichtung und Belüftung von zwei Seiten.

Die reformpädagogischen Ansätze der „Natürlichkeit“, „Schlichtheit“ und „Bescheidenheit“ wurden nach dem Zweiten Weltkrieg weiterverfolgt (vgl. [24] S. 59). Die größte Schwierigkeit lag in der Bereitstellung von Schulräumen in dem größtenteils zerstörten Schulbaubestand. In den Nachkriegsjahren war dementsprechend ein hoher Neubaubedarf zu verzeichnen (vgl. [32] S. 38). Als Leitbild für den Schulneubau diente die Flachbauweise der mehrseitigen Belüftung und Belichtung von Lehrräumen (vgl. [29] S. 101 ff.). Die Öffnung des Klassenraums in den Freiraum spiegelt den Charakter des „offenen Hauses“ wieder (vgl. [24] S. 61 f.).

Der Entwurf der Darmstädter Volksschule von Hans Scharoun aus dem Jahr 1951 zeigt die ebenerdige Erschließung der Klassenräume und einen fließenden Übergang zum Außenraum. Der Gebäudekomplex gliedert sich in drei Teile, die den einzelnen Jahrgangsstufen vorbehalten sind (vgl. [24] S. 64 ff.). Die Unterbringung der Jahrgangsstufen unterscheidet sich in ihrer Form, Ausrichtung und Organisation: Die Klassenräume der Unterstufe soll dem „Nest- und Höhlencharakter“, die der Mittelstufe dem „Charakter des Exakten“ und die der Oberstufe dem „Charakter der spannungshaften Entfaltung“ entsprechen (vgl. [33] S. 86; [34] S. 14 ff.). Die Verkehrsfläche dient nicht nur der Erschließung, sondern fungiert auch als „Begegnungsraum“. Diese Schultypen wurden ab dem Ende der 1960er Jahre durch flächenmäßig größere Gebäude abgelöst (vgl. [24] S. 77 ff.).

Die Volksschulen in Burscheid und Duisburg-Hüttenheim (Architekten Bruno Lambert und Günter Behnisch, Düsseldorf und Stuttgart) sind weitere Beispiele für die Umsetzung fließender Übergänge zwischen Innen- und Außenraum. Die Ausführung der Klassenpavillons der Volksschule Burscheid ist eingeschossig und lässt Freiluftunterricht zu. Eine zweiseitige Tageslichtversorgung und Fensterlüftung sind möglich. Das Haupthaus ist zweigeschossig ausgeführt. Zwischen den Gebäuden liegt der Pausenhof. Laubengänge verbinden die Gebäude miteinander (vgl. [35] S. 22 ff.).

Der Entwurf vom Architekturbüro Behnisch und Partner aus dem Jahr 1960 als mehrgeschossiger Schulkomplex ist das Gegenteil zur Darmstädter Schule von Hans Scharoun. Die aus den 1950er Jahren aufgenommene und weitergeführte Umsetzung der einseitigen Anbindung der Klassenräume (Einbund) sowie die Möglichkeit der zweiseitigen Belichtung und Belüftung

der Innenräume finden sich in der Volksschule in Lorch wieder. Die Klarheit des Entwurfs resultiert aus der Erschließung der Klassentrakte über Verbindungsgänge sowie dessen Organisation. Die Umsetzung des Schultyps findet in dieser Zeit in Deutschland vielfach Anwendung (vgl. [24] S. 72 f.).

In der DDR werden vor allem in den 1960er und 1970er Jahren Typenschulen in Plattenbauweise errichtet. Die Übertragung des aus der Wohnungswirtschaft stammenden Bauverfahrens auf Schulgebäude geschieht unter ökonomischen Gesichtspunkten. Der in der DDR zwischen 1965 und 1989 in Plattenbauweise errichtete Anteil beträgt rund die Hälfte aller Schulen. Die Übertragung der Erschließungs- und Organisationsformen als Atrium-, Schuster- und Gangtypen findet hier ebenfalls statt (vgl. [32] S. 54).

„Ökonomisches Effizienzdenken“ stellte sich auch ab den 1970er Jahren über die „pädagogischen Belange“ in der Bundesrepublik (vgl. [24] S. 77 ff.; [25] S. 531). Die Bedürfnisse der Schüler, wie sie z.B. Hans Scharoun im Entwurf der Volksschule in Darmstadt berücksichtigt hat, werden in dieser Zeit weitestgehend „sekundär“ behandelt (vgl. [24] S. 78). Zwar stand die Flexibilität im Fokus des Schulbaus der 1970er Jahre (vgl. [24] S. 79; [31] S.42 f.), das Prinzip der Stammklassen blieb aber erhalten (vgl. [24] S. 79). Die Nutzfläche (NF) der Schulgebäude stieg auf über 10.000 m<sup>2</sup> an. Ein Verschmelzen von Verkehrs- und Unterrichtsfläche und die Schaffung von Transparenz zwischen den Räumen ist ein typisches Entwurfsmerkmal dieser Zeit. Feststehende Verglasungen trennen akustisch abzugrenzende Räume. Das Prinzip der „Schulstraße“ findet vor allem in diesen Gebäudetypen seine Anwendung (vgl. [24] S. 85). Die Schulstraße ist das zentrale Erschließungselement und verbindet Pausenhalle und Mensa.

Beispielhaft wird die Gesamtschule Hannover-Roderbruch (Architekten: GKK + Partner, Berlin) genannt. Der kompakte und zweigeschossige Baukörper fasst die Unterrichtsbereiche zusammen. Die gemeinsam genutzten Fachräume befinden sich im Erdgeschoss (vgl. [29] S. 115 ff.).

Die Friedenschule in Münster (Architekten: H.C.C. Hüffner, Münster) ist ein zweites Beispiel typischer Schulbauten aus dieser Zeit. Die Kommunikationsbereiche befinden sich an funktionalen Kreuzungspunkten der Schulanlage. In der Grundrissgestaltung beschränken sich die Innenwände auf Unterrichts- und Verwaltungsräume, was eine Flexibilität der Flächennutzung ermöglicht. Die Fachklassen werden in einem Verbund zusammengefasst. Die Unterbringung der Lehrer geschieht nach dem Prinzip des Fachklassensystems (vgl. [29] S. 141 ff.).

Der Schulneubau verlor ab Ende der 1970er Jahre an Beachtung und gilt seit den 1980er Jahren als abgeschlossen. Vielmehr stehen der Um- und Ausbau sowie die Nutzungsveränderung im Vordergrund. Neben der pädagogischen Ausrichtung stehen durch den Einfluss der

gesetzgebenden und normativen Regeln der ökologische Einfluss sowie die Qualität des Innenraums im Mittelpunkt.

Durch die Wiedervereinigung der Bundesrepublik ist eine Abwanderung der Bevölkerung in die alten Bundesländer zu verzeichnen. Seit Anfang der 1990er Jahre begründet sich die sinkende Schülerzahl zusätzlich durch den Geburtenrückgang der 1980er Jahre. Ein hoher Anteil an Schulgebäuden steht in den neuen Bundesländern leer. Neben der Instandhaltung und Modernisierung der Gebäude steht der Rückbau bzw. die Anpassung an den Flächenbedarf im Vordergrund (vgl. [20] S. 208 ff.).

Der Schulbau hat sich in Deutschland von einer kasernenartigen Bauweise über freistehende Pavillons seit den 1950er Jahren bis hin zu Gesamtschulen mit einer Nutzfläche von über 10.000 m<sup>2</sup> entwickelt. Die unterschiedlichen Schulbautypen zeigen die Heterogenität des heutigen Erscheinungsbildes des Gebäudebestands auf. Die Sanierung und Modernisierung von Bildungsstätten erfährt hierdurch gegenüber dem Neubau eine höhere Wichtigkeit.

## **2.2 Aktuelle Situation des Schulbaubestands in Deutschland**

Die Investitionstätigkeit für Nichtwohngebäude (Neubau) lag nach Reidenbach et. al. in Deutschland in den Jahren von 2003 bis 2006 unter dem europäischen Durchschnitt. Im Bereich der Gebäude des Bildungswesens betrug die in Deutschland getätigte Investitionssumme in den drei Jahren < 15 €/Einwohner, was gegenüber dem europäischen Mittel rund einem Viertel entspricht. In Großbritannien betrug die Investitionssumme im Vergleich rund 200 €/Einwohner im gleichen Zeitraum (vgl. [20] S. 58).

Bei der Verteilung der Investitionstätigkeit im Nichtwohnungsbau innerhalb Deutschlands weist das Bildungswesen einen Anteil von 3,5 % auf. Aus der geringen Investitionstätigkeit resultiert ein Rückstand im kommunalen Bereich sowie im Vergleich zu anderen Industriestaaten eine unterproportionale Tätigkeit (vgl. [20] S. 58), [36] S. 31 ff.).

In den 1970er Jahren tätigten die alten Bundesländer mit einer Summe von jährlich 7 Mrd. Euro (in den Preisen vom Jahr 2000) die höchsten Jahresausgaben für Baumaßnahmen an Schulgebäuden. Seitdem verringerte sich das Investitionsvolumen auf jährlich 2 Mrd. Euro. Die finanzielle Situation um die Jahrtausendwende war zudem in vielen Kommunen schwierig, womit die massive Einsparung zu begründen ist. Insgesamt investierten die alten Bundesländer in den Jahren von 1950 bis 2005 insgesamt 185 Mrd. Euro in den Schulbau. Die Anschaffung von Mobiliar und technischen Geräten belief sich auf 8,5 % aller getätigten Investition (vgl. [20] S. 169 ff.).

Die Entwicklungen dieser Investitionstätigkeit differenzieren sich in den neuen und alten Bundesländern. Die getätigten Investitionen gingen in den alten Bundesländern nicht weiter zurück. In den letzten zehn Jahren war ein leichter Anstieg festzustellen. Die Entwicklung in den neuen Bundesländern war weiterhin rückläufig. Die Gründe dafür sind u.a. die bereits beschriebene Abwanderung der Bevölkerung aus diesen Regionen und der eintretende Geburtenrückgang Anfang der 1990er Jahre (vgl. [36] S. 31 ff.) sowie die Auflösung des „Einheitsschulsystems“ (vgl. [20] S. 170). Die Investitionssumme für Baumaßnahmen in den neuen Bundesländern betrug nach der Wiedervereinigung zwischen 1992 bis 2005 insgesamt 10,7 Mrd. Euro (vgl. [20] S. 171).

Der Rückgang der Investitionstätigkeit begründet sich zudem durch die Ausgliederung von Einrichtungen in ein PPP-Verfahren<sup>1</sup> oder das Leasing von Sachgegenständen. Eine Verlagerung dieser Investitionen zu privaten Unternehmen ist die Folge. Diese sind in der Statistik der öffentlichen Hand nicht aufgeführt (vgl. [20] S. 59 ff.).

Als Folge des Investitionsrückgangs weist der hohe Gebäudebestand der Bildungsstätten einen hohen Sanierungsbedarf auf. Neben veralteten und ineffizient betriebenen technischen Anlagen befinden sich die Gebäudehüllen in einem abgängigen Zustand. Die Mängel stellen sich zudem in Form von z.B. undichten Anschlüssen an der thermischen Gebäudehülle sowie abgängigen Bauteilen dar. Die undichten Anschlüsse ermöglichen den Eintritt kalter Außenluft und Feuchtigkeit in den Innenraum. Luftzugerscheinungen entstehen, die zu Beeinträchtigungen des Innenraumkomforts führen. Durch die abgängigen Gebäudehüllen stellt sich eine Erhöhung des Heizwärmebedarfs und folglich ein Anstieg der jährlichen Energiekosten ein (vgl. [37] S. 10 ff.).

Die opaken und transparenten Bauteile des Gebäudebestands entsprechen nicht den heutigen bauphysikalischen Anforderungen. Die schlechte Qualität des baulichen Wärmeschutzes verursacht neben den Lüftungswärmeverlusten ( $Q_L$ ), aufgrund undichter Anschlüsse, hohe Transmissionswärmeverluste ( $Q_T$ ). Thermische Unbehaglichkeiten im Sommer und Winter sind die Folge und wirken sich auf die Leistungsfähigkeit der Gebäudenutzer aus (vgl. [38] S. 6ff.).

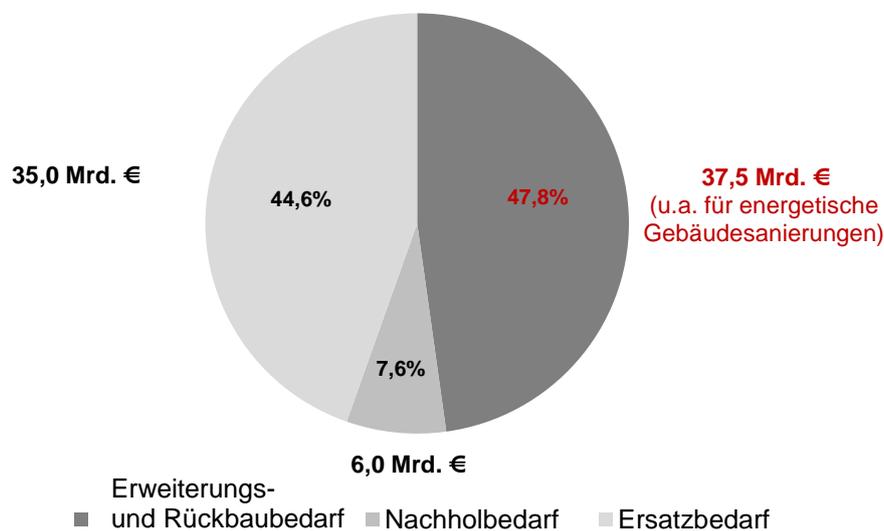
---

<sup>1</sup> Public private partnership (PPP) bedeutet die vertragliche Zusammenarbeit zwischen öffentlicher Hand und privatrechtlich organisierten Unternehmen mit dem Ziel der Vereinigung von Ressourcen wie Kapital, Personal und fachlichen Kompetenzen in einem gemeinsamen Projekt.

### 2.3 Neubau- und Sanierungsbedarf innerhalb des deutschen Schulbaus

Der notwendige kommunale Investitionsbedarf wird in den Jahren von 2006 bis 2020 auf 704 Mrd. Euro geschätzt. Der Investitionsbedarf in Bildungsstätten weist einen Anteil von 10,4 % am gesamten Bedarf auf und entspricht bundesweit einer zu investierenden Summe von 73 Mrd. Euro<sup>2</sup> im kommunalen Bereich (vgl. [20] S. 371). Der Investitionsbedarf gliedert sich in den Erweiterungs- und Rückbaubedarf, dem Nachhol- sowie Ersatzbedarf. Der Erweiterungs- und Rückbaubedarf sieht neben der energetischen Gebäudesanierung auch die Umstellung der Gymnasien auf ein achtjähriges Abitur (G8) sowie die Einführung von Ganztagschulen und die Installation von IT-Technik vor. Dieser Bedarf (auch nicht-kommunaler Bereich) beläuft sich auf 37,5 Mrd. Euro und leistet u.a. durch die Gebäudesanierung einen Beitrag zur Reduzierung der Energiekosten (vgl. [20] S. 211).

Der Ersatzbedarf bildet eine Summe von 35 Mrd. Euro. Er beinhaltet den Ersatz aller abgängigen Bauteile, technischen Anlagen sowie des Mobiliars (vgl. [20] S. 211). Die Höhe des Erweiterungs- und Rückbaubedarfs ist mit dem Ersatzbedarf zu vergleichen und weist zusammen ein Investitionsvolumen von 72,5 Mrd. Euro auf. Der Nachholbedarf, der die brandschutztechnische Sanierung, Schadstoffbeseitigung und Barrierefreiheit beinhaltet, bildet mit 7,6 % den kleinsten Anteil des gesamten Investitionsbedarfs im schulischen Bereich (Abbildung 7) (vgl. [20] S. 211).



**Abbildung 7** Aufschlüsselung des Investitionsbedarfs in Bildungsstätten von 2006 bis 2020 [20]

<sup>2</sup> Aufteilung des kommunalen Investitionsbedarfs für Schulen: 61,1 Mrd. Euro in den alten Bundesländern und 11,9 Mrd. Euro in den neuen Bundesländern [20].

Eine Studie des „Bremer Energie Instituts“ ermittelt den bundesweiten Neubau- und Sanierungsbedarf von Gebäuden, die sich in „sozialer und kommunaler Infrastruktur“ befinden, für den Zeitraum von 2012 bis 2020. Die Studie berücksichtigt dynamische Effekte, wie rückläufige Schülerzahlen, die Mittel des Zukunftsinvestitionsgesetzes [10] und den beschriebenen Sanierungsstau. Die Anforderungen der Energieeinsparverordnung 2009 [7] sowie die KfW-Effizienzhaus-Standards 85 und 70 [39] bilden den energetischen Standard. Die auftretenden Bedarfskosten (Energiekosten) finden in der Betrachtung keine Beachtung.

Die zu tätige Investitionssumme des Neubaubedarfs bezieht sich mit 8,2 Mrd. Euro auf insgesamt 3.300 Gebäude deutschlandweit (vgl. [9] S. 36 und S. 40). Einen größeren Bedarf stellt die Sanierung der rund 18.000 baufälligen Schulgebäude dar. Der Investitionsbedarf der Gebäudesanierung beträgt, bei der Erfüllung der Anforderungen nach EnEV 2009 (Neubau) [7], 27 Mrd. Euro (vgl. [9] S. 37 f. und S. 44). Die jährliche Anzahl zu sanierender Schulgebäude beläuft sich auf rund 2.000 Schulen.

Die Studie vergleicht die Energiestandards „EnEV 2009-Neubau“, „KfW-Effizienzhaus 85“ sowie „KfW-Effizienzhaus 70“. Das Ergebnis zeigt den investiven Mehraufwand zur Einhaltung der unterschiedlichen Standards auf. Bei einer Verschärfung der energetischen Anforderungen fallen beim „KfW-Effizienzhaus 85“ 13 % und beim „KfW-Effizienzhaus 70“ 29 % Mehrkosten gegenüber der EnEV-Variante an. Tabelle 1 stellt Neubau- und Sanierungsbedarf von Schulen in „sozialer und kommunaler Infrastruktur“ dar und vergleicht den investiven Aufwand der Energiestandards.

**Tabelle 1** Neubau- und Sanierungsbedarf von Schulen in „sozialer und kommunaler Infrastruktur“ [9]

Standard	EnEV 2009 (Neubau)	KfW 85	KfW 70
<b>Neubaubedarf</b>	8,2 Mrd. € (100 %)	9,2 Mrd. € (+13 %)	10,5 Mrd. € (+29 %)
<b>Sanierungsbedarf</b>	27,0 Mrd. € (100 %)	30,5 Mrd. € (+13 %)	34,8 Mrd. € (+29 %)

Der Sanierungsbedarf von Schulgebäuden beträgt rund 35 % aller Kosten, die für die Gebäudesanierung der gesamten „sozialen und kommunalen Infrastruktur“ anfallen. Dieser Wert weist den größten Anteil im Vergleich zu anderen Gebäudenutzungsarten in kommunaler Hand auf. Der gesamte Investitionsbedarf in Nichtwohngebäude aus der „sozialen und kommunalen Infrastruktur“ beläuft sich von 2012 bis 2020 für Neubauten auf 50 Mrd. Euro und zur Sanierung von Bestandsgebäuden auf rund 75 Mrd. Euro (EnEV-2009 Neubau) (vgl. [9] S. 40 ff.).

## 2.4 Gesetzliche Anforderungen zur Energieeinsparung in Gebäuden

Aufgrund der „Ölpreiskrise“ Anfang der 1970er Jahre (vgl. [4] 38 ff.) und des darauf folgenden Inkrafttretens des Energieeinsparungsgesetzes im Jahr 1976 [40] entstand die erste „Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden“ (Wärmeschutzverordnung 1977 / WSVo 77) [22]. Das Energieeinsparungsgesetz begründet sich auf die steigenden Energiepreise sowie die Abhängigkeit des Imports von Energieträgern nach Deutschland. Die Endlichkeit fossiler Energieträger sowie deren negativer Einfluss auf das Klima lassen das Bewusstsein zur Senkung des Ressourcenverbrauchs seit dieser Zeit erkennen.

Die Wärmeschutzverordnung 1977 (WSVo 77) forderte eine Reduzierung der Wärmeverluste infolge von Transmission ( $Q_T$ ) sowie Infiltration ( $Q_V$ ) über die Bauteile. Die Bewertung der energetischen Qualität und die Einhaltung der Anforderungen basierte auf dem auf die Umfassungsfläche der Gebäudehülle bezogenen mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten „ $k_{m,max}$ “ (jetzt „ $H_T$ “). Unterschiedliche Innenraum-Solltemperaturen lassen eine Differenzierung der Gebäude zu (vgl. [22] §§ 1 bis 6).

Eine Verschärfung und Ergänzung der WSVo trat in den Jahren 1982 [41] und 1995 [42] in Kraft. Die aufeinander aufbauenden Verordnungen berücksichtigten den Umgang mit bestehenden Gebäuden und die Anforderungen an Bauteile, die „erstmalig eingebaut, ersetzt oder erneuert werden“ (vgl. [41] § 10). Die dritte Auflage der WSVo aus dem Jahr 1995 bilanzierte erstmals „zu errichtende Gebäude“ nach dem Jahresheizwärmebedarf ( $Q_h$ ) und ersetzte die Bewertung der Gebäude anhand des mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten ( $H_T$ ) zum  $A/V$ -Verhältnis (Gebäudekompaktheit) (vgl. [42] Anl. 1). Der Jahresheizwärmebedarf ( $Q_h$ ) setzt sich aus Transmissionswärmeverlusten ( $Q_T$ ), Lüftungswärmeverlusten ( $Q_V$ ) sowie den internen ( $Q_i$ ) und passiv-solaren Gewinnen ( $Q_s$ ) zusammen. „Niedrigenergiehäuser“ und „Passivhäuser“ wurden in dieser Zeit erstmals definiert.

Das Ziel der EU-Richtlinie „2002/91/EG“ des Europäischen Parlaments über die „Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden“ verfolgte u.a. die Schaffung eines „allgemeinen Rahmens für eine Methode zur Berechnung der integrierten Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden“ (vgl. [43] Art. 1). Die Energieeinsparverordnung 2002 (EnEV) (vgl. [5]), die auf der EU-Richtlinie basiert, löste die nationale WSVo ab. Sie beschrieb den geforderten Rahmen zur „Berechnung der integrierten Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden“ (vgl. [43] Art. 3). und die Erstellung von „Energieausweisen“ (vgl. [43] Art. 7), um eine Transparenz der Energieeffizienz von Gebäuden zu schaffen. Die EnEV bewertet die Gebäude nach dem Jahresprimärenergiebedarf ( $Q_p$ ) und dem mittleren Transmissionswärmeverlust über die Gebäudehülle ( $H_T$ ).

Die Novellierung der EnEV 2007 führte das Referenzgebäudeverfahren für Nichtwohngebäude ein (vgl. [6] § 4). Das Berechnungsverfahren stellt Mindestanforderungen an den Jahresprimärenergiebedarf ( $Q_p$ ) sowie den mittleren Transmissionswärmeverlust ( $H'_{T}$ ) über ein Referenzgebäude „gleicher Geometrie, Nettogrundfläche, Ausrichtung und Nutzung“. Die Ermittlung des Jahresprimärenergiebedarfs ( $Q_p$ ) berücksichtigt die anlagentechnischen Komponenten der Heizung, Kühlung, Belüftung, Beleuchtung und Trinkwarmwasserbereitung sowie die energetische Qualität der wärmeübertragenden Gebäudehülle.

Die EnEV 2009<sup>3</sup> (vgl. [7] Abs. 2 und 3) bzw. die EnEV 2014 (vgl. [8] Abs. 2 und 3) verschärften die Anforderungen an den maximal zulässigen Primärenergiebedarf ( $Q_p$ ) für Neubauten und bestehende Gebäude gegenüber der vorherigen Verordnung um weitere 30 %.

Die Berechnung des mittleren Transmissionswärmeverlustes ( $H'_{T}$ ) von Nichtwohngebäuden findet, getrennt für opake und transparente Bauteile ( $\bar{U}_{\text{opak/transparent}}$ ), Anwendung (vgl. [7] § 4). Die EnEV 2009 (vgl. [7] § 3) erweiterte das Referenzgebäudeverfahren auf Wohngebäude.

Das „Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien“ aus dem Jahr 2008 regelt u.a. den „Anschluss von Anlagen zur Erzeugung von Strom aus Erneuerbaren Energien“ sowie die „vorrangige Abnahme, Übertragung, Verteilung und Vergütung dieses Stroms durch die Netzbetreiber“ (vgl. [44] § 2). Der aus erneuerbaren Energien bereitgestellte Strom, der „im räumlichen Zusammenhang zu dem Gebäude erzeugt und vorrangig in dem Gebäude selbst genutzt und nur die überschüssige Energiemenge in ein öffentliches Netz“ einspeist, fließt nach § 5 der EnEV 2009 [7] positiv in die Bilanz der end- und primärenergetischen Betrachtung ein. Die Anrechnung ermöglicht die Errichtung und Sanierung von Gebäuden nach Anforderungen des Plusenergie-Standards, der eine positive Energiebilanz des Gebäudebetriebs fordert.

Das „Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich“ beschreibt die anteilige Deckung des Wärme- und Kältebedarfs für Neubauten (und bei der Sanierung öffentlicher Gebäude) aus erneuerbaren Energien. Die Höhe des Deckungsanteils regenerativer Energien zum Bedarf ist vom eingesetzten Energieträger abhängig (vgl. [45] § 5). Eine Alternative zur Nutzung erneuerbarer Energien bietet z.B. die Ausführung eines gegenüber dem Referenzgebäude erhöhten baulichen Wärmeschutzes als Maßnahmen zur Einsparung von Energie (vgl. [45] § 7; Maßnahmen VI).

Eine Novellierung der EU-Richtlinie (2002/91/EG) „Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden“ [43] durch die EU-Richtlinie (2010/C 123 E/04) fand im Jahr 2010 statt. Die Richtlinie fordert die Mitgliedsstaaten auf, die Anzahl der „Niedrigstenergiegebäude“ zu erhöhen (vgl. [15] Abs.

---

<sup>3</sup> Zum Zeitpunkt der Datenerhebung war die EnEV 2009 [7] gültig.

(17)). Die Darlegung und Umsetzung geschieht auf nationaler Ebene (vgl. [15] Art. 4) Die Definition „Niedrigstenergiegebäude“ beinhaltet ein Gebäude, dass „eine sehr hohe [...] Gesamtenergieeffizienz aufweist“. Die Deckung des Gesamtenergiebedarfs dieser Gebäude erfolgt größtenteils über den Bezug sowie der Nutzung erneuerbarer Energien in der unmittelbaren Umgebung des Gebäudes (vgl. [15] Art. 2). Ab dem Jahr 2021 sollen alle neuen Gebäude diesen Anforderungen entsprechen. Ab 2019 gilt diese Anforderung als Mindeststandard für öffentliche Gebäude.

## 2.5 Energieverbrauch von bestehenden Bildungsstätten in Deutschland

Eine Studie des „Fraunhofer-Instituts für Bauphysik“ dokumentiert jährliche Heizenergie- sowie Stromverbräuche von insgesamt 610 Bildungsstätten unterschiedlichen Baualters [46]. Die Studie stellt den Energieverbrauch von Kindergärten, Schulen, Sporthallen, Fachhochschulen sowie Universitäten gegenüber (Tabelle 2). Die getrennte Darstellung der Verbräuche geschieht nach Gebäudenutzung.

**Tabelle 2** Anzahl und Nutzungsarten der untersuchten Gebäude [46]

<b>Nutzung</b>	Kindergarten	Schulen	Sporthallen	Fachhochschulen	Universitäten
<b>Anzahl</b>	35	199	14	59	303

Eine Spezifizierung der erfassten Verbräuche erfolgt über die Gebäudegrundfläche. Die Studie zeigt einen jährlichen Heizenergieverbrauch (innerhalb der Standardabweichung) der Bildungsstätten von 191,3 bis 238,2 kWh/(m<sup>2</sup>•a). Die untersuchten Schulen weisen einen durchschnittlichen Heizenergieverbrauch von 211,4 kWh/(m<sup>2</sup>•a) auf (vgl. [46] S. 11). Dieser Verbrauch entspricht rund dem Durchschnittswert aller in der Studie betrachteten Bildungsstätten. In den Universitäten sind aufgrund unterschiedlicher Nutzungsarten und -zeiten, bei z.B. Laboren oder Hörsälen, höhere Abweichungen zu verzeichnen.

Der durchschnittliche Jahresstromverbrauch aller betrachteten Schulgebäude beläuft sich auf 20 kWh/(m<sup>2</sup>•a) und weist den geringsten Verbrauch aller Bildungsstätten innerhalb der Studie auf. In den Universitäten und Sporthallen treten hohe Stromverbräuche von durchschnittlich bis zu 81,8 kWh/(m<sup>2</sup>•a) auf (vgl. [46] S. 13).

## 2.6 Energetische Gebäudestandards

Die folgenden Unterkapitel beschreiben unterschiedliche Energiestandards von Gebäuden sowie deren einzelne Anforderungen. Einige Standards finden in der BMWi-Begleitforschung

„Energieeffiziente Schulen (EnEff:Schule)“ [47] Anwendung. Das Projekt beinhaltet die Umsetzung von Demonstrationsgebäuden in Deutschland und vergleicht einzelner Standards sowie unterschiedliche Energiekonzepte untereinander.

### **2.6.1 EnEV-Standard:**

Die EnEV 2009 [7], bzw. 2014 [8] stellt im Nichtwohnungsbau Mindestanforderungen an den Primärenergiebedarf ( $Q_P$ ) und definiert maximale mittlere U-Werte opaker und transparenter Bauteile ( $\bar{U}_{opak, transparent}$ ) bei zu errichtenden (EnEV-Neubaustandard) und bestehenden Gebäuden (EnEV-Altbaustandard). Im Hinblick auf die Energieeffizienz führt die Erfüllung u.a. dieser Anforderungen zur rechtlichen Konformität aller Neubau- oder Sanierungsmaßnahmen. Die Anforderungen an Sanierungen sind im Bilanzierungsverfahren gegenüber den Ansprüchen an Neubauten um 40 % abgeschwächt. Alle Neubauten unterliegen zusätzlich den Anforderungen des EEWärmeG (vgl. [45] § 3). Zudem fordert die EnEV die Einhaltung des sommerlichen Wärmeschutzes nach DIN 4108-2 (vgl. [48] Abs. 8).

### **2.6.2 KfW-Effizienzhaus-Standard**

Die KfW-Förderprogramme für energieeffizientes Bauen und Sanieren [39] basieren auf der rechtlichen Grundlage der EnEV. Einheitlicher Förderstandard für Neubau und Sanierung sind die „KfW-Effizienzhäuser 130 bis 40 Plus“. Die Zahlen geben die notwendige prozentuale Unterschreitung des Primärenergiebedarfs des Referenzgebäudes an, um den jeweiligen Standard zu erfüllen. Der Effizienzhaus-130-Standard betrifft z.B. die Sanierung geschützter Denkmäler und stellt die geringsten Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden innerhalb des Programms. Der Effizienzhaus-40-Plus-Standard richtet sich an energieeffiziente Neubauten. Zum Erreichen des energetisch anspruchsvollsten Standards ist die Einbindung erneuerbarer Energien in das Versorgungskonzept unumgänglich. Zusätzlich stellen alle Effizienzhaus-Standards Anforderungen an die maximal mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten ( $\bar{U}_{opak, transparent}$ ) der opaken und transparenten Bauteile (Nichtwohngebäude).

### **2.6.3 3-Liter-Haus-Standard**

Der Energiestandard des „3-Liter-Hauses“ [49] verlangt für die Beheizung, Belüftung und für den Aufwand an Hilfsenergien einen maximalen Energiebedarf von 30 kWh/(m<sup>2</sup>•a). Diese Energiemenge entspricht einem Energieinhalt von rund 3 Litern Heizöl oder 3 m<sup>3</sup> Erdgas (vgl. [50] S. 203 f.) Die Bilanzierung erfolgt auf Grundlage der DIN V 18599 [23].

### **2.6.4 Passivhausstandard**

Der Passivhausstandard fordert einen maximalen Jahresheizwärmebedarf ( $Q_h$ ) von 15 kWh/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a) sowie einen Primärenergiebedarf ( $Q_P$ ) von 120 kWh/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a) inklusive

Nutzerstrom. Der Standard stellt zudem zur Verringerung der Lüftungswärmeverluste hohe Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz sowie den Einsatz raumluftechnischer Anlagen mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung. Zukünftig finden auch Standards wie z.B. das Passivhaus Premium und Plus ihre Anwendung (vgl. [51] S. 5 ff.).

### **2.6.5 Nullenergiestandard**

Der Nullenergie-Standard ist erreicht, wenn eine Kompensation des externen Energiebezugs durch den Energiegewinn, von z.B. solarelektrischen Anlagen, bilanziell vorliegt.

### **2.6.6 Plus-Energie-Standard**

Der Plusenergie-Standard verlangt sowohl einen negativen Jahres-Primärenergiebedarf ( $\Sigma Q_p < 0 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ) als auch Jahres-Endenergiebedarf ( $\Sigma Q_f < 0 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ) (vgl. [52] S. 6; [53] S. 24 ff.). Die Bilanzgrenze bildet das Grundstück, auf dem das Gebäude errichtet ist. Es erfolgt eine Berücksichtigung der in unmittelbarem räumlichem Zusammenhang erzeugten Wärme oder Kälte bzw. des Stroms bei der Bilanz nach § 5 der EnEV 2014 [8].

## 2.6.7 Gegenüberstellung der Energiestandards

Tabelle 3 zeigt die Anforderungen unterschiedlicher Energiestandards von Gebäuden.

**Tabelle 3** Anforderungen unterschiedlicher Energiestandards von Nichtwohngebäuden

Energiestandard	Anforderungen an				
	Primärenergie	Nutz- / Endenergie	Opake und transparente Bauteile	CO <sub>2</sub> -Emission	Einbindung erneuerbarer Energien
EnEV-2009 / 2014 nach [7], [8]	Unterschreitung des Referenzgebäudes <sup>A</sup> (25 %-ige Verschärfung ab 01.01.2016)	keine	Einhaltung der Werte ( $\bar{U}$ ) nach EnEV <sup>A</sup>	keine	EEWärmeG <sup>B</sup>
Effizienzhaus 130 – 40 nach [39]	prozentuale Unterschreitung des Wertes vom Referenzgebäude	keine	Einhaltung der Werte ( $\bar{U}$ ) nach KfW	keine	EEWärmeG <sup>B,C</sup>
3-Liter-Haus nach [49]	Unterschreitung des Referenzgebäudes <sup>A</sup>	$\Sigma Q_f \sim 30 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ für Heizen, Lüften und Hilfsenergien	Einhaltung der Werte ( $\bar{U}$ ) nach EnEV <sup>A</sup>	keine	EEWärmeG <sup>B,C</sup>
Passivhaus [51]	$\Sigma Q_p \leq 120 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ inkl. Nutzerstrom	$Q_h \leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ Jahresheizwärmebedarf	Empfehlung: opake Bauteile: $\leq 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ transparente Bauteile: $0,80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	keine	EEWärmeG <sup>B,C</sup>
Null-Energie-Standard	$\Sigma Q_p = 0 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$	$\Sigma Q_f = 0 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$	Einhaltung der Werte ( $\bar{U}$ ) nach EnEV <sup>A</sup>	keine	EEWärmeG <sup>B,C</sup>
Plus-Energie-Standard [52], [53]	$\Sigma Q_p < 0 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$	$\Sigma Q_f < 0 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$	Einhaltung der Werte ( $\bar{U}$ ) nach EnEV <sup>A</sup>	keine	EEWärmeG <sup>B,C</sup>

**A:** Anforderung an Sanierungen um 40 % abgeschwächt; **B:** nur für Neubauten und z.T. bei der Sanierung öffentlicher Gebäude  
**C:** zur Einhaltung des Standards bei Neubau und Sanierung erforderlich

## 2.7 Energetische Bewertung von Gebäuden

Die DIN V 18599 „Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung“ [23] beschreibt ein Verfahren zur energetischen Bilanzierung von Gebäuden. Das Berechnungsverfahren erfüllt die Anforderungen des Abschnitts 3 der Richtlinie „2010/C 123 E/04“ des Europäischen Parlaments und des Rates der Europäischen Union [15].

Das Verfahren ermittelt den Primärenergiebedarf ( $Q_p$ ) sowie den mittleren Transmissionswärmeverlust über opake und transparente Bauteile der thermischen Gebäudehülle ( $\bar{U}$ ) und führt den Nachweis zur EnEV-Konformität. Die Anwendung der Bilanzierungsmethode gilt sowohl für Neu- als auch für Bestandsbauten. Die Methode berechnet die erforderlichen Energieaufwendungen ( $Q$ ) zur Einhaltung der Randbedingungen<sup>4</sup> sowie die Hilfsenergien ( $W$ ) zum Betrieb der Teilsysteme für die Heizung, Belüftung, Kühlung, Trinkwarmwasserversorgung sowie der Beleuchtung von Gebäuden. Eine Zusammenfassung der nötigen Energiebereitstellung der Teilsysteme ist möglich. Die Summe der Bedarfswerte bildet den Energiebedarf des gesamten Gebäudes (vgl. [23] Teil 1).

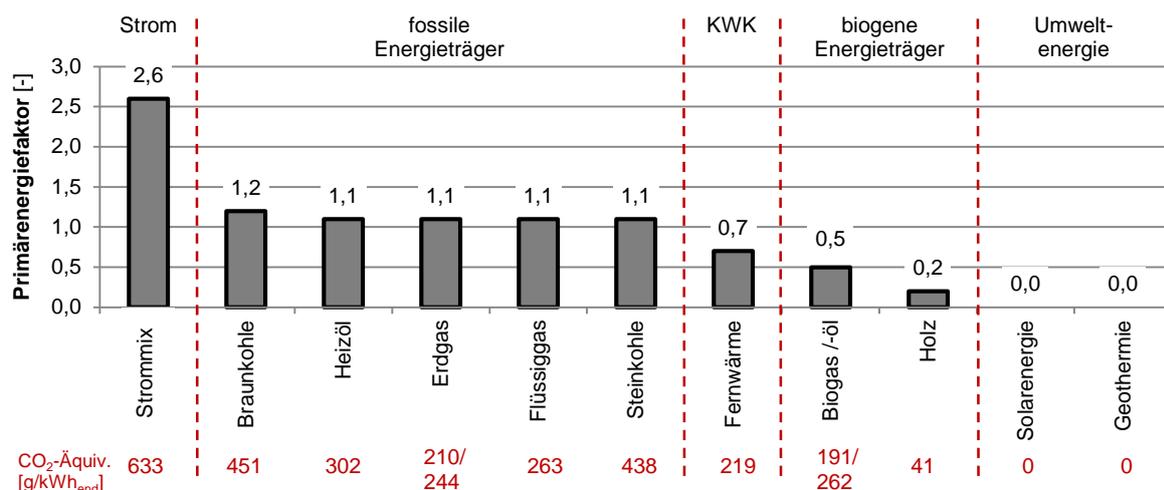
Die Methode zur Bilanzierung des Energiebedarfs teilt die Gebäude in Versorgungsbereiche auf. Gleichzeitig stellt sie Gebäudeteile dar, die von der gleichen Anlagentechnik versorgt werden. Dabei können technische Anlagen mehrere Zonen gleichzeitig versorgen, deren Räume eine gleiche Art der Konditionierung aufweisen. Mehrere Versorgungsbereiche können eine Zone bedienen. Eine Zone bildet eine Gebäude- oder Raumeinheit mit gleichem Nutzungsprofil, wie z.B. Klassenräume oder Verkehrsflächen. Die Bildung von Versorgungsbereichen und die Zonierung von Gebäuden ermöglicht die Berechnung von Teilenergiekennwerten einzelner Anlagen und Gebäudeteile (vgl. [54] S. 77ff.).

Der Endenergiebedarf ( $Q_f$ ) stellt die Größe innerhalb des betrachteten Gebäudes dar, die zur Deckung des z.B. Jahresheizenergiebedarfs ( $Q_h$ ), unter Berücksichtigung aller Prozessverluste, benötigt wird. Der Jahresheizwärmebedarf ( $Q_h$ ) (Nutzenergie) stellt demnach den rechnerischen Energiebedarf für die Beheizung des Gebäudes dar, der „zur Aufrechterhaltung der festgelegten thermischen Raumkonditionen [...] während der Heizzeit benötigt wird“ (vgl. [54] S. 38) Die Differenz zwischen Nutz- und Endenergiebedarf entspricht der Größe aller Verluste innerhalb des Heizsystems. Die Bedarfsentwicklung ist ausgehend vom Nutzenergiebedarf ( $Q_b$ ) zum Primärenergiebedarf ( $Q_p$ ) zu betrachten.

---

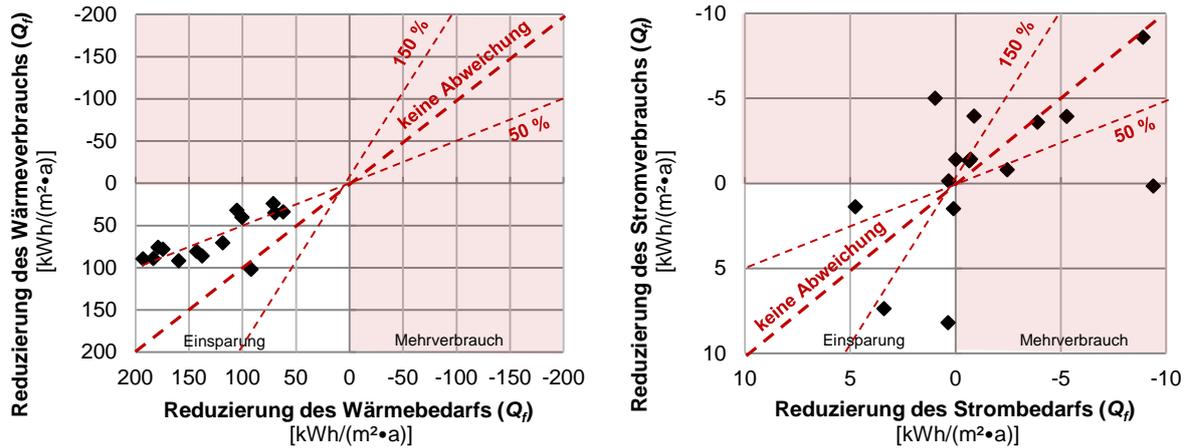
<sup>4</sup> Unter den Randbedingungen werden u.a. die Solltemperaturen des Innenraums ( $\theta_{i,soll}$ ) sowie Betriebs- und Nutzungszeiten ( $T$ ) nach DIN V 18599-10 verstanden [23].

Der Primärenergiebedarf ( $Q_p$ ) ist die „berechnete Energiemenge [...], die zusätzlich zum Energieinhalt des notwendigen Brennstoffs und der Hilfsenergien für die Anlagentechnik auch die Energiemengen einbezieht, die durch vorgelagerte Prozessketten außerhalb des Gebäudes bei der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung der jeweils eingesetzten Brennstoffe entstehen“ (vgl. [54] S. 38). Der eingesetzte Energieträger wird anhand der Primärenergiefaktoren ( $f_p$ ) hinsichtlich des Einflusses auf die Umwelt bewertet. Die Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Emission erfolgt analog. Abbildung 8 zeigt die Primärenergiefaktoren (vgl. [23] Teil 1) und CO<sub>2</sub>-Äquivalente (vgl. [55] Vers. 4.5) verschiedener Energieträger.



**Abbildung 8** Primärenergiefaktoren [23] und CO<sub>2</sub>-Äquivalente [55] unterschiedlicher Energieträger

Eine Studie im Rahmen der „Forschungsinitiative Zukunft Bau“ [56] stellt die ermittelten Energiebedarfswerte von Nichtwohngebäuden den gemessenen Verbräuchen gegenüber. Das Ergebnis dieser Studie zeigt deutliche Abweichungen im Wärme- und Strombereich zwischen den berechneten Bedarfs- und tatsächlichen Verbrauchswerten. Im Wärmebereich liegt der Bedarfswert mit einem Verhältnis von bis zu 2:1 über den Verbrauchswerten. Im Strombereich liegen ebenfalls Abweichungen vor (vgl. [56] S. 3 ff.). Abbildung 9 zeigt die Gegenüberstellung und die Veränderung von Verbrauchs- und Bedarfswerten durch eine energetische Sanierung.



**Abbildung 9** Abgleich von energetischen Bedarfs- und Verbrauchswerten von Nichtwohngebäuden (eigene Darstellung) (links Wärme, rechts Strom)

Die Abweichungen der Bedarfs- zu den Verbrauchswerten haben unterschiedliche Ursachen. Der Nutzereinfluss führt u.a. zu Differenzen bei der Raumsolltemperatur ( $\theta_{i,soll}$ ) und der Einhaltung des personenbezogenen Mindestaußenluftwechsels ( $\dot{V}_A$ ). Aufgrund der Annahme einer falschen Gebäudedichtheit ( $n_{50}$ -Wert) sowie Infiltrationsverlusten ( $Q_V$ ) treten ebenfalls Abweichungen auf<sup>5</sup>. Unterschiedlich angesetzte Betriebszeiten der einzelnen anlagentechnischen Systeme oder Mängel an diesen Systemen führen ebenfalls zu Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Werten (vgl. [56] S. 5 ff.).

Das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung beschreibt den Umgang mit Energieverbrauchskennwerten (vgl. [57] S. 7 ff.). Der Abgleich mit den Bedarfswerten erfordert eine Anpassung des Energieverbrauchanteils für die Heizung mit dem Klimafaktor (KF) des jeweiligen Standorts (Witterungsbereinigung) sowie die Berücksichtigung von Zeiträumen des Gebäudeleerstands.

Die ökonomische Bewertung der umzusetzenden Maßnahmen geschieht auf Grundlage der bedarfsorientierten sowie der verbrauchsorientierten Methode. Die Abweichungen der Bedarfs- zu den Verbrauchswerten sind in späteren Arbeitsschritten aufzuzeigen und zu korrigieren, um plausible Ergebnisse bei der energetischen und ökonomischen Bewertung zu erhalten.

<sup>5</sup> Unter dem Begriff des Luftwechsels werden zum einen die Infiltration infolge der Gebäudedichtheit ( $n_{50}$ ), zum anderen der personenbezogene Mindestaußenluftvolumenstrom ( $\dot{V}_A$ ) verstanden, die Einflüsse auf den Jahresheizwärmebedarf ( $Q_h$ ) haben [23].

## 2.8 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Aus der Investition in die energetische Gebäudesanierung resultiert eine Veränderung des Energieverbrauchs, der Betriebskosten sowie der Schadstoffemissionen. Das „Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden – EnEG“ [58] stellt energetische und ökonomische Anforderungen an bestehende Gebäude sowie an die Umsetzung energetischer Sanierungsmaßnahmen. Die Maßnahmen sollen „generell zu einer wesentlichen Verminderung der Energieverluste beitragen, und die Aufwendungen müssen durch die eintretenden Einsparungen innerhalb angemessener Fristen erwirtschaften können“ (vgl. [58] § 4, S. 3).

Uske (vgl. [59] Kap. 4.1, S.1) definiert die Wirtschaftlichkeit als Quotient aus erzieltm Gewinn und eingesetztem Kapital. Der Gewinn ergibt sich aus der Differenz zwischen den Energiekosten vor und nach der Sanierung und wird den aufgewendeten Investitions- bzw. Baukosten gegenübergestellt.

Pistohl (vgl. [60] S. 126) unterscheidet zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit und Bewertung der Sanierungsmaßnahmen die Methoden des volks- und betriebswirtschaftlichen sowie des ökologischen Ansatzes. Der ökologische Ansatz zeigt anhand des Kosten-Nutzen-Verhältnisses den Einfluss der umgesetzten Maßnahme auf die Umwelt auf. Die volkswirtschaftliche Betrachtung stellt den Einfluss der Maßnahmen auf die Gesellschaft dar. Die betriebswirtschaftliche Methode wendet die „rein wirtschaftliche Betrachtungsweise“ an. Innerhalb der betriebswirtschaftlichen Betrachtung sind statische und dynamische Verfahren zu unterscheiden, die auf den volkswirtschaftlichen und ökologischen Ansatz übertragbar sind und in den folgenden Kapiteln beschrieben werden.

### 2.8.1 Statische Berechnungen

Die Methoden der statischen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen basieren nach Pistohl auf Grundlage des Kostenvergleichs (vgl. [60] S. 127 ff.). Die Anwendung dieser Methoden unterliegt wenigen Parametern, wie z.B. den Energie- und Investitionskosten sowie der Nutzungsdauer ( $T_N$ ). Zeitlich abhängige Aspekte, wie Preisänderungsfaktoren ( $r$ ) und Kapitalzinssätze ( $q$ ), finden keine Berücksichtigung. Die statischen Rechenmodelle stellen die zu erwartenden Einnahmen den Ausgaben gegenüber. Die Ergebnisse stellen nur näherungsweise Prognosen dar. Diese Verfahren dienen der Ermittlung der ökologischen Wirtschaftlichkeit. Betrachtungsschwerpunkt kann z.B. der Aufwand zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den sanierten Gebäudebetrieb sein. Die statische Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verfolgt mehrere Ansätze:

### 2.8.1.1 Pay-Back-Period (PBP) / Erntefaktor

Die Pay-Back-Period stellt den Investitionskosten (IK) die jährlich eingesparten Energiekosten ( $E_a$ ) gegenüber (vgl. [60] S. 130). Sie findet Anwendung, wenn am Anfang des Betrachtungszeitraums einer einmaligen Auszahlung regelmäßig zu erwartende Erträge, wie z.B. die Reduzierung des Energieverbrauchs oder der CO<sub>2</sub>-Emission, folgt. Dieses Verfahren berechnet die statische Amortisation. Eine Maßnahme gilt als wirtschaftlich, wenn die Amortisationszeit vor dem Ende der zu erwartenden Nutzungsdauer ( $T_N$ ) liegt. Die Variante mit der kürzesten Amortisationsdauer bildet die wirtschaftlichste Lösung.

Die Pay-Back-Period wird nach Formel 1 ermittelt:

$$[1] \quad PBP = \frac{IK}{E_a} \quad [a]$$

$IK$ : Investitionskosten [€]

$E_a$ : jährliche Energiekosteneinsparung [€/a]

Die Ergebnisse dieser Berechnung sind bei der Bewertung von Sanierungsmaßnahmen nur bedingt verwertbar, da nur wenige Parameter in die Betrachtung einfließen. Die Methode zur Ermittlung der Amortisationszeit vernachlässigt die tatsächliche Nutzungsdauer ( $T_N$ ) sowie die anfallenden Kosten und Gewinne nach der Amortisationsdauer. Die Amortisationszahl innerhalb der zu erwartenden Nutzungszeiten ist aussagekräftiger, da sie die Häufigkeit der Rückzahlungen innerhalb des Betrachtungszeitraums beschreibt. Sie dient der Entscheidungsfindung sowie dem Aufzeigen von Umsetzungsalternativen. Dementsprechend liegen der „Pay-Back-Period“ die Methode der Amortisationszeit sowie der Amortisationszahl zugrunde.

### 2.8.1.2 Preis-Leistungs-Verhältnis (PLV)

Pistohl beschreibt mit dem Preis-Leistungs-Verhältnis (PLV) ein weiteres Verfahren innerhalb der statischen Betrachtung (vgl. [60] S.129). Das PLV bildet das Verhältnis aus Investitionskosten ( $IK$ ) zur absoluten Energieeinsparungen ( $E_a$ ) innerhalb der Nutzungszeit ( $T_N$ ) des Bauteils bzw. der technischen Anlage. Die Methode ermittelt den investiven Aufwand der eingesparten Energieeinheit und zeigt Potenziale der geplanten Sanierungsmaßnahmen auf. Eine Maßnahme stellt sich als wirtschaftlich dar, wenn das PLV kleiner ist als der aktuelle oder anzusetzende Energiepreis.

Das Preis-Leistungs-Verhältnis wird nach Formel 2 ermittelt:

$$[2] \quad PLV = \frac{IK}{(E_a \cdot T_N)} \quad [€/MWh]$$

$IK$ : Investitionskosten [€]

$E_a$ : jährliche Energieeinsparung [MWh/a]

$T_N$ : Nutzungsdauer [a]

Aufgrund der Vernachlässigung von Preisänderungsfaktoren ( $r$ ) ist die Bewertung der energiesparenden Sanierungsmaßnahmen anhand dieser Methode nur bedingt aussagekräftig. Gegenüber der ökonomischen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung stellt sich das Preis-Leistungs-Verhältnis als besseres Verfahren zur Ermittlung der ökologischen Wirtschaftlichkeit dar. Der Ausstoß von CO<sub>2</sub>-Emissionen oder der Verbrauch von Primärenergien durch den Gebäudebetrieb unterliegen keinen marktbestimmenden Einflüssen, sodass dieses Verfahren zur „ökologischen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung“ empfohlen werden kann (vgl. [60] S. 126).

## 2.8.2 Dynamische Berechnungen

Die Ermittlung der „ökonomischen Wirtschaftlichkeit“ erfordert komplexere Berechnungsverfahren. Die dynamischen Verfahren beziehen ein breiteres Spektrum an Eingangsparametern ein. Sie berücksichtigen neben den in der statischen Betrachtung beschriebenen Parametern zusätzlich die Einflüsse der Preisänderungsfaktoren ( $r$ ) und Kapitalzinssätze ( $q$ ) zur Finanzierung der umzusetzenden Maßnahmen. Diese Parameter sind vor der Betrachtung festzulegen. Die Kosten für Wartung, Instandsetzung sowie Bedienung der technischen Anlagen fließen ebenfalls in die Berechnungen ein.

Die Kosten der Maßnahmen werden nach VDI 2067 (vgl. [11] S. 7 ff.) bzw. VDI 6025 (vgl. [61] S. 38 ff.) in kapital-, bedarfs- und betriebsgebundene sowie sonstige Kosten differenziert. Die kapitalbedingten Kosten beinhalten die Kapitalzinsen innerhalb des Betrachtungszeitraums. Die bedarfsgebundenen Kosten resultieren aus den dokumentierten Energieverbräuchen vor und nach der Sanierung oder aus der energetischen Bilanzierung der Gebäude nach DIN V 18599 [23]. Die betriebsgebundenen Kosten zur Wartung, Bedienung und Instandsetzung ergeben sich nach VDI 2067 (vgl. [11] S. 7 ff.) in Abhängigkeit der Investitionskosten. Unter die sonstigen Kosten fallen z.B. Versicherungen und allgemeine Abgaben.

### 2.8.2.1 Annuitätenmethode

Die Annuitätenmethode nach VDI 2067 (vgl. [11] S. 7 ff.) bzw. VDI 6025 (vgl. [61] S. 38 ff.) stellt Ein- und Auszahlungen unter Berücksichtigung des Kapitalzinses ( $q$ ), der Betrachtungs- ( $T$ ) und Nutzungszeit ( $T_N$ ) sowie des Restwertes ( $R_W$ ) und der Ersatzbeschaffungen ( $B_{Ersatz}$ )

gegenüber. Die Methode teilt einmalige Zahlungen (Investitionen) und jährlich anfallende „Renten“ (Einnahmen) unter Verwendung des Annuitätenfaktors ( $\alpha$ ) in jährlich gleichmäßige Raten während der angesetzten Nutzungszeit auf. Diese sind vom Kapitalzins und der Betrachtungszeit abhängig.

Der Annuitätenfaktor wird anhand der Formel 3 ermittelt:

$$[3] \quad \alpha = \frac{q^T * (q-1)}{q^T - 1} \quad [-]$$

$q$ : jährlicher Zinsfaktor [-]

$T$ : Betrachtungszeitraum in Jahren [a]

Die Ermittlung der kapitalgebundenen Kosten basiert auf dem Betrachtungszeitraum ( $T$ ) und dem jährlichen Zinsfaktor ( $q$ ). Die Parameter beeinflussen die Höhe des Restwerts ( $R_w$ ) bzw. die Kosten der Ersatzbeschaffung ( $B_{Ersatz}$ ) des Bauteils oder der technischen Anlage. Ist der Betrachtungszeitraum des Bauteils oder technischen Anlage länger als die Nutzungsdauer, sind Ersatzbeschaffungen zu berücksichtigen. Ist der Betrachtungszeitraum kürzer als die Nutzungsdauer, ist ein Restwert des Bauteils oder der technischen Anlage anzusetzen. Ergeben sich höhere Einnahmen als Ausgaben unter Anwendung der Annuitätenmethode, ist eine Amortisation der Maßnahme gegeben (vgl. [11] S. 7 ff.; [61] S. 38 ff.).

Die Annuität der kapitalgebundenen Kosten ergibt sich aus Formel 4:

$$[4] \quad K_{N,K} = (K_0 + K_1 + K_2 \dots + K_n - R_w) * \alpha$$

$K_{N,K}$ : Annuität der kapitalgebundenen Kosten [€/a]

$K_0 \dots K_n$ : Barwert der Beschaffungen [€]

$R_w$ : Restwert [€]

$\alpha$ : Annuitätenfaktor [-]

Die Abzinsung auf den Anfang des Betrachtungszeitraums und die lineare Abschreibung der Investition ergeben den Restwert ( $R_w$ ) der Maßnahme. Die Überschreitung des Nutzungszeitraums ( $T_N$ ) des Bauteils oder der technischen Anlage ist dabei nicht möglich. Die Berechnung berücksichtigt bei einer Überschreitung die Ersatzbeschaffung ( $B_{Ersatz}$ ) (vgl. [11] S. 7 ff.; [61] S. 40).

Der Restwert wird nach Formel 5 ermittelt:

$$[5] \quad R_W = K_0 * r^{n*T} * \frac{(n+1)*T_N - T}{T_N} * \frac{1}{q^T} \quad [€]$$

$r$ : Preisänderungsfaktor [-]

$n_{Ersatz}$ : Anzahl der Ersatzbeschaffungen innerhalb des Zeitraums [n]

$T$ : Betrachtungszeitraum [a]

$T_N$ : rechnerische Nutzungsdauer [a]

Ergeben sich für die laufenden Kosten Preisänderungen innerhalb des Betrachtungszeitraums, so sind diese mit dem preisdynamischen Annuitätenfaktor anzupassen. Ein Abgleich der bedarfs-, betriebsgebundenen und sonstigen Kosten sowie evtl. anfallenden Erlöse in Form von Zuschüssen ist bei einer Veränderung der Kosten mit dem Annuitätenfaktor zu berücksichtigen (vgl. [11] S. 7 ff.; [61] S. 38 ff.).

Die Gesamtannuität aller jährlichen Zahlungen ergibt sich aus Formel 6:

$$[6] \quad K_{N,G} = K_{N,E} - (K_{N,K} + K_{N,V} + K_{N,B} + K_{N,S}) \quad [€/a]$$

$K_{N,G}$ : Gesamtannuität [€/a]

$K_{N,E}$ : Annuität der Erlöse [€/a]

$K_{N,K}$ : Annuität der kapitalgebundenen Kosten [€/a]

$K_{N,V}$ : Annuität der bedarfsgebundenen Kosten [€/a]

$K_{N,B}$ : Annuität der betriebsgebundenen Kosten [€/a]

$K_{N,S}$ : Annuität der sonstigen Kosten [€/a]

Bei der Durchführung der Annuitätenmethode werden zwei Fälle unterschieden. Handelt es sich bei der wirtschaftlichen Betrachtung um Maßnahmen, die z.B. durch den Verkauf der erzeugten Energie einen Gewinn erwirtschaften oder eine Energieeinsparung erzielen, muss die Annuität der Erlöse ( $K_{N,E}$ ) größer als die Annuität der Gesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) sein, damit die Investition als wirtschaftlich zu bewerten ist. Vergleicht man unterschiedliche Anlagen, ist die Anlage mit der größten Gesamtannuität zu bevorzugen. Treten keine Erlöse auf, ist  $K_{N,G} < 0$ . Die zu bevorzugende Maßnahme ist dementsprechend die Variante mit den geringsten Kosten (vgl. [61] S. 41).

### 2.8.2.2 Äquivalenter Energiepreis

Der äquivalente Energiepreis ( $G$ ) gibt an, wie hoch die Kosten zur Reduzierung einer Energieeinheit sind. Eine Gegenüberstellung der Energiekosten ermöglicht die Aussage über die Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen. Liegt der äquivalente Energiepreis ( $G$ ) über dem (auf die Nutzungszeit ( $T_N$ ) sowie die Preissteigerung ( $r$ )) angepassten Energiepreis, ist die Maßnahme nicht ökonomisch. Die Maßnahme, die den kleinsten äquivalenten Energiepreis ( $G$ ) aufzeigt, stellt sich als wirtschaftlichste Lösung dar und ist zu bevorzugen. Diese Methode bietet eine Hilfestellung zur Entscheidungen über die Reihenfolge der Durchführung von Sanierungsmaßnahmen (vgl. [60] S. 133).

Der äquivalente Energiepreis wird mit Formel 7 berechnet:

$$[7] \quad G = \frac{(IK * \alpha)}{E_a} \quad [\text{€/kWh}]$$

$IK$ : Investitionskosten [€]

$\alpha$ : Annuitätsfaktor [-]

$E_a$ : Energieeinsparung [kWh]

### 2.8.2.3 Kostenoptimales Schema

Die Methode des kostenoptimalen Schemas leitet das optimale Kosten-Nutzen-Verhältnis aus den Investitionskosten ( $IK$ ) sowie den Einnahmen aufgrund reduzierter Energiekosten ab (vgl. [60] S. 127). Ein konstanter Sockelbetrag bildet die Betriebskosten ab und kann unabhängig betrachtet werden. Diese Kosten haben keine Auswirkungen auf das Kostenoptimum, sind aber bei der Höhe der jährlichen Gesamtkosten von Bedeutung. Ein Graph (A) zeigt die ansteigenden Kosten aufgrund der Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes<sup>6</sup>. Aus den ansteigenden Kosten, bzw. aus höheren Dämmstärken resultieren eine Reduzierung des Energiebedarfs sowie eine Minimierung der Bedarfskosten. Diese sinkenden Energiekosten werden in Form eines absteigenden Graphen (B) dargestellt. Die Summe aus den Teilkosten (A+B+D) bildet die Gesamtkosten (C) ab. Im Idealfall bildet der Graph der summierten Kosten einen unteren Scheitelpunkt. An dieser Stelle des Graphen liegt das Kostenoptimum<sup>7</sup>. Anhand dieses Schemas können Potenziale zur gezielten Investition in Sanierungen ab.

<sup>6</sup> Dieser wird in diesem Fall durch die Erhöhung der Dämmschichtstärke erzielt.

<sup>7</sup> In diesem Beispiel stellt sich das Optimum bei der Betrachtung unterschiedlicher Energiestandards ein.

Die Methode des kostenoptimalen Schemas lässt neben der Betrachtung der Bauteildämmung oder dem Austausch von Fenstern auch die Bewertung technischer Anlagen zu. Die Methode ermöglicht beispielsweise die Gegenüberstellung des geförderten Luftvolumenstroms ( $\dot{V}_a$ ) und den reduzierten Lüftungswärmeverlusten ( $Q_v$ ) beim Betrieb raumluftechnischer Anlagen (RLT) mit wärmerückgewinnenden Systemen (WRG). Eine Erhöhung des Luftvolumenstroms ( $\dot{V}_a$ ) bedingt zum einen die Zunahme der rückgewonnenen Wärmemengen und hat zum anderen die Erhöhung des Betriebsstromverbrauchs zur Folge. Das Verfahren ermöglicht die Ableitung eines kostenoptimalen bzw. -reduzierten Betriebs der Anlagen bei gleichzeitiger Einhaltung der Anforderungen an die Luftqualität in Innenräumen nach DIN V 18599 [23].

## 2.9 Wirtschaftliche Gegenüberstellung von Gebäudestandards

Eine Studie der Stadt Frankfurt stellt einen Kostenvergleich zwischen dem Energiestandard nach EnEV 2009 (Neubau) und dem Passivhaus auf. Ein identisches Wohngebäude mit „gleicher Geometrie, Ausrichtung und Bauart“ bildet das Referenzgebäude ab. Es erfolgt eine Vollkostenrechnung; diese bezieht sich auf die Bauwerks- sowie Bedarfskosten (Energiekosten). Der Betrachtungszeitraum beträgt 50 Jahre (vgl. [62] S. 4ff.).

Die Ergebnisse zeigen erhöhte Bauwerkskosten<sup>8</sup> nach DIN 276 [63] von 7,2 % beim Passivhaus gegenüber dem EnEV-2009-Standard. Nach Ende der Rückzahlungen von Investitionskosten (Ende des Betrachtungszeitraums) stellt sich das Passivhaus gegenüber der EnEV-2009-Variante als wirtschaftlich vorteilhafter dar. Trotz geringerer Investitionskosten am Anfang sind bei der EnEV-Variante höhere kumulierte Gesamtkosten zu verzeichnen (vgl. [62] S. 4).

Bei der Gegenüberstellung der Energiestandards unter Berücksichtigung abweichender Energiepreissteigerungen ergeben sich beim Passivhaus gegenüber dem EnEV-2009-Neubau-Standard geringere Bedarfskosten und ökonomische Vorteile. Das Ergebnis für das Passivhaus ist bei einem überdurchschnittlichen Anstieg der Energiepreise ökonomisch stabiler (vgl. [62] S. 7).

Das Ergebnis der Studie lässt keine Übertragung auf andere Gebäudetypen zu. Die technisch notwendige Ausstattung der Standards weicht zudem stark voneinander ab, und die Energieverbräuche der unterschiedlichen Nutzungsarten unterscheiden sich voneinander. Die Methodik der Studie wird im Rahmen der Arbeit auf Bildungsstätten übertragen und angewendet.

---

<sup>8</sup> Die Bauwerkskosten setzen sich nach DIN 276 (vgl. [63] 10 ff.) aus den Kostengruppen 300 (Bauwerk – Baukonstruktion) und 400 (Bauwerk – Technische Anlagen) zusammen.

## 2.10 Innenraumkomfort (IEQ)

Der Begriff des Innenraumkomforts beschreibt u.a. die thermische, hygrische sowie hygienische Behaglichkeit. Eine Ansammlung von Wärme-, Feuchte- und Stofflasten führt zur Störung der Qualität des Innenraumkomforts. Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin fordert, dass „in geschlossenen Arbeitsräumen [...] gesundheitlich zuträgliche Atemluft in ausreichender Menge zur Verfügung stehen“ muss (vgl. [64] S. 3).

Die thermische und hygrische Behaglichkeit ist in Innenräumen gegeben, „wenn der Mensch Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftbewegung und Wärmestrahlung in seiner Umgebung als optimal empfindet und weder wärmere noch kältere, weder trockenere noch feuchtere Luft wünscht“ (vgl. [65] S.1).

Der hygienische Komfort wird über die Stofflasten in der Raumluft definiert. Flüchtige organische Stoffe (VOC) sowie eine Reihe anorganischer Gase, wie z.B. Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) und Ozon (O<sub>3</sub>), befinden sich in der Innenraumluft. Die Anreicherung der Raumluft mit Kohlendioxid erfolgt z.B. durch die menschliche Atmung direkt. Daher ist die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Innenräumen ein messbarer Indikator zur Bewertung des hygienischen Komforts (vgl. [37] S. 37 ff.).

Bauliche oder anlagentechnische Maßnahmen, wie z.B. die Anordnung von Öffnungsflächen in der Fassade oder die Installation von raumluftechnischen Anlagen, ermöglichen einen ausreichenden Austausch zwischen Innen- und Außenluft und wirken den auftretenden Lasten entgegen (vgl. [64] S. 7 ff.). Ein Raumklima, in dem eine optimale Temperatur ( $\theta$ ), Luftfeuchtigkeit ( $\varphi$ ) und eine hygienisch gute Luftqualität ( $C_{CO_2}$ ) vorliegt, trägt zu einem besseren Lernumfeld und folglich zu einer höheren Leistungsfähigkeit von Menschen bei (vgl. [13] S. 4 ff.; [38] S. 6ff.). Eine optimale Behaglichkeit innerhalb der Unterrichts- und Arbeitsräume wirkt sich volks- und betriebswirtschaftlich positiv aus (vgl. [66] S. 107).

### 2.10.1 Thermischer Komfort

Eine Veröffentlichung der Helsinki University of Technology (vgl. [38] S. 6ff.) stellt Forschungsversuche zusammen und zeigt den Zusammenhang zwischen der Umgebungstemperatur ( $\theta$ ) und der Leistungsfähigkeit ( $P$ ) der Probanden auf. Die Versuche der einzelnen Studien fanden in Bürogebäuden und Schulen statt. Das Ergebnis der Studie zeigt, dass sich ein Optimum der maximalen Leistungsfähigkeit ( $P$ ) bei einer Temperatur ( $\theta$ ) von 21,75 °C einstellt. Eine Erhöhung oder Senkung der Umgebungstemperatur hat eine Verringerung der Leistungsfähigkeit zur Folge.

Unterschiedliche Normen und Richtlinien setzen die Behaglichkeitsbereiche zur Klassifizierung der thermischen Behaglichkeit fest. Der Anwendungsbereich einzelner Normen hängt

von der Art der thermischen Konditionierung der Gebäude sowie ihrer Nutzung ab. Die folgenden Kapitel beschreiben die aktuellen Normen und Regelwerke zur Bewertung des thermischen Innenraumkomforts.

### **2.10.1.1 Arbeitsstättenregel A3.5**

Die Arbeitsstättenregel A3.5 stellt Anforderungen an „gesundheitlich zuträgliche Raumtemperaturen“. Diese liegen vor, wenn eine ausgeglichene Wärmebilanz zwischen dem menschlichen Körper und der Umgebung, in der er sich befindet, gegeben ist. Die Bilanz hängt von der Wärmezufuhr, Wärmeerzeugung und Wärmeabgabe ab. Die Wärmeerzeugung ist vom Aktivitätsgrad ( $\text{met}$ ) der sich im Raum befindenden Personen abhängig. Die Abgabe von Wärme wird durch die Raumlufttemperatur ( $\theta_{i,ar}$ ), die Luftfeuchte ( $\varphi_{i,ar}$ ), die Luftgeschwindigkeit ( $v_{ar}$ ) und die Wärmestrahlung bestimmt sowie durch die Bekleidung beeinflusst ( $\text{clo}$ ) (vgl. [67] S. 3 ff.).

Der Anwendungsbereich der Arbeitsstättenregel gilt u.a. für Arbeits-, Pausen- und Kantinenräume, „an die betriebstechnisch keine spezifischen raumklimatischen Anforderungen gestellt werden“ (vgl. [67] S. 2). Der maßgebende Parameter ist die operative Raumtemperatur ( $\theta_{i,op}$ ). Der Schweregrad der durchgeführten Arbeit bestimmt den Mindestwert der operative Raumtemperatur ( $\theta_{i,op}$ ). Bei „leichter Hand-/Armarbeit bei ruhigem Sitzen [...] verbunden mit gelegentlichem Gehen“ soll die Mindestlufttemperatur 20 °C betragen und 26 °C nicht überschreiten, soweit die Außenlufttemperatur ( $\theta_{e,ar}$ ) 26 °C nicht übersteigt. Die Regel fordert die Umsetzung baulicher Maßnahmen in Form von Sonnenschutzsystemen oder dem Einbau von Sonnenschutzglas bei einer Überschreitung dieses Grenzwertes. Erwärmt sich die Innenlufttemperatur auf über 30 °C, sind zusätzliche Maßnahmen, die die internen Lasten ( $Q_i$ ) reduzieren, wie eine effektive Steuerung der Lüftungseinrichtung oder eine Nachtauskühlung des Raums, zu realisieren. Bei einer Überschreitung der Raumlufttemperatur über 35 °C ist der Raum ohne Anwendung von „technischen und organisatorischen Maßnahmen“ bzw. „persönlichen Schutzausrüstungen“ als Arbeitsraum ungeeignet (vgl. [67] S. 4 ff.).

### **2.10.1.2 DIN 4108-2**

Die DIN 4108-2 „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderung an den Wärmeschutz“ stellt Anforderungen an den thermischen Komfort in Innenräumen (vgl. [48] Abs. 8).

Die Norm bildet die Grenzwerte der Übertemperaturgradstunden [Kh] bei der simulativen oder messtechnischen Überprüfung des thermischen Komforts während der Nutzungszeit von Gebäuden. Diese sind durch unterschiedliche Bezugswerte ( $\theta_{b,op}$ ) der betrachteten Region definiert. Die Aufteilung des Gebiets der Bundesrepublik Deutschland in drei Sommer-Klimaregionen berücksichtigt die Abweichung regional-klimatischer Bedingungen. Die DIN 4108-2

trennt Anforderungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden. Der Bewertungszeitraum der Nichtwohngebäude beträgt 13 h/d innerhalb der Zeit von Montag bis Freitag und 7 bis 18 Uhr. Die Norm setzt für Wohngebäude eine ganztägige Nutzung während der gesamten Woche an. Tabelle 4 zeigt die maximal zulässigen Übertemperaturgradstunden in Abhängigkeit der jeweiligen Sommer-Klimaregion.

**Tabelle 4** Innenraumtemperatur (Bezugswerte) der Sommer-Klimaregionen nach DIN 4108-2 [48]

Sommer-Klimaregion		Bezugswert ( $\theta_{b,op}$ ) der Innenraumtemperatur	Anforderungswert Übertemperaturgradstunden [Kh/a]	
			Wohngebäude	Nichtwohngebäude
<b>A</b>	(z.B. Kiel)	25	1.200	500
<b>B</b>	(z.B. Hannover)	26		
<b>C</b>	(z.B. Stuttgart)	27		

Die Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes deckt in Schulen einen Diskussionsansatz auf, inwieweit die nach DIN 4108-02 (vgl. [48] Abs. 8) anzusetzenden Nutzungszeiten der Nichtwohngebäude auf Schulgebäude übertragbar sind oder eine Anpassung erfolgen sollte.

### 2.10.1.3 VDI 6040

Die Richtlinie VDI 6040 „Raumluftechnik – Schulen – Anforderungen und Ausführungshinweise (VDI-Lüftungsregeln, VDI-Schulbauhinweise)“ findet für Unterrichts- und Aufenthaltsräume in allgemeinbildenden und berufsbildenden Schulen Anwendung, „in denen Schüler regelmäßig unterrichtet oder beaufsichtigt werden“ [12]. Die Bewertungsgröße ist, analog zur Arbeitsstättenregel A3.5, die operative Raumtemperatur ( $\theta_{i,op}$ ). Der Mittelwert der Lufttemperatur ( $\theta_{i,ar}$ ) sowie der Strahlungstemperatur ( $\theta_r$ ) bildet die „empfundene Temperatur“. Der Behaglichkeitsbereich der operativen Raumtemperatur ( $\theta_{i,op}$ ) ist zwischen 20 und 26 °C definiert, sofern der Innenraum keiner direkten Sonneneinstrahlung unterliegt (vgl. [12] S. 3). Die VDI 6040 stellt zudem Anforderungen an die hygienische Luftqualität in Klassenräumen, die in Kapitel 2.10.3 beschrieben werden.

### 2.10.1.4 DIN EN 15251

Die DIN EN 15251 „Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumlufqualität, Temperatur, Licht und Akustik“ ist auf Gebäude anzuwenden, die ohne maschinelle Kühlanlagen im Sommer thermisch konditioniert werden [68]. Die sich im Gebäude befindenden Personen üben hauptsächlich sitzende Tätigkeiten aus und können ihre Kleidung den innen und außen herrschenden Bedingungen anpassen. Der thermische Komfortbereich in den Gebäuden, die im Sommer natürlich belüftet werden, wird in Abhängigkeit der lokalen gleitenden Außenlufttemperaturen ( $\theta_{m}$ ) beschrieben.

Der Einsatz maschineller Lüftungen ohne vorgekühlte Luft ist bei bevorzugter freier Fensterlüftung zulässig. Die Regelung der Innenraumtemperaturen ( $\theta_i$ ) erfolgt im Sommer über freie Fensterlüftung und durch den Einsatz von Ventilatoren bzw. mechanischen Lüftungsanlagen. Das Erzeugen einer Luftgeschwindigkeit ( $v_{ar}$ ) im Sommer kompensiert erhöhte Lufttemperaturen ( $\theta_{i,ar}$ ) sowie die Strahlungtemperaturen ( $\theta_r$ ) raumumschließender Bauteile. Die Umsetzung einer Nachtlüftung führt zur natürlichen Kühlung der Gebäude und zur Verbesserung des thermischen Komforts während der Nutzungszeit (vgl. [68] Abs. A.2, S. 25 ff.).

Die Bewertung des Heiz- und Kühlbetriebs erfolgt getrennt voneinander. Die gleitende Außentemperatur von 15 °C bildet in der weiteren Bearbeitung den Grenzwert zwischen Heiz- und Kühlbetrieb.

Die gleitende Außentemperatur wird nach Formel 8 bestimmt:

$$[8] \quad \theta_{rm} = (1 - \alpha) * \theta_{ed-1} + \alpha * \theta_{rm-1} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$\theta_{rm}$ : gleitender Mittelwert der Außentemperatur für den aktuellen Tag [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\theta_{rm-1}$ : gleitender Mittelwert der Außentemperatur für den vorherigen Tag [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\theta_{ed-1}$ : gleitender Mittelwert der Raumtemperatur für den vorherigen Tag [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\alpha$ : 0,8 = konstant [-]

Dieses Verfahren gilt jedoch nicht während des Heizbetriebs. In diesem Zeitraum tritt die DIN EN ISO 7730 (vgl. [69] S. 21) in Kraft.

Die Grenzwerte der Kategorien zur Klassifizierung des Innenraumkomforts nach DIN EN 15251 (vgl. [68] S. 27 f.) werden nach Formel 9 bestimmt:

$$[9] \quad \theta_{i (min/max)} = 0,33 * \theta_{rm} + 18,8 \pm 2; 3; 4 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$\theta_{i (min, max)}$ : Grenzwert der operativen Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\theta_{rm}$ : gleitender Mittelwert der Außentemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Tabelle 5 beschreibt die Kategorien I bis IV der DIN EN 15251 (vgl. [68] S. 27).

**Tabelle 5** Beschreibung der Kategorien der DIN EN 15251 [68]

Kategorie	Bewertung des thermischen Komforts	Komfortbereich
I	gut	$\Theta_{i \text{ (min)}} = 0,33 * \Theta_{\text{m}} + 18,8 - 2$ $\Theta_{i \text{ (max)}} = 0,33 * \Theta_{\text{m}} + 18,8 + 2$
II	akzeptabel	$\Theta_{i \text{ (min)}} = 0,33 * \Theta_{\text{m}} + 18,8 - 3$ $\Theta_{i \text{ (max)}} = 0,33 * \Theta_{\text{m}} + 18,8 + 3$
III	eingeschränkt	$\Theta_{i \text{ (min)}} = 0,33 * \Theta_{\text{m}} + 18,8 - 4$ $\Theta_{i \text{ (max)}} = 0,33 * \Theta_{\text{m}} + 18,8 + 4$
IV	inakzeptabel	(außerhalb der Kategorie III)

### 2.10.1.5 DIN EN ISO 7730

Die DIN EN ISO 7730 „Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit“ beschreibt ein Verfahren zur Bestimmung des PMV<sup>9</sup> und PPD<sup>10</sup>[69]. Der Anwendungsbereich bezieht sich auf Gebäude, die über das gesamte Jahr mechanisch beheizt und gekühlt werden.

Die Norm unterteilt den thermischen Komfort in vier Kategorien<sup>11</sup> und definiert den Behaglichkeitsbereich der operativen Raumtemperatur ( $\theta_{i,op}$ ) unabhängig zur Außenlufttemperatur ( $\theta_{e,ar}$ ) (vgl. [69] S. 21).

Tabelle 6 beschreibt die Kategorien I bis IV der DIN EN ISO 7730 (vgl. [69] S. 21).

**Tabelle 6** Beschreibung der Kategorien der DIN EN 7730 [69]

Kategorie	Bewertung des thermischen Komforts	Komfortbereich
I	gut	$21 \text{ °C} \leq \Theta_i \leq 23 \text{ °C}$ (Winter) $23,5 \text{ °C} \leq \Theta_i \leq 25,5 \text{ °C}$ (Sommer)
II	akzeptabel	$20 \text{ °C} \leq \Theta_i \leq 24 \text{ °C}$ (Winter) $23 \text{ °C} \leq \Theta_i \leq 26 \text{ °C}$ (Sommer)
III	eingeschränkt	$19 \text{ °C} \leq \Theta_i \leq 25 \text{ °C}$ (Winter) $22 \text{ °C} \leq \Theta_i \leq 27 \text{ °C}$ (Sommer)
IV	inakzeptabel	$19 \text{ °C} \geq \Theta_i \geq 25 \text{ °C}$ (Winter) $22 \text{ °C} \geq \Theta_i \geq 27 \text{ °C}$ (Sommer)

<sup>9</sup> PMV: predicted mean vote

<sup>10</sup> PPD: predicted percentage of dissatisfied

<sup>11</sup> deckungsgleich zur DIN EN 15251 [68]

## 2.10.2 Hygrischer Komfort

Feuchtelasten entstehen durch die Abgabe von Wasserdampf aus Prozessen oder anwesender Personen im Innenraum (vgl. [64] S. 5 f.). Die Luftfeuchte ( $\varphi_{ar}$ ) wirkt sich nur gering auf das Temperaturempfinden und die Wahrnehmung der Luftqualität aus. „In der Regel wird eine um 10 % höhere relative Luftfeuchte ( $\varphi_{ar}$ ) als genauso warm empfunden wie eine um 0,3 °C höhere operative Temperatur ( $\theta_{op}$ )“ (vgl. [69] S. 18). Nutzer empfinden die Luftfeuchtigkeit in Innenräumen ( $\varphi_i$ ) erst in Extremsituationen. Eine subjektive Bewertung ist nur bedingt aussagekräftig. Bei hoher Feuchtigkeit empfindet der Mensch die Luft als schwül. Die Reizung der Atemwege und Augen ist die Folge von zu trockener Luft. Kleinere Abweichungen vom hygrischen Optimum sind durch den Menschen nicht spürbar.

Vielmehr verursacht unter bauphysikalischen Betrachtungspunkten eine zu hohe Innenraumluftfeuchte ein mikrobielles Wachstum in Form von Schimmelpilzen auf z.B. kalten Innenseiten von Bauteilen. Die DIN 4108-3 (vgl. [70] Anh. A und B) stellt Anforderungen an baukonstruktive Aufbauten der Bauteile, die an den Außenraum und an unbeheizte Räume grenzen, um die Schimmelpilzbildung zu vermeiden. Die folgenden Abschnitte beschreiben Normen und Regeln zur Bewertung des hygrischen Komforts.

### 2.10.2.1 Arbeitsstättenregel A3.6

Die Arbeitsstättenregel A3.6 [64] beschreibt eine Methode zur Bewertung der hygrischen Behaglichkeit in Arbeitsräumen und bildet die Grenzwerte der „Schwülkurve“. Die Kurve definiert die maximal einzuhaltende Luftfeuchtigkeit ( $\varphi$ ) in Abhängigkeit zur Raumlufttemperatur ( $\theta_{i,ar}$ ). Die Regel beschreibt die Einhaltung der absoluten Luftfeuchtigkeit von 12 g<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/kg<sub>trockene Luft</sub> „aus physiologischen Gründen“. Die Arbeitsstättenregel zeigt das Auftreten von Feuchtelasten in Räumen auf und sieht von der Notwendigkeit der maschinellen Befeuchtung der Luft von Arbeitsräumen ab. Tabelle 7 zeigt die Grenzwerte der relativen und absoluten Luftfeuchtigkeit ( $\varphi_{ar}$ ) nach ASR A3.6 (vgl. [64] S. 6) auf.

**Tabelle 7** Grenzwerte der relativen und absoluten Luftfeuchtigkeit ( $\varphi_{ar}$ ) nach ASR A3.6 [64]

Lufttemperatur ( $\theta_{i,ar}$ ) [°C.]	relative Luftfeuchtigkeit ( $\varphi_{ar}$ ) [-]	absolute Luftfeuchtigkeit ( $\varphi_{ar}$ ) [g <sub>H<sub>2</sub>O</sub> /kg <sub>trockene Luft</sub> ]
+20 °C	80 %	~ 11,7
+22 °C	70 %	~ 11,6
+24 °C	62 %	~ 11,6
+26 °C	55 %	~ 11,6

### 2.10.2.2 DIN EN 15251

Die DIN EN 15251 definiert Grenzwerte für den Komfortbereich der Luftfeuchte in Innenräumen ( $\varphi_i$ ), die be- und entfeuchtet werden [68]. Die Norm teilt den Komfortbereich in vier Kategorien (I–IV) ein. Diese Anforderungen gelten nur in besonderen Gebäuden, wie z.B. Museen oder einigen Gesundheitseinrichtungen. Die Nutzer von z.B. Bildungsstätten regeln aufgrund der hohen Belegungsdichte den Feuchtehaushalt selber. Die Norm empfiehlt eine absolute Raumlufffeuchte ( $\varphi_{i,ar}$ ) von maximal 12 g<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/kg<sub>trockene Luft</sub> und stellt, wie die ASR A3.6 (vgl. [64] S. 6), identische Anforderungen an den hygrischen Komfort („Schwülkurve“). Tabelle 8 beschreibt die Kategorien I bis IV der DIN EN 15251 (vgl. [68] S. 36).

**Tabelle 8** Beschreibung der Kategorien der DIN EN 15251 [68]

Kategorie	Bewertung des hygrischen Komforts	Komfortbereich
I	gut	$30 \% \leq \varphi_{i,ar} \leq 50 \%$
II	akzeptabel	$25 \% \leq \varphi_{i,ar} \leq 30 \%$ $50 \% \leq \varphi_{i,ar} \leq 60 \%$
III	eingeschränkt	$20 \% \leq \varphi_{i,ar} \leq 25\%$ $60 \% \leq \varphi_{i,ar} \leq 70\%$
IV	inakzeptabel	$20 \% \geq \varphi_{i,ar} \geq 70 \%$

### 2.10.3 Hygienischer Komfort

Die Hauptbestandteile der Außenluft sind Stickstoff (78,1 %), Sauerstoff (20,9 %) und Argon (< 1 %) sowie andere Spurengase, wie zum Beispiel Kohlendioxid und Wasserstoff (vgl. [50] S. 1). Die übermäßige Ansammlung dieser Stofflasten resultiert u.a. durch die Anwesenheit von Personen im Innenraum. Ein geringer Austausch zwischen Innen- und Außenluft führt zu erhöhten Konzentrationen dieser Stoffe in der Raumluff. Ausdünstungen von z.B. VOC, Formaldehyd oder Fasern treten durch im Innenraum verbaute Materialien sowie den Eintritt belasteter Luft aus anderen Räumen oder der Außenluft auf (vgl. [37] S. 37 ff.).

Der Anteil des Kohlendioxids in der Innenraumluff ( $C_{i,CO_2}$ ) beurteilt die stofflich physikalische Luftqualität. Dieser Parameter erweist sich als anerkanntes Maß zur Beurteilung des hygienischen Komforts in Klassenräumen, da eine primäre Freisetzung der Schadstoffe vom Nutzer direkt ausgeht (vgl. [64] S. 4).

Die Kohlendioxid-Konzentration in der Außenluft ( $C_{e,CO_2}$ ) beträgt durchschnittlich 380 ppm (vgl. [4] S. 38 ff.) und nimmt von urbanen Räumen zu ländlichen Gebieten ab. Mit steigendem Gehalt an Kohlendioxid in der Umgebungsluff nehmen die Geruchs- und Schadstoffe zu und wirken sich unmittelbar negativ auf die Leistungsfähigkeit ( $P$ ) des Menschen aus (vgl. [13] S. 4 ff.).

Olesen beschreibt in diesem Zusammenhang die Abhängigkeit des Anteils Unzufriedener (PD) zur Kohlendioxidkonzentration ( $C_{i,CO_2}$ ) in der Umgebungsluft sowie der zugeführten Außenluft in den Raum (vgl. [71] S. 6 f.). Ein Anstieg der Kohlendioxidkonzentration in der Raumluft ( $C_{i,CO_2}$ ) führt zur Verringerung des Leistungsvermögens ( $P$ ) von Personen (vgl. [13] S. 4 ff.). Ein höherer Luftaustausch zwischen Außen- und Innenraumluft prognostiziert eine Steigerung der Leistungsfähigkeit.

Max Pettenkofer beschreibt im 19. Jahrhundert erstmals die Eigenschaft der Infiltration von Luft über Bauteile sowie die Luftqualität in Innenräumen (vgl. [72] S. 71 ff.). Der nach ihm benannte Grenzwert von 1.000 ppm zur Sicherung der hygienischen Luftqualität ist in der Wissenschaft als „Pettenkoferzahl“ bekannt.

Die VDI 6040 (vgl. [12] S. 4) und DIN EN 13779 (vgl. [73] S. 59) stellen Anforderungen an den hygienischen Komfort in Räumen mit einer hohen Belegungsdichte. Veranstaltungsräume, Hörsäle sowie Klassenräume zählen u.a. auch zu diesen Räumen. Die folgenden Abschnitte beschreiben die genannten Normen.

### 2.10.3.1 DIN EN 13779

Die DIN EN 13779 „Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeines, Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme“ regelt die Planung und Ausführung raumluftechnischer Anlagen (RLT) in Nichtwohngebäuden. Die Komfortbereiche gliedern sich in vier Kategorien (IDA I–IV) [73].

Tabelle 9 ordnet den einzelnen Kategorien personenspezifische Außenluftvolumenströme ( $\dot{V}_a$ ) zu, die in der Planung für Nichtraucherbereiche gelten (vgl. [73] S. 59).

**Tabelle 9** Außenluftvolumenströme je Person nach DIN EN 13779 [73]

Kategorie	Außenluftvolumenstrom ( $\dot{V}_a$ ) (Nichtraucherbereich)	
	Üblicher Bereich [ $l \cdot s^{-1} \cdot Person^{-1}$ ]	Standardwert [ $l \cdot s^{-1} \cdot Person^{-1}$ ]
IDA I	> 15	20
IDA II	10–15	12,5
IDA III	6–10	8
IDA IV	< 6	5

### 2.10.3.2 VDI 6040

Die VDI 6040 „Raumluftechnik – Schulen – Anforderungen und Ausführungshinweise (VDI-Lüftungsregeln, VDI-Schulbaurichtlinien)“ beschreibt die Anforderungen an die  $CO_2$ -Konzentration ( $C_{i,CO_2}$ ) in maschinell und natürlich belüfteten Klassenräumen (vgl. [12] S. 4). Die  $CO_2$ -

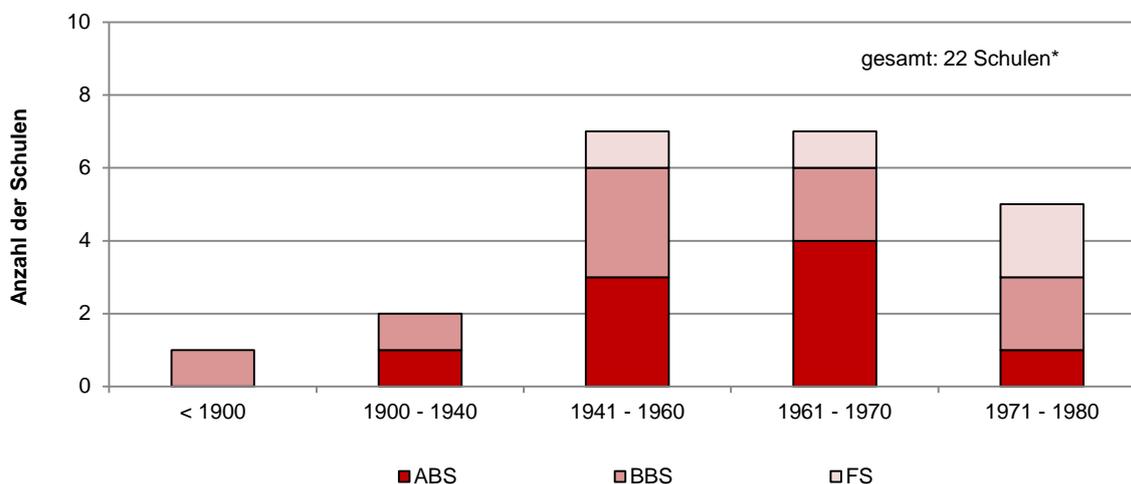
Konzentration gilt in Innenräumen von Schulen als „lufthygienisch unbedenklich“, wenn während einer Unterrichtsstunde (45 Minuten) die mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration 1.000 ppm nicht überschreitet. Eine CO<sub>2</sub>-Konzentration zwischen 1.000 und 2.000 ppm wird als „hygienisch bedenklich“ und über 2.000 ppm als „nicht akzeptabel“ eingestuft.

Gegenüber der DIN EN 13779 (vgl. [73] S. 59) sind die Anforderungen der VDI 6040 (vgl. [12] S. 4) an die hygienische Luftqualität abgeschwächt. Aufgrund hoher Belegungsdichten in Schulgebäuden stellt sich eine personenbezogene Betrachtung des Außenvolumenstroms nach DIN EN 13779 (Tabelle 9) als strenger dar.

### 3 METHODEN ZUR ANALYSE DES GEBÄUDEBESTANDS UND DER SANIERUNGSMABNAHMEN

Die Umsetzung der Sanierungsmaßnahmen an den untersuchten Bildungsstätten fand in den Jahren von 2008 bis 2010 statt. Es handelt sich bei den Schulformen um allgemeinbildende (ABS) und berufsbildende Schulen (BBS) sowie Förderschulen (FS). Der Errichtungszeitraum der Schulgebäude liegt zwischen 1880 und 1980. Drei der Bauten unterliegen dem Denkmalschutz. Der bauliche Zustand der Gebäude vor den Sanierungsmaßnahmen entspricht größtenteils der konstruktiven Ausführung sowie bauphysikalischen Qualität der Erbauungszeit.

Ein Großteil der analysierten Bildungsstätten wurde in den Jahren von 1950 bis 1970 errichtet (Abbildung 10). Die Aufteilung dieser Gebäude in Baualtersklassen entspricht der Schulbautätigkeit (vgl. [20] S. 169 f.), bzw. des Schulbaubestands in Deutschland (vgl. [9] S. 31 f.)



\* : in den folgenden Arbeitsschritten wird aufgrund der Datenlage die Anzahl der untersuchten Gebäude auf 17 Schulen reduziert

**Abbildung 10** Aufteilung der Schulgebäude nach Baujahr und Schulform

Von den 22 untersuchten Bildungsbauten sind neun allgemeinbildende Schulen (ABS), neun berufsbildende Schulen (BBS) und vier Förderschulen (FS). Schüler mit geistiger bzw. körperlicher Behinderung besuchen die Förderschulen (FS). Die Unterrichtsformen sowie der Platzbedarf der Schüler in den Förderschulen mit dem Schwerpunkt „Lernen“ unterscheiden sich nicht signifikant von denen der allgemeinbildenden Schulen. Die Arbeit fasst daher die beiden Schulformen zusammen. Die Gebäude, in denen sich Förderschulen mit dem Förderschwerpunkt „geistige Entwicklung“ befinden, werden hingegen separat betrachtet.

### 3.1 Flächen- und Volumenermittlung

Die Ermittlung der Grundflächen und Rauminhalte der Schulgebäude erfolgt nach DIN 277 „Grundflächen und Rauminhalte von Bauwerken im Hochbau“ [74]. Es wird ein Vergleich zwischen den Gebäuden unterschiedlicher Baualtersklassen durchgeführt. Anhand der Fensterflächenanteile wird die Qualität der Sichtverbindungen aus den untersuchten Klassenräumen nach Anforderungen der Arbeitsstättenrichtlinie ASR 7/1 [75] bewertet. Zudem erfolgt eine „Zonierung“ zur Erfassung der einzelnen Nutzungsbereiche innerhalb der Gebäude nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 1). Kennwerte zur Belegungsdichte sowie zu dem zur Verfügung stehenden Raumvolumen werden vergleichend anhand der unterschiedlichen Schulformen aufgestellt.

#### 3.1.1 Grundflächen und Raumvolumen

Die Ermittlung von Grundflächen und Raumvolumen erfolgt anhand der DIN 277. Die Norm unterscheidet bei der Ermittlung die spezifischen Werte für Bruttogrundfläche (BGF) und Nettogrundfläche (NGF). Die BGF fasst die „Summe der Grundflächen aller Grundrissebenen eines Bauwerks [...] und deren konstruktive Umschließungen“ zusammen (vgl. [74] S. 4 ff.). Sie bildet die Summe aller NGF und Konstruktionsgrundflächen (KGF). Die NGF stellt die Flächen aller lichten Raummaße dar und setzt sich aus der Nutzfläche (NF), der Verkehrsfläche (VF) sowie der technischen Funktionsfläche (TF) zusammen (Abbildung 11).

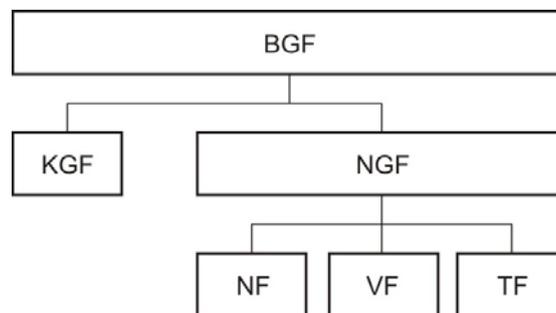


Abbildung 11 Aufteilung der Grundflächen nach DIN 277 [74]

#### 3.1.2 Qualität der Sichtverbindungen (visueller Komfort)

Die Bewertung des visuellen Komforts geschieht anhand der Arbeitsstättenrichtlinie ASR 7/1 (vgl. [75] S. 1 f.). Die Anordnungen der Öffnungen vom Innenraum zum Außenraum (Sichtverbindung) stellen die Versorgung der Räume mit natürlichem Licht sicher. Die Arbeitsstättenrichtlinie fordert die ausnahmslose Berücksichtigung von Sichtverbindungen an der Fassade zur Tageslichtversorgung der Arbeitsräume. Die Größe der Sichtverbindungen des betreffen-

den Raums richtet sich nach Nutzungsart des Gebäudes. Das Verhältnis zwischen der Fensterfläche und der NGF des betrachteten Raumes bildet die Bewertungsgrundlage zur natürlichen Belichtung nach ASR 7/1. Das minimal geforderte  $A_{FE}/A_{NGF}$ -Verhältnis für Innenräume bis  $600 \text{ m}^2_{NGF}$  beträgt 10 % der NGF des Raumes. Die meisten aktuellen Bauordnungen der Bundesländer fordern einen Mindestwert von 12,5 %. Dies bedeutet bei einer Klassenraumgröße von  $60 \text{ m}^2$  eine Fensterfläche von  $7,5 \text{ m}^2$ .

### 3.1.3 Zonierung der Gebäude

Die Zonierung der Gebäude erfolgt nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 1). Die Norm fasst bei der energetischen Bewertung von Gebäuden Nutzungsbereiche („Zonen“) innerhalb der Gebäude zusammen, die gleiche Nutzungsprofile aufweisen. Die Zonierung berücksichtigt, entgegen der Betrachtung des gesamten Gebäudes nach DIN 277 [74], nur die thermisch konditionierten Räume. Das Verfahren der DIN V 18599 stellt eine einheitliche Flächenaufstellung nach den Anforderungen der EnEV 2014 [8] auf. Die NGF der konditionierten Gesamtflächen bildet die Bezugsgröße zur Vergleichbarkeit der Gebäude untereinander. Die spezifischen Bedarfs- oder Verbrauchswerte in  $[\text{kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond. NGF}} \cdot \text{a})]$  basieren in der weiteren Bearbeitung auf der thermisch konditionierten NGF.

Die Anwendung unterschiedlicher Normen und Richtlinien führt zur Abweichung der Ergebnisse bei der Flächen- und Volumenermittlung. Eine Gegenüberstellung der NGF des gesamten Gebäudes nach DIN 277 [74] mit der thermisch konditionierten NGF nach DIN V 18599 [23] zeigt, dass z.B. bei einem unterkellerten Schulgebäude die thermisch konditionierte NGF gegenüber der NGF des gesamten Gebäudes um bis zu 40 % abweicht. Diese Aussage ist jedoch nicht pauschal übertragbar und erfordert eine gebäudebezogene Betrachtung.

## 3.2 Energetische Bewertung von Gebäudehüllen

Unterschiedliche Bewertungsmethoden finden bei der Bestandsaufnahme der unsanierten sowie sanierten Gebäudehüllen Anwendung. Der Wärmedurchlasswiderstand ( $R$ ) bzw. Wärmedurchgangskoeffizient ( $U$ ), nach u.a. DIN EN ISO 6946 (vgl. [76] S. 9 ff.) und DIN EN ISO 13370 (vgl. [77] S 6ff.), bewertet die energetische Qualität einzelner Bauteile der wärmeübertragenden Gebäudehülle. Die zur Errichtungszeit typischen und umgesetzten Bauteilaufbauten (vgl. [59] Kap. 3) werden verglichen und die Bauteile den Anforderungen an den baulichen Mindestwärmeschutz nach Tabelle 3 der jeweiligen DIN 4108-2 [21]; [78]; [79]; [80] gegenübergestellt.

Die Dokumentation der Bauteile und Aufbauten sowie die Wärmeleitfähigkeit einzelner Baustoffe nach DIN EN ISO 10456 (vgl. [81] Abs. 8) und DIN 4108-4 (vgl. [82] Abs. 4) werden zur Ermittlung des Wärmedurchlasswiderstandes ( $R$ ) für opake Bauteile genutzt.

Der Wärmedurchlasswiderstand ( $R$ ) wird nach Formel 10 ermittelt.

$$[10] \quad R = \frac{d}{\lambda} \quad [(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}]$$

$d$  = Schichtdicke des Bauteils [m]

$\lambda$  = Bemessungswert der Wärmeleitgruppe [W/(m·K)]

Die Berechnung des Wärmedurchgangswiderstandes ( $R$ ) mehrschichtiger Bauteilaufbauten berücksichtigt die Wärmeübergangswiderstände  $R_{se}$  und  $R_{si}$ . Der Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstandes stellt den Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) dar, der nach Formel 11 ermittelt wird.

$$[11] \quad U = \frac{1}{(R_{se} + R_{T1} + R_{T2} + \dots + R_{se})} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$$

$R_{si}$  = Wärmeübergangswiderstand innen [(\text{m}^2 \cdot \text{K})/W]

$R_T$  = Wärmedurchgangswiderstand der Bauteilschichten [(\text{m}^2 \cdot \text{K})/W]

$R_{se}$  = Wärmeübergangswiderstand außen [(\text{m}^2 \cdot \text{K})/W]

Die Bewertung des baulichen Wärmeschutzes betrachtet Kellerböden und -decken getrennt. Die DIN EN ISO 13370 beschreibt die Berechnung von U-Werten für Bauteile, die sich „in wärmetechnischem Kontakt mit dem Erdreich befinden“ (vgl. [77] S 5 ff.). Das Verfahren berücksichtigt die periodischen Schwankungen der Temperaturen über das Jahr sowie das Jahresmittel des Wärmestroms ( $\dot{Q}$ ) aus dem Erdreich.

Die DIN EN ISO 10077 (vgl. [83] Abs. 5) beschreibt das Rechenverfahren zur Ermittlung des Wärmedurchgangswiderstands ( $R$ ) transparenter Bauteile (z.B. Fenster).

Das Inkrafttreten der ersten Wärmeschutzverordnung (WSVo) im Jahr 1977 [22] sowie die Novellierung bis zur aktuellen Energieeinsparverordnung 2014 [8] verschärfte die Anforderungen an die maximal zulässigen Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) der einzelnen Bauteile. Die Dokumentation der untersuchten Bildungsstätten stellt die ermittelten U-Werte der unsanierten und sanierten Bauteile den Grenzwerten der jeweiligen Verordnung gegenüber und vergleicht diese mit typischen Wärmedurchgangskoeffizienten der Baualterklassen nach Uske (vgl. [59] Kap. 3).

Die Bewertung der Sanierungsmaßnahmen an den opaken Bauteilen erfolgt anhand der aufgetragenen Dämmschichtstärken und in Abhängigkeit zum Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ). Die Dämmschichtstärke erfordert zum gebäude- und bauteilbezogenen Vergleich aller baukonstruktiven Maßnahmen den Ansatz einer einheitlichen Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs von  $\lambda = 0,035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Die Untersuchung stellt zudem den einzelnen opaken Bauteilen die Anforderungen des Wärmedurchlasswiderstandes ( $R$ ) der zum Errichtungszeitraum gültigen DIN 4108-2 [21]; [78]; [79]; [80] (Tabelle 3) gegenüber.

Der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) sowie der T-Wert ( $\tau$ ) stellen neben dem Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U_w$ ) weitere Qualitätsmerkmale zur Bewertung von Verglasungsarten dar. Der g-Wert bildet die Summe der direkten Transmission der Solarstrahlung sowie der vom Bauteil abgegebenen Wärme durch Strahlung und Konvektion. Der T-Wert ( $\tau$ ) stellt den Lichtdurchlassgrad der Verglasung dar.

Tabelle 10 stellt die Eigenschaften von Fensterverglasungen gegenüber.

**Tabelle 10** Eigenschaften von Fensterverglasungen

Art der Verglasung	U <sub>e</sub> -Wert [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	g-Wert [-]	T-Wert [-]
Einscheibenverglasung (Weißglas)	< 5,8	87	> 90
2-fach „Isolierverglasung“ (ISO)	2,8–3,0	80	90
2-fach „Wärmeschutzverglasung“ (WSV)	0,8–1,4	55–65	76–78
3-fach „Wärmeschutzverglasung“ (WSV)	0,4–0,7	40–50	64–67
2-fach Sonnenschutzverglasung (SSV)	0,8–1,4	20–40	65

Der spezifische auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogene Transmissionswärmeverlust ( $H'_T$ ) (Formel 12) beschreibt die energetische Qualität von wärmeübertragenden Gebäudehüllen. Er bildet die Summe aller Transmissionswärmeverluste ( $Q_T$ ) der einzelnen Bauteile flächengewichtet. Die Nachweispflicht der EnEV [8] fordert die Einhaltung der Transmissionswärmeverluste von opaken und transparenten Bauteilen getrennt.

$$[12] \quad H'_T = \frac{H_T}{A} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$$

$H_T$ : mittlerer Transmissionswärmeverlust aller Bauteile [W/K]

$A$ : wärmeübertragende Umfassungsfläche aller Bauteile [m<sup>2</sup>]

Die Bewertung ermöglicht einen Quervergleich aller Maßnahmen zur Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes auf Bauteil- und Gebäudeebene. Aus der energetischen Sanierung der Gebäudehüllen resultiert eine Verringerung des mittleren Transmissionswärmeverlustes ( $H'_T$ ).

Die Ausbildung luftdichter Anschlüsse erzielt eine Verbesserung der Gebäudedichtheit ( $n_{50}$ ) und folglich eine Reduzierung der Lüftungswärmeverluste aufgrund von Infiltration ( $Q_{v,inf}$ ).

Die DIN 4108-7 [84] legt die Mindestanforderungen an die Gebäudeluftdichtheit fest. Die Ermittlung der tatsächlichen Dichtheit vor und nach den Sanierungsmaßnahmen ist nicht möglich. Nach DIN 4108-7 wird die Gebäudedichtheit für Gebäude im unsanierten Zustand auf  $6 \text{ h}^{-1}$  und im sanierten Zustand auf  $2 \text{ h}^{-1}$  gesetzt. Die energetischen Einzelsanierungsmaßnahmen führen jedoch nicht zur Verbesserung der Gebäudedichtheit ( $n_{50}$ ). Erst mit der Bewertung der Gesamtmaßnahmen erfolgt die Erhöhung der Gebäudedichtheit ( $n_{50}$ ).

### 3.3 Energetische Bewertung der technischen Gebäudeausrüstung

#### 3.3.1 Heizungsanlagen

Eine Dokumentation von Komponenten der Heizungsanlage, wie z.B. Wärmeerzeugungs-, Speicher-, Verteilungs- sowie Übergabesysteme, dient in Anlehnung an die DIN V 4701-10 (vgl. [85] S. 15 ff.) der energetischen Bewertung der unsanierten und sanierten Gebäude nach DIN V 18599 [23]. Zum Vergleich der Heizanlagen und -systeme erfolgt eine Unterscheidung nach Wärmeerzeugung und -verteilung. Die Entwicklung vom Primär- ( $Q_p$ ) zum Nutzenergiebedarf ( $Q_b$ ) wird aufgezeigt, und die Erzeugungs- ( $Q_{h,g}$ ), Speicher- ( $Q_{h,s}$ ), Verteil- ( $Q_{h,d}$ ) sowie Übergabeverluste in den unterschiedlichen Heizungssystemen werden betrachtet. Die stichprobenartige Messung von Vor- und Rücklauftemperaturen einzelner Verteilkreise vor und nach der Sanierung erfasst das Zeitprofil des Betriebs von Wärmeerzeugungsanlagen.

#### 3.3.2 Warmwasserbereitung

Die Aufnahme von Anlagen zur Warmwasserbereitung für die Sanitärbereiche in den Schulen und angrenzenden Sporthallen stellt einen weiteren Arbeitspunkt innerhalb der technischen Gebäudeausrüstung dar.

#### 3.3.3 Raumluftechnische Anlagen

Die Untersuchung bewertet den Betrieb raumluftechnischer Anlagen nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 7) anhand des geforderten Mindestaußenluftvolumenstroms ( $\dot{V}_e$ ) und der Integration wärmerückgewinnender Systeme (WRG). Die Bewertung der Anlagen erfolgt nach DIN EN 13779 (vgl. [73] Anh. D) und ermittelt die spezifische Ventilatorleistung der raumluftechnischen Anlagen anhand der Ventilatornennleistung ( $p_{sf} + p_{ef}$ ) sowie des maximalen Auslegungsluftvolumenstroms ( $\dot{V}_{max}$ ) (Formel 13).

$$[13] \quad p_{fan} = p_{mains} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_m \cdot \eta_c \quad [W]$$

$p_{fan}$ : Wellenleistung des Ventilators [W]  
 $p_{mains}$ : Wirkleistung aus dem Versorgungsnetz [W]  
 $\eta_{tr}$ : Wirkungsgrad der mechanischen Kraftübertragung [-]  
 $\eta_m$ : Wirkungsgrad des Elektromotors [-]  
 $\eta_c$ : Wirkungsgrad der Steuer- und Regelverluste [-]

Die sich auf den Auslegungsluftvolumenstrom beziehende spezifische Ventilatorleistung ( $p_{SFP}$ ) der RLT-Anlagen wird nach Formel 14 berechnet und ermöglicht einen gebäudebezogenen Vergleich der installierten Lüftungsanlagen sowie eine Bewertung anhand der SFP-Klassen nach DIN EN 13779 (vgl. [73] S. 64 f.).

$$[14] \quad p_{SFP} = \frac{P_{sf} + P_{ef}}{q_{max}} \quad [W \cdot m^{-3} \cdot h]$$

$p_{SFP}$ : erforderliche spezifische Ventilatorleistung [W]  
 $p_{sf}$ : die Gesamtleistung der Zuluftventilatoren bei Auslegungsvolumenstrom [W]  
 $p_{ef}$ : die Gesamtleistung der Abluftventilatoren bei Auslegungsvolumenstrom [W]  
 $q_{max}$ : Auslegungsluftvolumenstrom innerhalb des Gebäudes [m<sup>3</sup>/h]

Die Auslegung des maximal zu fördernden Luftvolumens der raumluftechnischen Anlagen in den Schulgebäuden geschieht personenbezogen mit einem Mindestaußenluftvolumenstrom ( $V_{min}$ ) von 30 m<sup>3</sup>/(Person•h) nach Anforderung der DIN 18599-10 (vgl. [23] Teil 10). Der personenbezogene Außenluftvolumenstrom ( $\dot{V}_A$ ) bildet den Quotient aus dem Auslegungsluftvolumenstrom ( $\dot{V}_{max}$ ) der RLT-Anlagen sowie der sich im Gebäude befindenden Nutzer.

Die energetische Bewertung der installierten RLT-Anlagen stellt die reduzierten Lüftungswärmeverluste ( $Q_{V,e}$ ) dem Betriebsstrombedarf ( $Q_{Strom,t}$ ) gegenüber. Die Lüftungswärmeverluste ergeben sich aus den messtechnisch erfassten Innen- ( $\theta_{i,ar}$ ) und Außenlufttemperaturen ( $\theta_{e,ar}$ ), den ausgelegten Luftvolumenströmen ( $\dot{V}_a$ ) sowie den Betriebszeiten der Anlagen ( $t$ ) und dem thermischen Wirkungsgrad der wärmerückgewinnenden Systeme ( $\eta_{WRG}$ ). Der Strombedarf zum Betrieb der RLT-Anlagen ergibt sich aus der Nennleistung der Motoren ( $p$ ) sowie den Betriebszeiten. Die DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 10) setzt Nutzungszeiten der Schulen fest. Der Mindestaußenluftvolumenstrom ( $\dot{V}_{min,A}$ ) entspricht den ausgelegten Volumenströmen der An-

lagen in den Schulen (vgl. Kap. 5.1.2.1). Tabelle 11 zeigt die Parameter des Berechnungsmodells sowie die Randbedingungen zur energetischen Bewertung von raumluftechnischen Anlagen.

**Tabelle 11** Parameter des Berechnungsmodells sowie Randbedingungen zur energetischen Bewertung der RLT-Anlagen

Außenluftvolumenstrom ( $\dot{V}_a$ )	ermittelter ausgelegter Luftvolumenstrom (Abbildung 41)
Personen im Klassenraum (n)	aus der Belegung der Referenzräume dokumentiert (Kapitel 4.1.3)
betrachteter Zeitraum (t)	Nutzungszeit: 7 h/d; 200 d/a nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 10)
thermische Bedingungen	gemessene Temperaturen der Innenraum- ( $\theta_{i,ar}$ ) sowie Außenluft ( $\theta_{e,ar}$ )
Wärmerückgewinnung ( $\eta_{WRG}$ )	mittlere Wärmerückgewinnungszahl 0,75 [-] ( $\eta_{WRG}$ )
Nennleistung der Motoren (p)	anhand von Datenblättern der jeweiligen Lüftungsanlage (Kapitel 5.1.2.1)

Die primärenergetische Bewertung des Betriebs raumluftechnischer Anlagen stellt den Betriebsstrombedarf den reduzierten Lüftungswärmeverlusten in Abhängigkeit zu den eingesetzten Energieträgern der Wärmeproduktion gegenüber. Die Verwendung unterschiedlicher Energieträger zur Beheizung der Gebäude führt zu einer primärenergetischen Bewertung des Anlagenbetriebs. Innerhalb der Betrachtung geschieht der Strombezug konventionell aus dem öffentlichen Netz ( $f_p = 2,6$ ).

### 3.3.4 Berechnung der Norm-Heizlast

Die Berechnung der Norm-Heizlast erfolgt anhand der DIN EN 12831. Die Norm beschreibt die Norm-Heizlast ( $\Phi_{HL,i}$ ) als benötigten Wärmestrom ( $\Phi$ ), um die geforderten Solltemperaturen ( $\theta_{i,soll}$ ) in den Gebäuden bei minimaler Normaußentemperatur ( $\theta_e$ ) einzuhalten (vgl. [86] S. 7). Die Norm-Heizlast setzt sich aus den Transmissions- ( $\Phi_{T,i}$ ) und Lüftungswärmeverlusten ( $\Phi_{V,i}$ ) sowie der nötigen Aufheizleistung ( $\Phi_{RH,i}$ ) der Gebäude zusammen. Die Lüftungswärmeverluste differenzieren sich nach Verlusten aufgrund von Infiltration ( $\Phi_{inf,i}$ ) sowie zur Einhaltung des geforderten Mindestaußenluftvolumenstroms ( $\Phi_{min,i}$ ) nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 10).

$$[15] \quad \Phi_{HL,i} = (\Phi_{T,i} + \Phi_{inf,i} + \Phi_{min,i} + \Phi_{RH,i}) / A_i \quad [\text{W/m}^2]$$

$$\Phi_{T,i}: \quad \text{Norm-Transmissionswärmeverlust} \quad [\text{W}]$$

$$\Phi_{inf,i}: \quad \text{Norm-Lüftungswärmeverlust (Infiltration)} \quad [\text{W}]$$

$$\Phi_{min,i}: \quad \text{Norm-Lüftungswärmeverlust (Mindestaußenluftwechsel)} \quad [\text{W}]$$

$$\Phi_{RH,i}: \quad \text{Aufheizleistung} \quad [\text{W}]$$

$$A_i: \quad \text{thermisch konditionierte Nettogrundfläche} \quad [\text{m}^2]$$

Die Bewertung stellt die Heizlast der unsanierten und sanierten Gebäude nach DIN EN 12831 [86] gegenüber. Die Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes ( $H_T$ ), eine höhere Gebäudedichtheit ( $n_{50}$ ) sowie der Einsatz von raumluftechnischen Anlagen mit wärmerückgewinnenden Systemen führt zur Reduzierung der Norm-Heizlast ( $\Phi_{HL,i}$ ) durch die Sanierung.

### 3.3.5 Beleuchtungsanlagen

Die unterschiedlichen Beleuchtungsarten sowie die installierten Beleuchtungsleistungen ( $p$ ) werden in jeweils zwei Referenzräumen pro Schulgebäude erfasst und den Bewertungsleistungen ( $p_j$ ) nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 4) gegenübergestellt. Die Norm beschreibt ein Tabellenverfahren zur Ermittlung der Beleuchtungsleistung ( $p_j$ ) (Formel 16).

[16]	$p_j$	=	$p_{j,lx} \cdot \bar{E}_m \cdot k_{WF} \cdot k_A \cdot k_L \cdot k_R$	[W/m <sup>2</sup> ]
	$p_j$ :		spezifische elektrische Beleuchtungsleistung	[W/m <sup>2</sup> ]
	$p_{j,lx}$ :		spezifische elektrische Bewertungsleistung	[W/(m <sup>2</sup> •lx)]
	$\bar{E}_m$ :		Wartungswert der Beleuchtungsstärke nach V 18599-10	[lx]
	$k_{WF}$ :		Anpassungsfaktor: Wartungsfaktor = 0,67	[-]
	$k_A$ :		Minderungsfaktor: Bereich der Sehaufgabe	[-]
	$k_L$ :		Anpassungsfaktor für nicht stabförmige Leuchtstofflampen	[-]
	$k_R$	:	Anpassungsfaktor des betrachteten Raums	[-]

Das Verfahren berechnet den Strombedarf zur Beleuchtung von Räumen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Beleuchtungs- und einsetzbarer Lampenarten anhand des Anpassungsfaktors  $k_L$ . Das Tabellenverfahren berücksichtigt den Tageslichtbereich der Räume nicht. Der Anpassungsfaktor steht in Abhängigkeit zum Raumindex ( $k$ ), der aus den Raumgeometrien sowie aus der Höhendifferenz zwischen Leuchten- ( $h_{LE}$ ) und Nutzebene ( $h_{NE}$ ) resultiert. Die Höhe der Nutzebene ( $h_{NE}$ ) über der Fußbodenoberkante beträgt in Schulen 80 cm. Die Beleuchtungsarten haben aufgrund voneinander abweichender Abhanghöhe einen Einfluss auf den Raumindex ( $k$ ), der nach Formel 17 ermittelt wird.

$$[17] \quad k = \frac{a_R \cdot b_R}{h'_R \cdot (b_R + a_R)} \quad [-]$$

$a_R$  : Raumtiefe [m]  
 $b_R$  : Raumbreite [m]  
 $h'_R$  : Differenz aus den Höhen der Leuchten- und Nutzenebene [m]

Der Wartungswert  $\bar{E}_m$  der Beleuchtungsstärke in Klassenräumen wird nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 4) mit 300 lx angesetzt.

Die Untersuchung bewertet, neben dem Einbau von Leuchtstofflampen mit EVG, den Einsatz von Beleuchtungsanlagen mit LED-Technik. Die Betrachtung der unterschiedlichen Beleuchtungsszenarien deckt Einsparpotenziale durch den Einsatz von Komponenten zur Steuerung der Beleuchtungsanlagen auf und bewertet die Integration tageslichtabhängiger Sensoren und Präsenzmelder in die Lichtkonzepte nach DIN V 18599-4 (vgl. [23] Teil 4).

### 3.4 Dokumentation des Energieverbrauchs

Der Energieverbrauch der untersuchten Gebäude wird in Wärme- und Stromverbrauch differenziert. Die dokumentierten Verbrauchswerte der Schulen resultieren aus den Verbrauchsdaten der letzten drei Jahre vor Sanierungsbeginn sowie der auf die Sanierung folgenden zwei Jahre. Es erfolgt eine Witterungsbereinigung der Heizwärmeverbräuche (vgl. [57] S. 12) nach § 19 der EnEV 2014 [8] zur plausiblen Gegenüberstellung. Untersuchungsschwerpunkt bilden die Abhängigkeit des Wärmeverbrauchs zur Gebäudekompaktheit ( $A/V_e$ ) und der Jahresstromverbrauch je Schulform.

Ein Abgleich der ermittelten Jahresverbräuche der Schulgebäude aus der Feldstudie mit Jahresverbräuchen von vergleichbaren Schulgebäuden verstärkt die Aussagekraft der gewonnenen Erkenntnisse der Untersuchungen. Eine Gegenüberstellung der dokumentierten Verbräuche mit den EnEV-Verbrauchskennwerten (vgl. [57] S. 22 ff.) verifiziert die Plausibilität der Ergebnisse.

Die gemittelten Wärme- ( $Q_{h,t}$ ) und Stromverbräuche ( $Q_{Strom,t}$ ) der untersuchten Bildungsstätten werden mittels der Primärenergiefaktoren ( $f_p$ ) (vgl. [23] Teil 1) und CO<sub>2</sub>-Äquivalente (vgl. [55] Vers. 4.5) der eingesetzten Energieträger bewertet. Die Primärenergiefaktoren ( $f_p$ ) sowie die CO<sub>2</sub>-Äquivalente dienen zur Ermittlung des Primärenergiebedarfs bzw. -verbrauchs sowie zur Berechnung der Kohlendioxidemission durch den Gebäudebetrieb. Mittels dieser Parameter erfolgt eine Gegenüberstellung und Bewertung der Wärmeversorgungskonzepte der Gebäude aus ökologischer Sicht (Tabelle 12).

**Tabelle 12** Anzahl und Primärenergiefaktoren ( $f_P$ ) [23] sowie CO<sub>2</sub>-Äquivalente [55] der verwendeten Energieträger zur Beheizung der Bildungsstätten

Energieträger	Gas	Fernwärme	Öl	Strom
Anzahl der Schulen [-]	10	5	1	1
$f_P$ [-]	1,1	0,7	1,1	2,6
CO <sub>2</sub> -Äquiv. [g <sub>CO2</sub> /kWh]	210–263	219	302	633

### 3.5 Abgleich des Energieverbrauchs mit dem Energiebedarf

Die Durchführung eines Bedarf-Verbrauch-Abgleichs ermöglicht die Aussage über die Prognosesicherheit der verwendeten Berechnungsmethoden nach DIN V 18599 [23]. Aus dem Vergleich der Bedarfs- und Verbrauchswerte vor und nach den Sanierungsmaßnahmen resultiert eine Gegenüberstellung von berechneter und tatsächlicher Energieeinsparung. Eine Angleichung der ermittelten Bedarfs- mit den dokumentierten Verbrauchswerten ermöglicht die exakte Ermittlung der tatsächlich reduzierten Energiemengen und eine getrennte Bewertung der energetischen Einzelmaßnahmen, wie z.B. die Dämmung von Dächern oder der Betrieb raumluftechnischer Anlagen. Die Ermittlung der tatsächlich reduzierten Energiemengen plausibilisieren die Ergebnisse der ökonomischen Bewertung.

### 3.6 Feststellung der Bauwerks- und Baunebenkosten

Die Feststellung der Bauwerks- und Baunebenkosten erfolgt anhand der DIN 276 „Kosten im Hochbau“ [63]. Die Norm dient zur Aufstellung eines Kostenrahmens sowie der Kostenverfolgung von Neubau- oder Umbaumaßnahmen. Die DIN 276 gliedert die Kosten in sieben Kostengruppen erster Ebene sowie zur detaillierteren Erfassung bis in die dritte Ebene auf und ermöglicht einen Gebäudevergleich (vgl. [63] S.10 ff.). Die Aufteilung der Gesamtkosten in Kostengruppen stellt hierbei eine Ordnungsstruktur dar. Die DIN 276 ordnet die Baukosten der Sanierungsmaßnahmen der Kostengruppe 300 (Bauwerk – Baukonstruktion), 400 (Bauwerk – Technische Anlagen) sowie 700 (Baunebenkosten) zu. Die Kostengruppen 300 und 400 bilden zusammen die „Bauwerkskosten“ (Abbildung 12).



**Abbildung 12** Auszug aus der Aufstellung der Kostengruppen erster Ebene nach DIN 276 [63]

Die Gesamtkosten werden in Bauwerks- und Baunebenkosten getrennt, um eine Bewertung der energetischen Sanierungsmaßnahmen durchzuführen.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Sanierungsmaßnahmen differenziert die Investitionskosten ( $IK$ ) in energetische Kosten, Instandhaltungskosten und Baunebenkosten. Die energetischen Kosten sind dem Erweiterungsbedarf zuzuordnen (vgl. [20] S. 190) und tragen mit der Sanierung von Bauteilen und der Installation anlagentechnischer Systeme zur Veränderung des Energieverbrauchs bei. Die Instandhaltungskosten entsprechen dem Ersatz- bzw. Nachholbedarf.

Die Feststellung der Bauwerks- und Baunebenkosten basiert auf Schlussrechnungen sowie Auszügen der Kostenverfolgung. Die dokumentierten Kosten beinhalten alle Positionen, die zur nutzungsbestimmten und einwandfreien Verwendung erforderlich sind<sup>12</sup>. Alle Kosten sind Bruttopreise und beinhalten Lohnstunden und eventuelle Nachträge.

### 3.7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung führt dynamische Verfahren zur Berechnung der ökonomischen Wirtschaftlichkeit sowie statische Verfahren zur ökologischen Betrachtung durch. Die Ermittlung von kapitalgebundenen Kosten ( $K_{N,K}$ ) der energetischen Einzel- und Gesamtmaßnahmen nach VDI 2067 (vgl. [11] S. 7 ff.) berücksichtigt die Nutzungsdauer ( $T_N$ ), die Restwerte ( $R_w$ ) der Einzelmaßnahmen sowie die Ersatzbeschaffungen ( $B_{Ersatz}$ ) der einzelnen Bauteile und anlagentechnischen Systeme. Die VDI 2067-1 (vgl. [11] Anh. 1) sowie das BBR [87] setzt die Nutzungszeiten der Einzelmaßnahmen fest. Der Kapitalzinssatz ( $q$ ) findet mit einem dynamischen Einfluss von jährlich 1,5 %<sup>13</sup> Berücksichtigung.

Der Ansatz einheitlicher Energiepreise ermöglicht die gebäude- und gewerkebezogene Vergleichbarkeit. Tabelle 13 zeigt die angesetzten Energiekosten, Tabelle 14 zeigt die Parameter zur dynamischen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der energetischen Sanierungsmaßnahmen.

---

<sup>12</sup> Hier werden z.B. nicht nur die Kosten der Dämmmaßnahmen an sich, sondern das gesamte Gewerk zur Erstellung von z.B. Außenwänden betrachtet.

<sup>13</sup> Der Kapitalzins von 1,5 % wurde zusammen mit der dena (Deutsche Energie Agentur) abgestimmt und entspricht vergleichbaren Kapitalzinssätzen ( $q$ ) aus Förderprogrammen der KfW-Bank.

**Tabelle 13** angesetzte Energiekosten

Energieträger	Einheitspreis
Fernwärme	0,06 €/kWh
Erdgas	0,07 €/kWh
Öl	0,07 €/kWh
Holzpellets	0,05 €/kWh
Strom	0,19 €/kWh
Einspeisevergütung (Strom)	0,12 €/kWh

**Tabelle 14** Parameter der ökonomischen Bewertung

Parameter	Wert
Kapitalzinsen	1,5 % p.a.
Energiepreissteigerung	3,5 und 5,5 % p.a.
Inflation	2 % p.a.
Nutzungsdauer (Anlagen)	Anlehnung an VDI 2067 [11]
Nutzungsdauer (Bauteile)	Anlehnung an BBR [87]

Die ökonomische Wirtschaftlichkeitsbetrachtung berücksichtigt jährliche Preisänderungen ( $r$ ) aufgrund von Inflation und Energiepreissteigerung ( $q$ ) von 3,5 % und 5,5 %. Der Betrachtungszeitraum ( $T$ ) beträgt 20 Jahre. Die Arbeit wendet folgende dynamische Verfahren zur ökonomischen Bewertung der Sanierungsmaßnahmen an.

### 3.7.1 Veränderung der Jahresgesamtkosten

Aus der Gegenüberstellung des sanierten Zustands mit den unsanierten Bestandsgebäuden resultiert eine Veränderung der Jahresgesamtkosten. Die Annuitätenmethode nach VDI 2067 (vgl. [11] S. 7 ff.) ermittelt unter Berücksichtigung der Kapitalzinsen ( $q$ ), Nutzungszeiten ( $T_N$ ), Restwerten ( $R_W$ ) und Ersatzbeschaffungen ( $B_{Ersatz}$ ) aus den einmalig anfallenden Bauwerkskosten die kapitalbezogenen Kosten ( $K_{N,K}$ ). Den kapitalgebundenen Kosten ( $K_{N,K}$ ) werden reduzierten betriebs- ( $K_{N,V}$ ) und bedarfsgebundenen Kosten ( $K_{N,B}$ ) gegenübergestellt (vgl. [11] S. 7 ff.). Anhand der Methode werden Veränderungen der Jahresgesamtkosten durch die Umsetzung der energetischen Sanierungsmaßnahmen aufgezeigt (vgl. Kap. 2.8.2.1).

### 3.7.2 Amortisationszeiten

Die Gegenüberstellung von veränderten Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) und Bauwerkskosten führt zur Ermittlung der Amortisationszeiten der energetischen Einzel- und Gesamtsanierungsmaßnahmen. Die Amortisationszeit zeigt den Zeitraum auf, in dem sich die Bauwerkskosten durch die reduzierten bedarfsgebundenen Kosten ( $K_{N,B}$ ) des jeweiligen Bauteils oder der technischen Anlage decken (vgl. Kap. 2.8.1.1)

### 3.7.3 Äquivalenter Energiepreis

Die ökonomische Bewertung anhand der Methode des äquivalenten Energiepreises stellt das Verhältnis dar, wie gering die Kosten für eine reduzierte Energiemenge sein müssen, damit sich eine Maßnahme als wirtschaftlich darstellt. Die Methode stellt den kapitalgebundenen

Kosten ( $K_{N,K}$ ) die im Betrachtungszeitraum reduzierten Energiemengen ( $Q_i$ ) gegenüber, um den äquivalenten Einheitspreis zu ermitteln (vgl. Kap. 2.8.2.2).

### 3.7.4 Ökologische Wirtschaftlichkeit

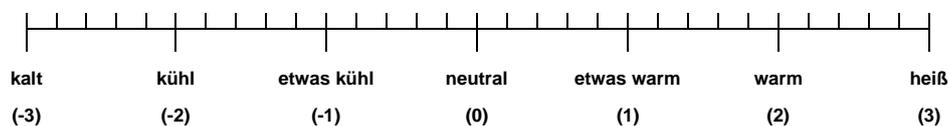
Die ökologische Wirtschaftlichkeit stellt sich vor dem Hintergrund der Klimaschutzziele der Bundesregierung [1], [2], [3] als einen weiteren Bewertungsschwerpunkt von Sanierungsmaßnahmen dar.

Die ökologische Wirtschaftlichkeit bewertet die Sanierungsmaßnahmen anhand der Reduzierung des Primärenergieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emission durch den sanierten Gebäudebetrieb. Sie stellt den kapitalgebundenen Kosten ( $K_{N,K}$ ) die reduzierten Schadstoffemissionen sowie den verringerten Primärenergieverbrauch gegenüber. Die Bewertung der ökologischen Wirtschaftlichkeit erfolgt anhand des statischen Verfahrens des Preis-Leistungs-Verhältnisses (PLV) (vgl. Kap. 2.8.1.2)

## 3.8 Untersuchung zur Nutzerakzeptanz

Die Bewertung des unsanierten Gebäudezustands erfolgt durch ein subjektives Nutzervotum mittels Fragebögen (vgl. Kap. 13.2). Die Methode gibt einen Überblick der vor der Sanierung vorliegenden Bedingungen und bindet die Nutzer in die Forschungsarbeit ein. Das mittlere Votum (Mittelwert aller Antworten je gestellte Frage) bildet das Ergebnis der Umfrage des jeweiligen Schulgebäudes.

Die Methode der zweipoligen Punkteskala nach DIN EN ISO 10551 sieht eine siebenteilige Aufschlüsselung der Ergebnisse aus der Befragung vor (vgl. [88] S. 6 f.). Abbildung 13 zeigt die Punkteskala am Beispiel des thermischen Komforts. Zur Differenzierung der Jahreszeiten beziehen sich die Fragen auf die Heizperiode im Winter bzw. auf den Nicht-Heizbetrieb im Sommer.



**Abbildung 13** Zweipolige Skala zur Bewertung des unsanierten Zustands (am Beispiel des thermischen Komforts) nach DIN EN ISO 10551 [88]

Die Befragung beinhaltet, neben den Themen der thermischen und hygrischen Behaglichkeit im Sommer und Winter, die hygienische und visuelle Qualität sowie die Regulierbarkeit der Komfortparameter durch den Nutzer auf Raumebene.

Die Schulen sollen den Nutzern ein optimales Lehr- und Lernumfeld zur Verfügung stellen und einen Eingriff in die Regelung der Komfortparameter ermöglichen. Die Umfrage ermittelt die Regulierbarkeit der Lufttemperatur, der Kunstlichtversorgung und des Sonnen-/Blendschutzes sowie die Zufuhr von Frischluft in die Klassenräume.

In weiteren Arbeitsschritten wird ein identischer Fragebogen während des sanierten Gebäudebetriebs erneut an die Lehrer verteilt. Anhand der Gegenüberstellung der Umfrageergebnisse können die Zustände des unsanierten sowie sanierten Gebäudezustands verglichen werden. Eine Verbesserung der Innenraumqualität sowie der Nutzerakzeptanz durch die energetische Sanierung kann anhand der Gegenüberstellung aufgezeigt werden.

Die Untersuchung korreliert das Nutzervotum zu gemessenen Lufttemperaturen ( $\theta_i$ ) und Luftfechtigkeiten ( $\varphi$ ) im Sommer und Winter mit der Qualität des baulichen Wärmeschutzes und zeigt eine mögliche Verbesserung des thermischen und hygrischen Innenraumkomforts auf. Die Gegenüberstellung hinterfragt zudem die Verbesserung der Tages- und Kunstlichtversorgung sowie der hygienischen Raumluftqualität.

### **3.9 Bewertung des Innenraumkomforts**

Die messtechnische Überprüfung des Komforts erfolgt in je zwei Klassenräumen pro sanierter Schule über mindestens ein Jahr anhand stündlicher Mittelwerte. Messparameter sind die Lufttemperatur ( $\theta_{i,ar}$ ) und Luftfeuchtigkeit ( $\varphi_{i,ar}$ ). Die Messpunkte befinden sich auf einer Höhe von 1,10 m (Kopfhöhe im Sitzen) an den Innenwänden und sind weder solarer Strahlung noch einem Luftzug über die Fassade ausgesetzt. Der Bewertungszeitraum entspricht der Nutzungszeit der Schulen von 8 bis 15 Uhr (7 h/d) und schließt Wochenenden und bundeslandbezogene Feiertage sowie Ferienzeiten aus der Betrachtung aus. Die jährliche Nutzung beläuft sich auf 200 d/a.

Die Messung der Kohlendioxidkonzentration ( $C_{CO_2}$ ) in der Klassenraumluft ermöglicht die Bewertung der hygienischen Luftqualität. Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgt im Zeitraum einiger Wochen stichprobenartig.

Folgende Komfortmodelle bewerten die Innenraumqualität anhand des thermischen und hygrischen Komforts sowie der hygienischen Luftqualität.

### 3.9.1 Thermischer Komfort

Die Arbeit bewertet den thermischen Komfort in den Schulen während der Nutzungszeit anhand unterschiedlicher Normen.

#### 3.9.1.1 Bewertung des thermischen Komforts nach DIN 4108-2 und VDI 6040

Die DIN 4108-2 (vgl. [48] Abs. 8) bewertet den Innenraumkomfort anhand des Parameters der Übertemperaturgradstunden. Der Grenzwert beträgt für Nichtwohngebäude 500 Kh/a (tägliche Nutzungszeit: 7 bis 18 Uhr). Die geringere Tagesnutzungszeit von Schulen führt zur Reduzierung des Grenzwertes auf 254 Kh/a.

Die VDI 6040 (vgl. [12] S. 3) bewertet den thermischen Komfort als „gut“ (Kat. I), wenn die operative Raumtemperatur 20 bis 26 °C beträgt. Die Wahl der Messpunkte verhindert eine direkte Sonneneinstrahlung und legitimiert die Gleichsetzung der operativen Temperatur ( $\theta_{op,i}$ ) mit der Lufttemperatur ( $\theta_{ar,i}$ ) in dieser Betrachtung. Lufttemperaturen ( $\theta_{i,ar}$ ) > 26 °C entsprechen einer Überhitzung (Kat. III+) und Lufttemperaturen ( $\theta_{i,ar}$ ) < 20 °C einer Unterkühlung (Kat. III-). Die Bewertung geschieht unabhängig von der Außenlufttemperatur (vgl. Kap. 2.10.1.2 und 2.10.1.3).

#### 3.9.1.2 Bewertung des thermischen Komforts während der Heizperiode

Die DIN EN ISO 7730 (vgl. [69] S. 21) bewertet den thermischen Komfort während der Heizperiode unabhängig von der Außenlufttemperatur und teilt die gemessenen Innenraumlufttemperaturen ( $\theta_{i,ar}$ ) in sieben Kategorien von IV- (zu kalt) bis IV+ (zu warm) ein. Der optimale thermische Komfort entspricht der Kategorie I (neutral). Die Gegenüberstellung des subjektiven Empfindens der Nutzer mit den gemessenen Temperaturen bedingt eine detailliertere Bewertung des Komforts. Die DIN EN ISO 7730 (vgl. [69] S. 21) und die DIN EN ISO 10551 (vgl. [88] S. 6 f.) klassifizieren den thermischen Komfort sowie die Nutzerbefragung nach folgenden Kategorien. Tabelle 15 zeigt die Bewertungskategorien des Komforts während der Heizperiode.

**Tabelle 15** Bewertungskategorien des thermischen Komforts während der Heizperiode nach DIN EN ISO 7730 [69]

Kategorie	IV- (zu kalt)	III- (kalt)	II- (kühl)	I (neutral)	II+ (wärmer)	III+ (warm)	IV+ (zu warm)
Temperaturbereich	< 19 °C	19–20 °C	20–21 °C	21–23 °C	23–24 °C	24–25 °C	> 25 °C
Nutzervotum	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

### 3.9.1.3 Betrachtung der Nicht-Heizperiode

Die DIN EN 15251 [68] bewertet den thermischen Komfort in den Klassenräumen außerhalb der Heizperiode. Die Norm teilt den Komfortbereich ebenfalls in sieben Kategorien ein, die mit der Kategorisierung nach DIN EN ISO 773 (vgl. [69] S. 21) vergleichbar sind. Die Abgrenzung der Kategorien sowie die Bewertung des Komforts erfolgt in Abhängigkeit zum gleitenden Mittel der Außentemperatur ( $\theta_{rm}$ ). Die Betrachtung stellt die gemessenen Raumlufttemperaturen ( $\theta_{i,ar}$ ) den Nutzerbefragungen in der Nicht-Heizperiode gegenüber (vgl. Kap. 2.10.1.4).

### 3.9.1.4 Leistungsfähigkeit von Personen bei veränderter Lufttemperatur

Eine optimale Lufttemperatur ( $\theta_{ar}$ ) führt nach Seppänen et al. (vgl. [38] S. 6ff.) zu einer Leistungssteigerung ( $P$ ) der Gebäudenutzer. Anhand einer optimalen Lufttemperatur ( $\theta_{ar}$ ) muss sich der menschliche Körper nicht an die thermische Umgebung anpassen, was zu einem Abruf von größeren Leistungsreserven zum Lernen führen kann. Die Messung der Lufttemperaturen in den Klassenräumen ( $\theta_{i,ar}$ ) ermöglicht die getrennte Bewertung nach Heizperiode und Nicht-Heizperiode. Anhand der Minimal-, Jahresdurchschnitts- sowie Maximaltemperaturen kann die Leistungsfähigkeit ( $P$ ) der sich im Raum befindenden Personen abgeleitet werden (vgl. Kap. 2.10.1).

## 3.9.2 Hygrischer Komfort

Die DIN EN 15251 [68] ermöglicht die Bewertung des hygrischen Komforts in den Innenräumen anhand von sieben Kategorien. Die Grenzwerte der DIN EN 15251 (vgl. [68] S. 36) sowie die ASR 3.6 (vgl. [64] S. 6) („Schwülkurve“) sind vergleichbar. Tabelle 16 zeigt die Kategorien des hygrischen Komforts nach DIN EN 15251 [68]

**Tabelle 16** Kategorien des hygrischen Komforts nach DIN EN 15251 [68]

Kategorie	IV- (zu trocken)	III- (trocken)	II- (etwas trocken)	I (neutral)	II+ (etwas feucht)	III+ (feucht)	IV+ (zu feucht)
<b>Luftfeuchte</b>	< 20 %	20–25 %	25–30 %	30–50 %	50–60 %	60–70 %	> 70 %
<b>Nutzervotum</b>	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

Die Bewertung des hygrischen Komforts differenziert nicht den Heizbetrieb von der Nicht-Heizperiode. Der Vergleich der gemessenen Raumluftfeuchtigkeit ( $\varphi_{i,ar}$ ) mit dem Nutzervotum stellt die objektive Bewertung anhand der Messungen dem subjektiven Nutzerempfinden gegenüber (vgl. Kap. 2.10.2).

### 3.9.3 Hygienischer Komfort

Die VDI 6040 (vgl. [12] S. 4) beschreibt den hygienischen Komfort anhand des Parameters der CO<sub>2</sub>-Konzentration ( $C_{CO_2}$ ) in der Raumluft und teilt die Qualität der Raumluft in drei Kategorien ein. Die Messung der CO<sub>2</sub>-Konzentration ( $C_{CO_2}$ ) in fünfminütigen Intervallen innerhalb eines Zeitraums von mehreren Wochen ermöglicht die Bewertung des hygienischen Komforts in den Klassenräumen anhand von 45-minütigen Mittelwerten (Unterrichtsstunde) nach VDI 6040.

Die Bewertung des Betriebs raumluftechnischer Anlagen sowie der natürlichen Belüftung von Klassenräumen erfolgt anhand der gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Raumluft und vor dem Hintergrund der Leistungsfähigkeit und dem Anteil unzufriedener Gebäudenutzer. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration ( $C_{CO_2}$ ) in der Raumluft hat nach Wargocki (vgl. [13] S. 4 ff.) Einfluss auf die Leistungsfähigkeit ( $P$ ) der sich im Raum befindenden Personen sowie den Anteil Unzufriedener nach Olesen (vgl. [71] S. 6 f.; Kap. 2.10.3). Diese Abhängigkeit wird untersucht.

## 4 ERGEBNISSE AUS DER ANALYSE DES GEBÄUDEBESTANDS

### 4.1 Flächen- und Volumenermittlung

#### 4.1.1 Grundflächen und Raumvolumen nach DIN 277

Die Nutzfläche (NF) der Gebäude weist einen durchschnittlichen Anteil von 71 % der Nettogrundfläche (NGF) auf. Die Verkehrsfläche (VF) dient zur Erschließung der Räume und wird nicht der NF zugeordnet. Die Schulen weisen einen durchschnittlichen Anteil von 27 % an der NGF auf. Die hohen Abweichungen der NF zur NGF sowie VF zur NGF sind auf die unterschiedlichen Schul- und Organisationsformen sowie Errichtungszeiträume der Schulgebäude zurückzuführen.

Die Technikfläche (TF) beschreibt die Aufstellfläche für betriebstechnische Anlagen (Beheizung, Belüftung etc.). Die Flächen, die zur Verteilung und Übergabe der Medien benötigt werden, gehören nicht in diese Kategorie. Die TF beträgt durchschnittlich 3 % der NGF.

Die Wärmeerzeugungsanlagen der Bildungsstätten befinden sich z.T. in Heizhäusern oder Technikzentralen außerhalb der Gebäude. Diese Aufstellflächen werden innerhalb der Untersuchung nicht berücksichtigt. Tabelle 17 zeigt die Aufteilung der Nutz-, Verkehrs- und Technikflächen der untersuchten Schulgebäude nach DIN 277 [74]

**Tabelle 17** Aufteilung der Nutz-, Verkehrs- und Technikflächen der Schulgebäude nach DIN 277 [74]

Verhältnis	NF/NGF	VF/NGF	TF/NGF
Minimum	60 %	19 %	1 %
<b>Mittelwert</b>	<b>71 %</b>	<b>27 %</b>	<b>3 %</b>
Maximum	81 %	38 %	6 %

Die Konstruktionsfläche (KF) definiert die Grundfläche der aufgehenden Bauteile und stellt den Anteil der Flächen dar, die auf die Konstruktion des Gebäudes entfallen. Sie bildet die Differenz von BGF und NGF.

Die Schulgebäude weisen ein durchschnittliches NGF-BGF-Verhältnis von 0,83 [-] auf. Die flächenbezogene Verteilung kann auf den Nettorauminhalt (NRI) und Bruttonrauminhalt (BRI) übertragen werden. Diesem Vergleich liegt eine detailliertere Erfassung des Gebäudes zugrunde. Die volumenbezogene Ermittlung berücksichtigt, neben den konstruktiven Wandaufbauten und Stützen, die Geschossdecken, Dächer und Fußböden. Das durchschnittliche NRI-BRI-Verhältnis der Schulen beträgt 0,77 [-].

#### 4.1.2 Qualität der Sichtverbindungen (visueller Komfort)

Die durchschnittliche NGF aller erfassten Klassenräume beträgt  $65,2 \text{ m}^2_{\text{NGF}}$ . Diese Klassenraum-Grundfläche ist für Schulen, die nach dem Zweiten Weltkrieg errichtet wurden, typisch. Eine Veränderung der Klassenraumgröße in Abhängigkeit zum Erbauungsjahr der jeweiligen Schulgebäude besteht nicht.

Die untersuchten Fassaden unterscheiden sich in Loch- und Bandfassade. In den Gebäuden mit Lochfassaden beträgt der Mittelwert des  $A_{\text{FE}}/A_{\text{NGF}}$ -Verhältnisses in Klassenräumen 22 %. Einige Räume erfüllen die Anforderungen der Arbeitsstättenrichtlinie ASR 7/1 (vgl. [75] S. 1 f.) nicht. Die Schulgebäude mit Band- bzw. Skelettfassaden weisen ein durchschnittlich höheres  $A_{\text{FE}}/A_{\text{NGF}}$ -Verhältnis von 31 % auf. Diese Räume halten die Anforderungen der Richtlinie ASR 7/1 ausnahmslos ein (Tabelle 18).

**Tabelle 18**  $A_{\text{FE}}/A_{\text{NGF}}$ -Verhältnisse der Schulgebäude nach Fassadentyp (ermittelt an 507 Klassenräumen)

Fassadentyp	Lochfassade	Band- bzw. Skelettfassade
Anzahl der Klassenräume	131 Räume	376 Räume
$A_{\text{FE}}/A_{\text{NGF}}$ -Verhältnis ( $\bar{\varnothing}$ )	22,2 %	30,5 %
Außerhalb der Anforderungen nach ASR 7/1 <sup>14</sup>	3,8 % (5 Räume)	0,0 % (0 Räume)

In 70 % der betrachteten Klassenräume mit Lochfassaden liegt das  $A_{\text{FE}}/A_{\text{NGF}}$ -Verhältnis in einem Bereich von 0,15 bis 0,25 [-]. In 75 % der Räume mit Band- und Skelettfassaden beträgt das Verhältnis 0,28 bis 0,40 [-] (Abbildung 14).

<sup>14</sup> „Für Räume mit einer NGF bis zu  $600 \text{ m}^2$  soll die Gesamtfläche der Sichtverbindungen  $1/10$  der NGF betragen“ (vgl. [75] S. 1 f.).

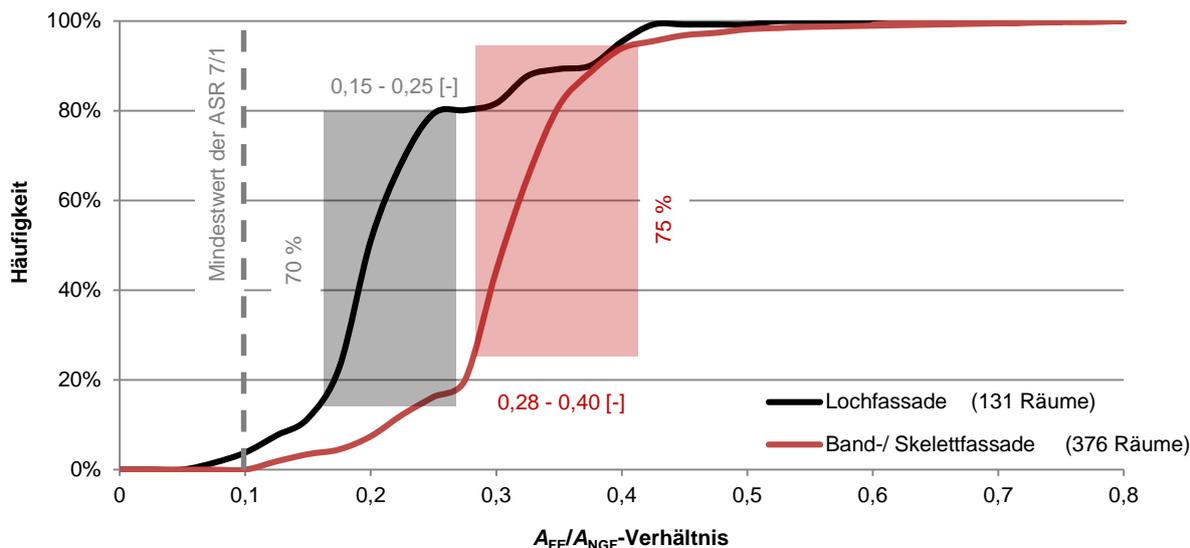


Abbildung 14 Verteilung des  $A_{FE}/A_{NGF}$ -Verhältnis in den untersuchten Klassenräumen

### 4.1.3 Zonierung der Gebäude

Der durchschnittliche Anteil der Klassenraumfläche nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 10) beträgt 46 % der Summe aller Flächen. Der Anteil der Verkehrsflächen entspricht 28 %. Tabelle 19 zeigt die Verteilung der Zonen in den untersuchten Schulgebäuden nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 1).

Tabelle 19 Verteilung der Zonen in den Schulgebäuden nach DIN V 18599 [23]

	Klassenraum Nutzung 8	Verkehrsfläche Nutzung 19	Verwaltung Nutzung 2	Sanitär Nutzung 16	restliche Flächen (z.B. Lager etc.)
Minimum	36 %	20 %	3 %	1 %	12 %
<b>Mittelwert</b>	<b>46 %</b>	<b>28 %</b>	<b>7 %</b>	<b>4 %</b>	<b>24 %</b>
Maximum	54 %	38 %	13 %	8 %	38 %

Mit der Zonierung der Gebäude nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 1) erfolgt eine Ermittlung des Flächenbedarfs sowie des zur Verfügung stehenden Raumvolumens für die Schüler in den Klassenräumen. Die Belegungsdichte beschreibt die NGF, die jedem Schüler zur Verfügung steht. Die Schüler der BBS nutzen die Gebäude<sup>15</sup> jedoch nicht täglich, was einen gebäudebezogenen Vergleich der Schülerzahlen mit denen der ABS und FS erschwert. Die Definition von tagesbezogenen Belegungsdichten in  $[m^2_{NGF}/(Person \cdot d)]$  dient im Rückschluss als einheitliche Bewertungsgrundlage für den Vergleich der Schulformen.

<sup>15</sup> Die Schüler der BBS werden ein- bis zweimal in der Woche unterrichtet. Die Schüler der ABS und FS nutzen von Montag bis Freitag die Gebäude (5 d/Woche).

Tabelle 20 veranschaulicht die Belegungsdichte in den Klassenräumen nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 10).

**Tabelle 20** Belegungsdichte in den Klassenräumen

Schulform	Allgemeinbildende Schulen (ABS)	Berufsbildende Schulen (BBS)	Förderschulen Schwerpunkt: „Lernen“ (FS 1)	Förderschulen Schwerpunkt: „geistige Entwicklung“ FS 2
<b>Belegungsdichte</b> [m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> / (Person•d)]	2,6	2,8	3,8	6,4

Mittels Belegung und Raumvolumen wird das zu Verfügung stehende Luftvolumen pro Schüler ermittelt. Tabelle 21 zeigt das Luftvolumen in den Klassenräumen personen- und tagesspezifisch.

**Tabelle 21** Zur Verfügung stehendes Luftvolumen in den Klassenräumen

Schulform	ABS	BBS	FS 1	FS 2
<b>Luftvolumen /Schüler</b> [m <sup>3</sup> <sub>NRI</sub> / (Person•d)]	9,1	9,6	11,7	33,2

Die nach Schulform variierende Belegungsdichte und das zur Verfügung stehende Luftvolumen dienen der Auslegung anlagentechnischer Systeme und der Bewertung des Innenraumkomforts in den folgenden Kapiteln.

## 4.2 Bestandsaufnahme der Gebäudehüllen

### 4.2.1 Flächenverhältnisse der Bauteile

Die Volumina und Bauteilflächen der Gebäude sind aufgrund des Standorts sowie unterschiedlicher Errichtungszeiträume sehr unterschiedlich. Die Flächenverhältnisse aller an Außenraum und Erdreich grenzenden Bauteile lassen eine Abhängigkeit zum Gebäudealter erkennen. Eine anteilige Erhöhung der bebauten Fläche von 21 % auf 32 % zur gesamten Gebäudehüllfläche ist bei den Schulen, die von 1880 bis 1980 errichtet wurden, zu erkennen. Die Gebäudehöhe nimmt hingegen in diesem Betrachtungszeitraum ab. Die Außenwandflächen von Gebäuden aus dem 19. Jahrhundert betragen anteilig 48 % der Hüllfläche und nehmen bis 1980 auf 22 % ab. Die horizontalen Außenbauteile der Gebäude aus den Jahren 1970 bis 1980 weisen eine Fläche von rund zwei Drittel aller an Außenluft und Erdreich grenzenden Bauteile auf. Der Anteil der Fensterflächen zur gesamten Hüllfläche bleibt sich mit einem Anteil von 12 bis 18 % im Betrachtungszeitraum annähernd konstant (Abbildung 15).

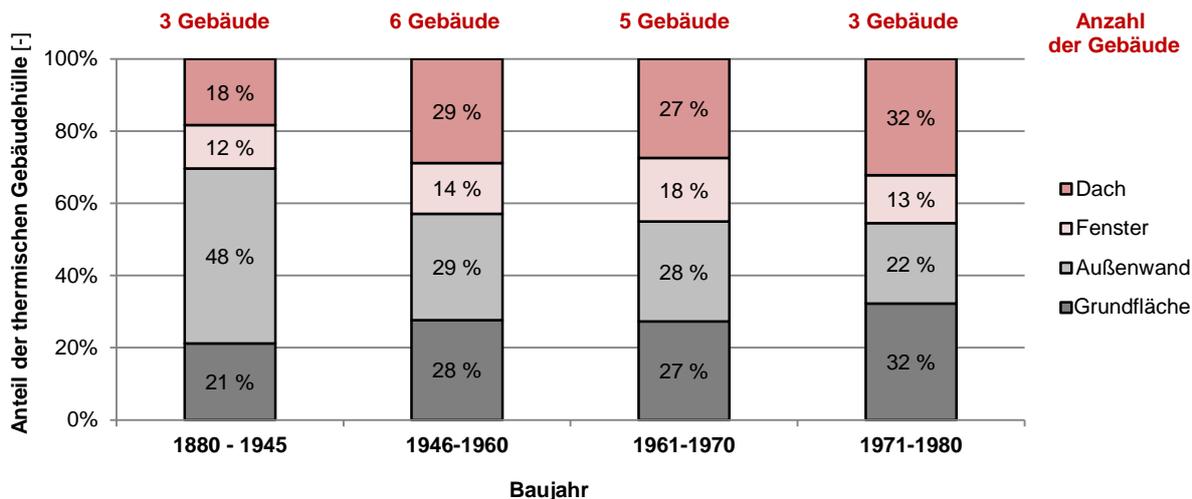


Abbildung 15 Prozentuale Verteilung der Bauteile

Der Fensterflächenanteil (FFA) bildet das Verhältnis der Fensterfläche zur gesamten Außenwand einschließlich der Fensterflächen. Der FFA erhöht sich von 20 % (Baujahr 1880–1945) auf 37 % (Baujahr 1971–1980).

Die historische Entwicklung der Gebäudekubatur zeigt die Veränderung der schematischen Gebäudeschnitte und -ansichten sowie der Proportionen auf (Abbildung 16). Die Gebäude aus den Jahren von 1946 bis 1970 weisen gleiche Gebäudekubaturen auf und werden daher zusammengefasst. Die Betrachtung zeigt eine Erhöhung des FFA, der bebauten Fläche und der Dachflächen auf. Der oberste Gebäudeabschluss wurde ab 1950 größtenteils als Flachdach ausgeführt.

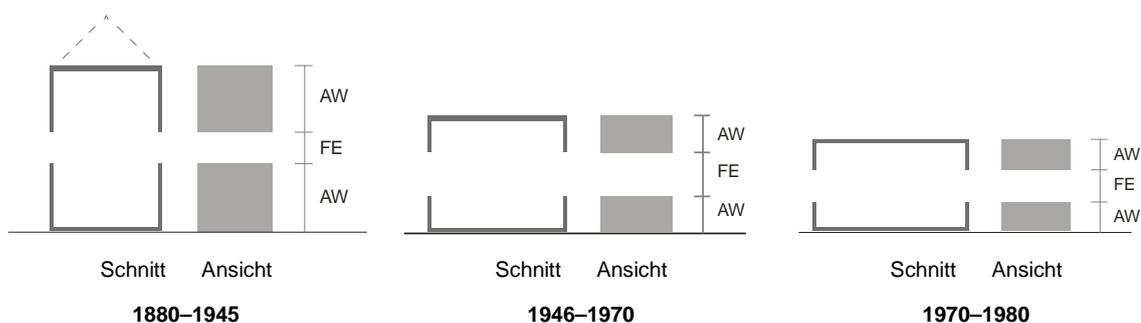


Abbildung 16 Schematische Darstellung der Gebäude in Schnitt und Ansicht getrennt nach Baualtersklasse

Die Außenbauteile der Schulgebäude entsprechen größtenteils dem Zustand des Baualters. Ein Austausch einzelner Bauteile, vor allem der der Fenster, fand zwischen der Errichtung und dem Zeitpunkt der Bearbeitung bereits statt.

## 4.2.2 Dächer

### Allgemeines

Sparren- oder Steildächer sind typisch für Gebäude der Gründerzeit (1870–1920). Die Dachböden der Gebäude haben, bis auf die Möglichkeit zur Lagerung von Gegenständen, keine Funktion. Die Eindeckung der Dächer erfolgt mit Ziegeln, die hinterlüftet und teilweise rückseitig verputzt oder mit einer Holzschalung zum Witterungsschutz verkleidet sind (vgl. [59] Kap. 3.2.1, S.10 ff.).

„Teerpappendächer“ stellen neben den Sparren- oder Steildächern eine weitere Möglichkeit des oberen Abschlusses von Gebäuden dar (vgl. [89] S. 188 f.). Die auch als „Holzzementdach“ benannte Konstruktion übernimmt die wasserführende Funktion. Teer, Schwefel oder Pech verkleben die Pappbahnen miteinander (vgl. [90] S. 152). Die Dachkonstruktion zeichnet sich durch wärmedämmende Eigenschaften sowie Widerstandsfähigkeit gegenüber Witterungseinflüssen aus (vgl. [91] S. 30).

Ab den 1920er Jahren werden Falzziegel zur Deckung von Sparrendächern verwendet. Die Ausführung der als modern angesehenen Flachdachkonstruktionen erfolgt als Kaltdach mit „bekriechbarem“ Zwischenraum. Die oberste Geschossdecke besteht aus Gewichtsträgern aus Bimsbeton. Die Entwässerung der Dächer erfolgt außenseitig über Dachrinnen (vgl. [90] S. 171).

In den 1950er Jahren dominieren weiterhin Gebäude mit Flachdächern das Erscheinungsbild. Der bautechnische Fortschritt ermöglicht Dachkonstruktionen aus Ortbeton oder Betonfertigteilen sowie die Ausführung von Kalt- oder Warmdächern. Größtenteils befinden sich in den Dachaufbauten 4 bis 6 cm starke Wärmedämmschichten. Bis in die 1980er Jahre erhöht sich die Dämmstärke auf bis zu 10 cm (vgl. [59] Kap. 3.2.3, S. 6).

### Schadensbilder

Häufige Schadensbilder der unsanierten Flachdächer treten in Form einer undichten Dacheindeckung sowie von Undichtigkeiten der wasserführenden Schicht auf. Hierdurch tritt oft ein Zerfall der Holzkonstruktionen oder ein Schaden an den Ortbetondecken auf. Defekte Dachentwässerung und Dachanschlüsse sowie abgängige Kaminköpfe an Sparrendächern führen zu einem zerfallenen Gesamterscheinungsbild der Gebäude (vgl. [59] Kap. 3).

### Untersuchte Bauteile

Die Wärmedurchgangskoeffizienten der untersuchten Dachkonstruktionen betragen größtenteils  $< 1,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Vereinzelt entsprechen Bauteile nicht den Anforderungen der jeweiligen DIN 4108-2 [21]; [78]; [79]; [80] (Tabelle 3). Zwischen den 1950er und 1970er Jahren erfolgt

der Einbau von wärmedämmenden Materialien in die Dachkonstruktionen. Während die Dachkonstruktionen der 1950er Jahre einen U-Wert von 1,2 bis 1,5 W/(m<sup>2</sup>•K) aufweisen, betragen die Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile ab den 1960er Jahren 0,4 bis 0,8 W/(m<sup>2</sup>•K) (Abbildung 17).

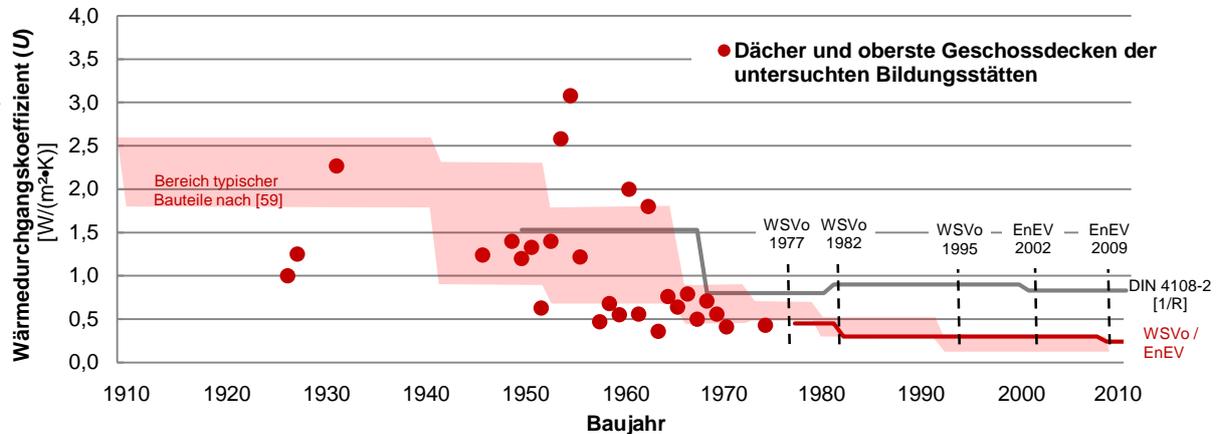


Abbildung 17 Wärmedurchgangskoeffizienten der Dächer und obersten Geschossdecken

### 4.2.3 Fußböden gegen Erdreich und Kellerdecken

#### Allgemeines

Der Kellerraum hat in der Gründerzeit u.a. die Funktionen des Lagerraums und dient zum Schutz gegen aufsteigende Feuchtigkeit. Das Auskragen des oberen Teils der Kellergeschosswände aus dem Erdreich schützt vor Spritzwasser und ermöglicht die natürliche Belichtung der Kellerräume. Die Ausbildung der Gründungen als Streifenfundamente („Bankette“) erfolgt oberhalb des maximalen Grundwasserspiegels (vgl. [90] S. 133 ff.; [92] S. 488 ff.).

Die Kellerböden sind in Stampfbeton, Natursteinplatten oder Ziegelpflaster gefertigt. Die Kellerdecken hingegen sind feuchtigkeitsbeständig. Die häufigste Konstruktion ist das Tonnengewölbe bzw. die Kappendecke. In den oberen Geschossdecken bestehen die Decken aus Holz (Holzbalkendecke) (vgl. [90] S. 133 ff.; [93] S. 138 ff.)

Ab 1910 ersetzen Flach- oder Tiefengründungen aus Beton die gemauerten Fundamente. Die „schwarze Wanne“ (z.B. eine Bitumendickbeschichtung zur Abdichtung erdberührender Bauteile) ermöglichte die Gründung im Grundwasserbereich besonders ab den 1950er Jahren. Die Betonplatten weisen Stärken von 12 bis 15 cm auf. Der Belag besteht in der Regel aus Verbundestrich oder Ziegelpflaster. Die Kelleraußenwände wurden weiterhin gemauert. Die Gewölbe verloren ab 1920 an Bedeutung. Die Anfertigung von Kellerböden und -decken erfolgte ab den 1950er Jahren größtenteils in Ortbeton. Die Abdichtung von Kellerwänden und -böden durch Bitumen- und Kunststoffbahnen gewann an Bedeutung. Ab Mitte der 1960er Jahre ersetzte der Stahlbeton die Stampfbetonkonstruktionen (vgl. [90] S. 172 ff.).

## Schadensbilder

Die Ansammlung von Feuchtigkeit aufgrund fehlender oder defekter Horizontalsperren und Wärmebrücken an den Auflagerbereichen prägen die Schadensbilder der Kellerböden und -decken sowie den aufgehenden Kellerwänden der Gebäude aus der Gründerzeit (vgl. [59] Kap. 3). An den Gebäuden ab den 1960er Jahren treten vermehrt Risse aufgrund von Setzungen auf. Diese entstehen aufgrund erhöhter Lasten in den Gebäuden und der noch in der Entwicklung stehenden Fundamentierungstechnik.

## Untersuchte Bauteile

Die untersuchten Konstruktionen weisen Wärmedurchgangskoeffizienten bis  $2,0 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  auf. Der Einbau von schwimmendem Estrich sowie Trittschalldämmung ( $< 4 \text{ cm}$ ) führte zu einer Verringerung der Wärmedurchgangskoeffizienten ab den 1970er Jahren.

Die Kellerdecken weisen z.T. geringere Wärmedurchlasswiderstände auf, als die jeweils gültige DIN 4108-2 [21]; [78]; [79]; [80] (Tabelle 3) zulässt. Der bauliche Wärmeschutz der erdbehütenden Kellerböden stellt sich gegenüber den Kellerdecken besser dar. Während der durchschnittliche U-Wert der betrachteten Kellerdecken  $1,10 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  beträgt, hat der mittlere U-Wert aller Kellerböden, die an das Erdreich grenzen, einen Wert von  $0,46 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Die Kellerböden erfüllen vereinzelt die bauteilbezogenen Anforderungen der Wärmeschutzverordnung 1995 (vgl. [42] Anl. 3) Eine Verbesserung der Bauteilqualität durch die historische Entwicklung ist nicht erkennbar. Abbildung 18 zeigt die Wärmedurchgangskoeffizienten der aufgenommenen Kellerböden gegen Erdreich und Kellerdecken gegen unbeheizten Raum.

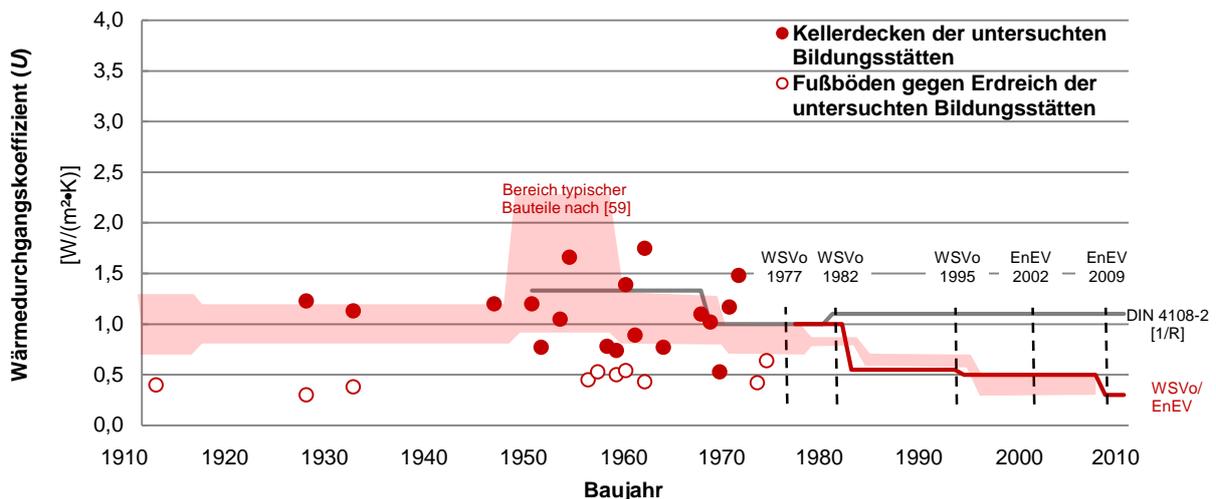


Abbildung 18 Wärmedurchgangskoeffizienten der Kellerböden und Kellerdecken

#### **4.2.4 Außenwände**

##### **Allgemeines**

Die Außenwände der Schulgebäude um die 1900er Jahre bestehen aus monolithischen bzw. zweischaligen Aufbauten aus Vollziegeln mit zwischenliegender Luftschicht. Die Außenwände bilden in Norddeutschland mit einem Sichtmauerwerk den äußeren Abschluss der thermischen Hülle. In den südlichen Regionen Deutschlands hingegen sind die Wände beidseitig verputzt. Bis zum Anfang des 20. Jahrhunderts ist der Fachwerkbau das Pendant zum Mauerwerksbau. Gebäude der Gründerzeit weisen kleinformatische Ziegelmauern auf (vgl. [59] Kap. 3.2.1, S. 4 ff.)

Der Einbau von Dämmstoffen, wie z.B. Torfplatten, zement- oder magnesitgebundenen Holzwoleleichtbauplatten, in die Außenwände erfolgte bei den Zwischenkriegsbauten in den Jahren von 1920 bis 1940. Hohlblocksteine fanden neben dem Verbau von Vollziegeln nach dem Zweiten Weltkrieg Anwendung. Im Mehrgeschossbau wurden in den 1960er Jahren Betonfertigteile in zweischaligem Aufbau mit Luftschicht oder als Sandwichelement mit Kerndämmung verwendet. Die Dämmstoffstärke beträgt 3 bis 4 cm. Seegras-, Kork- und Kokosmatten kamen als wärmedämmendes Material zum Einsatz (vgl. [90] S. 172 ff.).

##### **Schadensbilder**

Durchfeuchtungen im Keller- und Erdgeschossbereich aufgrund unzureichender Vertikal- und Horizontalabdichtungen prägen das Schadensbild der unsanierten Außenwände. Zudem treten Undichtigkeiten an den Fensteranschlüssen auf. Bereits um 1900 ist das Einbringen von Isolierschichten oder der Abtransport von Feuchte über Luftzug zur Vermeidung von Feuchteanfall im Bauteil eine baukonstruktive Lösung (vgl. [93] S. 54 ff.).

Weitere Schwachstellen treten durch Rissbildungen und Aussandungen der Fugen an den Mauerwerken auf und führen zu einer Verringerung des Spritzwasser- und Schlagregenschutzes. Unzureichende oder abgängige Dämmmaterialien sowie auftretende Wärmebrücken verursachen einen unzureichenden Wärmeschutz und die Ansammlung von Feuchtigkeit im Bauteil (vgl. [59] Kap. 3).

##### **Untersuchte Bauteile**

Die Qualität des baulichen Wärmeschutzes der Außenwände entspricht z.T. nicht den Anforderungen der jeweils gültigen DIN 4108-2 [21]; [78]; [79]; [80] (Tabelle 3). Die untersuchten Baukonstruktionen weisen U-Werte von 0,9 bis 2,2 W/(m<sup>2</sup>•K) auf. Eine Verbesserung der Wärmedurchgangskoeffizienten (*U*) in Abhängigkeit zum Errichtungszeitraum der Gebäude ist nicht ersichtlich (Abbildung 19).

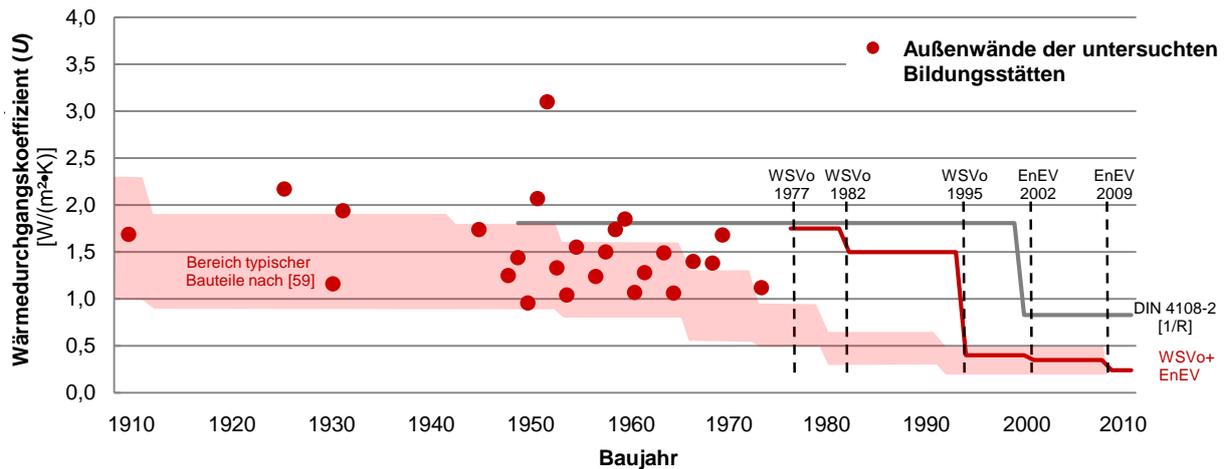


Abbildung 19 Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenwände

## 4.2.5 Fenster

### Allgemeines

Bis in die 1950er Jahre prägten Fenster mit Holzrahmen und verkitteter Einscheibenverglasung das Erscheinungsbild der Gebäude. Die Sprossenfenster hatten Öffnungsflügel mit feststehenden Elementen. Kastenfenster zeigten den gehobenen Standard von Gebäuden dieser Zeit (vgl. [59] Kap. 3.2.3, S. 8 f.). Der Einbau von Glasbausteinen und Wabenfenstern begann mit der intensiven Bauphase in der Mitte des 20. Jahrhunderts. Kunststoff- und Metallrahmen ersetzen ab den 1960er Jahren den Holzrahmen. In den 1970er Jahren erfolgte der Einbau von Zweischeiben-Isolierverglasung (vgl. [59] Kap. 3.2.5, S. 7 ff.) und seit den 1990er Jahren werden Dreischeibenverglasung und Kunststoffrahmen verbaut.

### Schadensbilder

Die Fensterrahmen befinden sich größtenteils durch den Witterungseinfluss in einem gebrauchsunfähigen Zustand. Die Rahmen zeigen zudem einen luftundichten Anschluss zur Außenwand. Die Verglasung weist ein abgängiges Erscheinungsbild in Form von Rissbildung und einem undichten Verbund mit den Fensterrahmen auf. Störungen des thermischen Komforts sind durch Kälteeintritt im Winter und erhöhter solarer Einstrahlung im Sommer zu erwarten.

### Untersuchte Bauteile

Die untersuchten Fenster der Schulgebäude weisen einen Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U_w$ ) von 3,0 bis 5,3  $W/(m^2 \cdot K)$  auf. Während der Wärmedurchgangskoeffizient der Fenster mit Holzrahmen und Einscheibenverglasung im Mittel 5,3  $W/(m^2 \cdot K)$  beträgt, weisen doppelverglaste Fenster (ISO) einen  $U_w$ -Wert von 3,0  $W/(m^2 \cdot K)$  auf (Abbildung 20).

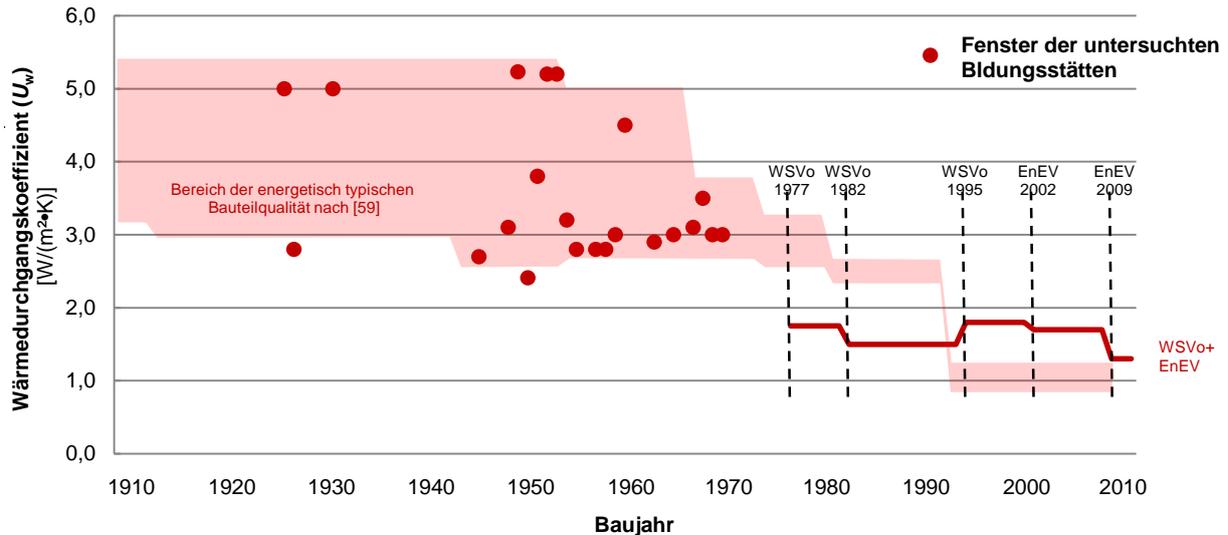


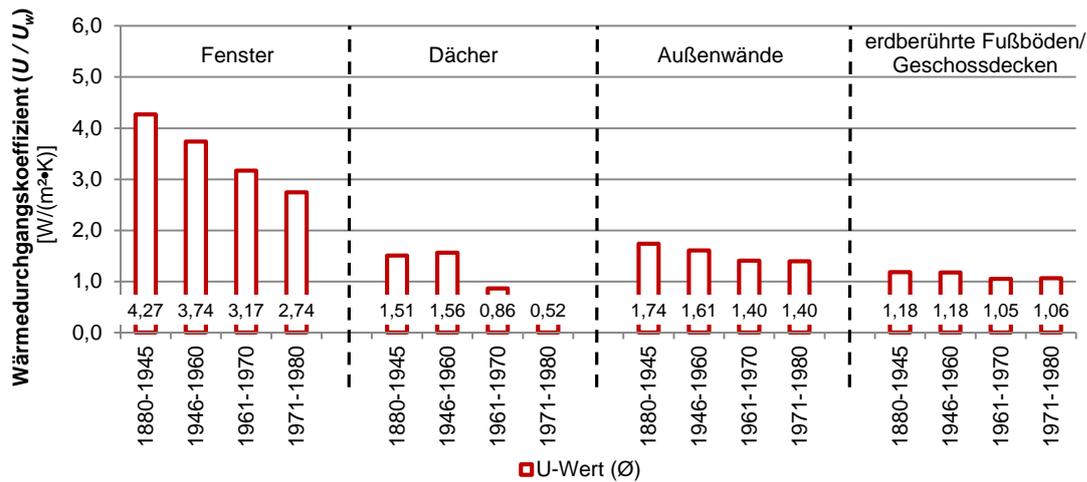
Abbildung 20 Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U_w$ -Wert) der Fenster

#### 4.2.6 Zusammenstellung der Bauteile

Die Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) der jeweiligen Bauteile beschreiben die Qualität des baulichen Wärmeschutzes in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des erstmaligen Einbaus. Dieser Wert lässt den bauteilbezogenen Vergleich zu. Die erhobenen Daten lassen keine getrennte Darstellung der Kellerdecken und unteren Geschossdecken zu (Einzelwerte: Abbildung 18). Die Bewertung fasst diese Bauteile zusammen.

Je später die betrachteten Bauteile verbaut wurden, desto besser ist der bauliche Wärmeschutz der Gebäude (Abbildung 21). Die Reduzierung der Wärmedurchgangskoeffizienten ist einerseits auf die Einführung von gesetzlichen Vorgaben, andererseits auf die Entwicklung neuer Materialien und Fertigungsprozesse zurückzuführen.

Die Fenster weisen die höchsten Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U_w$ ) aller untersuchten Bauteile auf. Sie sind bilanziell nach Verlusten und Gewinnen zu bewerten. Den hohen Transmissionswärmeverlusten ( $Q_T$ ) aufgrund schlechter Wärmedurchgangskoeffizienten der Verglasung ( $U_g$ ) stehen die passiv-solaren Erträge ( $Q_s$ ) gegenüber.



**Abbildung 21** Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes einzelner Bauteile nach Altersklassen

Die untersuchten Schulgebäude von 1880 bis 1945 weisen einen mittleren Transmissionswärmeverlust ( $H'_T$ ) von 2,07 W/(m<sup>2</sup>·K) auf. Der geringste Wärmeverlust infolge von Transmission tritt an den von 1961 bis 1970 errichteten Gebäuden auf. Eine Verbesserung des mittleren Transmissionswärmeverlustes ( $H'_T$ ) der Schulgebäude ist in Abhängigkeit des Errichtungszeitraums zu erkennen (Tabelle 22).

**Tabelle 22** Mittlere Transmissionswärmeverluste ( $H'_T$ ) nach Baualtersklasse

Baualtersklasse	1880–1945	1946–1960	1961–1970	1971–1980
$H'_T$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	2,07	1,47	1,16	1,20

### 4.3 Bestandsaufnahme der technischen Gebäudeausrüstung

#### 4.3.1 Heizungsanlagen

Die Beheizung der Schulen erfolgt über zentrale Warmwasserheizungen. Die Wärmeerzeugungsanlagen befinden sich in den Untergeschossen bzw. in den Technikräumen der Gebäude. Fünf Schulen in urbanen Gebieten sind an das Fernwärmenetz angebunden. Die Hausstationen übergeben die Wärme vom Netz an das Gebäude.

Die Wärmeerzeugung geschieht in den untersuchten Gebäuden mit fossilen Energieträgern und aus dem Prozess der KWK. Gasbefeuerte Kessel bzw. der Anschluss an bestehende Fernwärmenetze stellen in 15 der 17 Schulen die Wärme in den Gebäuden bereit. Nachtspeicheröfen und Ölkessel kommen in jeweils einem Schulgebäude zum Einsatz.

Die Verteilung der erzeugten Wärme in den unterkellerten Gebäuden erfolgt über Verteilleitungen, die außerhalb der thermischen Gebäudehülle im Untergeschoss verlaufen (untere Verteilung). Die Verteilleitungen der Heizungsanlagen in nicht-unterkellerten Gebäuden sind vorwiegend nach dem Prinzip der „oberen Verteilung“ innerhalb der Gebäude verlegt.

Die Verteilleitungen weisen Abnutzungserscheinungen auf und sind z.T. ungedämmt bzw. nachträglich gedämmt. Der Zustand der Leitungen lässt hohe Verteilverluste während des Heizbetriebs erwarten. Die Steig- und Anbindeleitungen verlaufen in der Nähe der Außenwände und sind ebenfalls ungedämmt. Die wasserführenden Zentralheizungen sind als PWWH ausgeführt. Diese Art der Verteilung ist bei allen wassergeführten Systemen in den untersuchten Schulen dokumentiert worden. Entgegen der Schwerkraft-Warmwasserheizungen (SWWH) weisen die Pumpen-Warmwasserheizungen (PWWH) eine Abhängigkeit von der Stromversorgung und einen höheren Wartungsaufwand auf. Eine verbesserte Regelung des Pumpenbetriebs ermöglicht ein schnelleres Aufheizen der Innenräume sowie einen effizienteren Betrieb (vgl. [50] S. 552 ff.).

Die Ausführung der Heizungsanlage im Einrohrsystem bindet alle Heizkörper in Reihe, also hintereinander geschaltet an. Die Ausführung als Zweirohrsystem ermöglicht hingegen die Versorgung aller an einen Strang angebotenen Heizkörper mit fast identischer Vorlauftemperatur. Die Anhebung bzw. die Senkung der Systemtemperaturen erfolgt mit Hilfe von Regelventilen. Die dokumentierten Vorlauftemperaturen betragen in diesen Systemen bis zu 100 °C. Die Wärmeübergabe an den Raum geschieht in den untersuchten Gebäuden ausnahmslos über Radiatoren. Flächenheizsysteme zur Wärmeübergabe finden in den unsanierten Schulen keine Anwendung (vgl. [50] S. 552 ff.).

Der Vergleich der untersuchten Heizungsanlagen erfolgt anhand der berechneten Anlagenverluste innerhalb der Heizsysteme sowie vorgelagerten Energieketten (Primärenergien). Der nach DIN V 18599 [23] berechnete Endenergiebedarf (Wärme) der Schulen stellen den Ausgangswert (= 100 %) der Betrachtung dar (Abbildung 22).

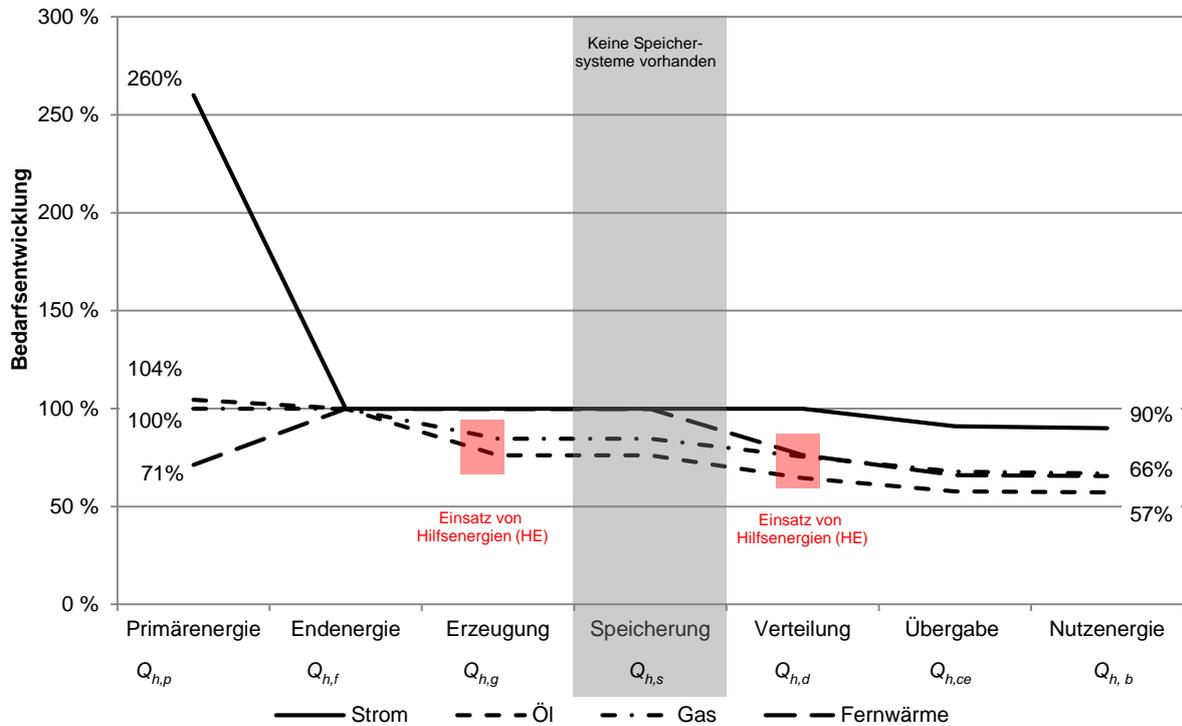
Die geringsten Erzeugungsverluste treten durch die Übergabe der Fernwärme in das Gebäude (Hausstationen) auf. Die mit Gas oder Öl betriebenen Standard-Heizkessel weisen Erzeugungsverluste ( $Q_{h,g}$ ) von 25 bis 35 % auf.

Die Verteilverluste ( $Q_{h,d}$ ) der wassergeführten Heizsysteme belaufen sich auf weitere 25 %. Die Übergabeverluste an den Heizkörpern betragen 10 %. Die Summe der gesamtanlagentechnischen Verluste der wasserführenden Systeme beträgt in den Schulen 34 bis 43 % des Endenergiebedarfs ( $Q_{h,t}$ ).

Elektrische Wärmeversorgungskonzepte erzeugen innerhalb der Systeme die geringsten Verluste. 10 % des Endenergiebedarfs resultiert als Verlust aus der Wärmeübergabe an den

Raum. Andererseits weisen diese Systeme die höchste Vorlagerung an Prozessketten auf (Primärenergien).

Durch den Betrieb wasserführender Heizungsanlagen sind Hilfsenergien ( $Q_{h,aux}$ ) zum Betrieb der Wärmeerzeugungsanlagen und Umwälzpumpen zur Verteilung der Heizwärme erforderlich. Sie weisen einen geringen Anteil am Gesamtstrombedarf der Gebäude auf.



**Abbildung 22** Einfluss der Wärmeverluste auf die Bedarfsentwicklung (Endenergie = 100 %) nach DIN V 18599 [23]

#### 4.3.2 Warmwasserbereitung

In den untersuchten Schulen liegt ein Frischwasserverbrauch vor. Eine Differenzierung des Kalt- und Warmwasserverbrauchs ist in den Schulgebäuden aufgrund fehlender Messeinrichtungen jedoch nicht möglich. Insgesamt steht bei drei Schulgebäuden eine Sporthalle in räumlichen Zusammenhang. Anhand messtechnischer Untersuchungen wurde die Warmwasserabnahme in den Sporthallen während der Unterrichtszeit aufgezeigt. Gegenüber den Heizenergieverbräuchen ist der Warmwasserverbrauch als gering und das Nutzerverhalten der Schüler als sparsam einzustufen. Die Abnahme von Trinkwarmwasser bei abendlicher Sporthallennutzung bringt ein identisches Ergebnis.

In den Sanitärbereichen der ABS und BBS besteht größtenteils nur ein Kaltwasserbedarf. In den Unterrichtsräumen sowie Sanitärbereichen der FS II mit dem Lehrschwerpunkt „geistige Entwicklung“ liegt aufgrund des erhöhten Pflege- und Betreuungsaufwandes der Schüler ein

Warmwasserbedarf vor. Hier stellen dezentrale Durchlauferhitzer die Trinkwarmwasserbereitung in den Klassenräumen und Sanitärbereichen sicher und lassen einen erhöhten Stromverbrauch erwarten. Für die Gebäudereinigung<sup>16</sup> ist ein zusätzlicher Warmwasserbedarf festzustellen. Die Deckung geschieht über Zapfstellen in einigen Lagerräumen. Auch hier werden elektrisch betriebene Durchlauferhitzer zur Aufbereitung eingesetzt.

Der gesamte Wasserverbrauch beläuft sich in den ABS bei einer angenommenen Nutzungszeit von 200 d/a auf 5,3 bis 15,0 l/(Person•d) und bildet einen Mittelwert von 8,7 l/(Person•d). Der Verbrauch in den BBS liegt über dem Mittelwert der ABS. Zwei BBS werden aus der Betrachtung ausgeschlossen, da aufgrund ihrer Nutzung bedingt untypisch hohe Wasserverbräuche auftreten<sup>17</sup>. Der Wasserverbrauch der Förderschulen I (FS I) ist mit dem der BBS zu vergleichen. Die Förderschulen II (FS II) weisen einen vierfachen Verbrauch gegenüber den anderen Schulformen auf (Tabelle 23).

**Tabelle 23** nach Schulform getrennter Frischwasserverbrauch (Nutzungszeit: 200 d/a)

Schulform	ABS	BBS	FS I	FS II
Minimum [l/(Person•d)]	5,3	8,7	8,4	38,4
Mittelwert [l/(Person•d)]	8,7	9,3	10,0	39,3
Maximum [l/(Person•d)]	15,0	12,7	11,6	40,3

### 4.3.3 Raumluftechnische Anlagen

Die Belüftung der unsanierten Bildungsstätten erfolgt ausschließlich über die Fenster. Aus der Fensterlüftung resultieren unter Einhaltung des geforderten Mindestaußenluftvolumenstroms nach DIN V 18599-10 (vgl. [23] Teil 10) von 30 m<sup>3</sup>/(Person•h) hohe Lüftungswärmeverluste ( $Q_v$ ). Der Einsatz raumluftechnischer Anlagen mit wärmerückgewinnenden Systemen würde zu einer Verringerung der Lüftungswärmeverluste führen. Das Potenzial wird an den untersuchten Schulen jedoch nicht genutzt.

Die Einhaltung des geforderten Luftvolumenstroms sowie die Sicherstellung einer guten hygienischen Luftqualität in den Schulgebäuden werden in weiteren Arbeitsschritten überprüft.

<sup>16</sup> Zum Zeitpunkt der Bestandsaufnahmen wird kein Mensabetrieb angeboten, dementsprechend liegt kein Trinkwarmwasserbedarf vor.

<sup>17</sup> Der Lehrschwerpunkt dieser berufsbildenden Schulen ist „Gastronomie“ und „Lebensmittelhandwerk“. Der Wasserverbrauch ist nicht mit typischen Schulgebäuden zu vergleichen.

#### 4.3.4 Berechnung der Norm-Heizlast

Die spezifischen auf die Fläche der thermischen Gebäudehülle bezogenen Norm-Transmissionswärmeverluste der untersuchten Gebäude betragen 34 bis 106  $\text{W}/\text{m}^2_{\text{therm. Gebäudehülle}}$  und bilden einen Mittelwert von  $59 \text{ W}/\text{m}^2_{\text{therm. Gebäudehülle}}$  (Abbildung 23). Die dokumentierten Abweichungen des mittleren Transmissionswärmeverlustes ( $H'_T$ ) zum Norm-Transmissionswärmeverlust ( $\Phi_T$ ) beruht auf unterschiedlichen Gebäudeausrichtungen und -formen sowie den klimatischen Bedingungen an den jeweiligen Standorten (vgl. [86] S. 30 f.)

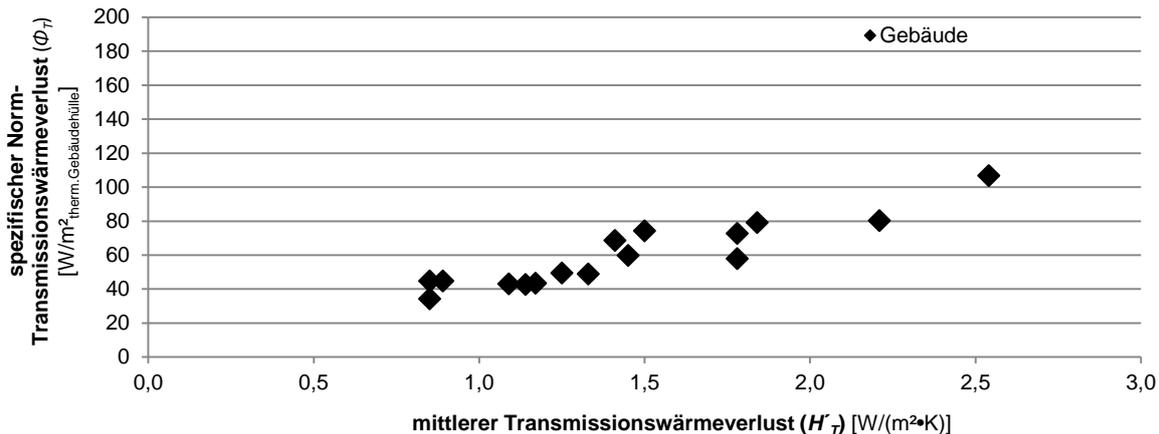
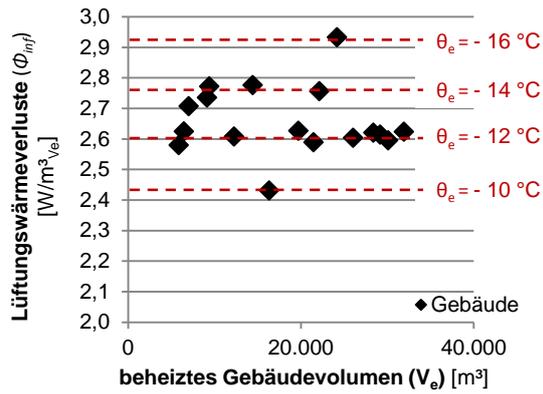


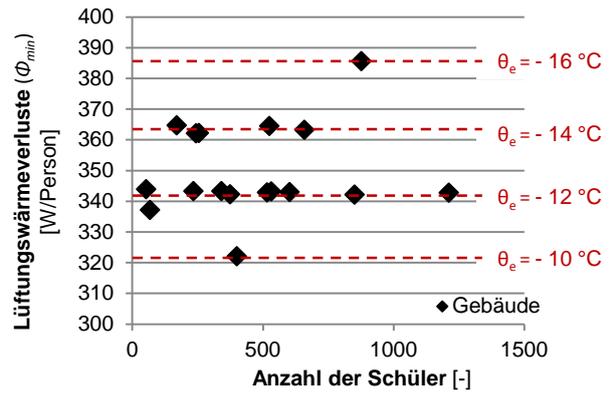
Abbildung 23 Spezifischer Norm-Transmissionswärmeverlust ( $\Phi_T$ ) über die Gebäudehülle nach DIN EN 12831 [86]

Die Norm-Lüftungswärmeverluste aufgrund von Infiltration hängen vom jeweilig beheizten Gebäudevolumen ab. Die Berechnung setzt eine Gebäudedichtheit der unsanierten Bildungsstätten von  $6 \text{ h}^{-1}$  ( $n_{50}$ ) nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 2) an. Die Schulen weisen auf das beheizte Gebäudevolumen ( $V_e$ ) bezogene Norm-Lüftungswärmeverluste ( $\Phi_{int}$ ) von 2,43 bis 2,93  $\text{W}/\text{m}^3_{V_e}$  auf. Abbildung 24 stellt die Norm-Lüftungswärmeverluste der Norm-Außentemperatur ( $\theta_e$ ) nach DIN EN 12831 (vgl. [86] S. 31) gegenüber.

Die Norm-Lüftungswärmeverluste zur Einhaltung des Mindestaußenluftvolumenstroms ( $\dot{V}_{A,soil}$ ) betragen in den untersuchten Schulen 322 bis 385  $\text{W}/\text{Person}$ . Der Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung wärmerückgewinnender Systeme findet ebenso wie interne Lasten ( $Q_i$ ) innerhalb der Berechnung keine Berücksichtigung (Abbildung 25).

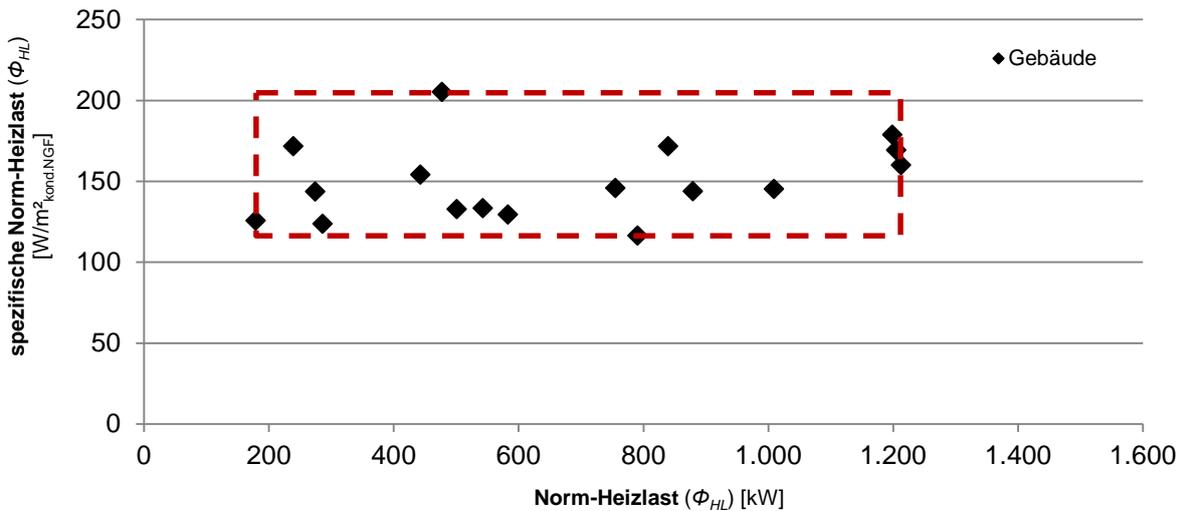


**Abbildung 24** Norm-Lüftungswärmeverluste ( $\Phi_{int}$ ) nach DIN EN 12831 [86]



**Abbildung 25** Norm-Lüftungswärmeverluste ( $\Phi_{min}$ ) nach DIN EN 12831 [86]

Die Norm-Heizlast ( $\Phi_{HL}$ ) der untersuchten Schulen beträgt 186 bis 1.288 kW. Die absolute Norm-Heizlast lässt einen gebäudebezogenen Vergleich nicht zu, daher wird die thermisch konditionierte NGF für den Vergleich der Gebäude genutzt. Die spezifische Heizlast der unsaanierten Gebäude beträgt 124 bis 182  $\text{W}/\text{m}^2_{\text{kond,NGF}}$ . Abbildung 26 zeigt die spezifische und absolute Norm-Heizlast ( $\Phi_{HL}$ ) nach DIN EN 12831 (vgl. [86] S. 28 ff.).



**Abbildung 26** Ermittlung der spezifischen und absoluten Norm-Heizlast ( $\Phi_{HL}$ ) nach DIN EN 12831 [86]

Der größte Anteil aus der Norm-Heizlast ( $\Phi_{HL}$ ) resultiert mit durchschnittlich 58 % aus den Norm-Transmissionswärmeverlusten ( $\Phi_T$ ). Zur Sicherstellung des Mindestaußenluftvolumenstroms ( $\Phi_{min}$ ) werden weitere 23 % benötigt. Die Anteile aus der Infiltration ( $\Phi_{inf,i}$ ) und der Wiederaufheizleistung ( $\Phi_{RH,i}$ ) betragen lediglich 8 % bzw. 11 % der Norm-Heizlast ( $\Phi_{HL}$ ).

### 4.3.5 Beleuchtungsanlagen

In Deckenverkleidung integrierte Leuchten beleuchten die Klassenräume mit direktem Kunstlicht. Die Leuchten sind mit Leuchtstofflampen und KVG bestückt und über zwei bzw. drei Reihen manuell schaltbar. Die Anordnung der Leuchten ist parallel zur Fassade.

Die aufgenommene Beleuchtungsleistung ( $p$ ) der untersuchten Klassenräume stimmen mit der errechneten Bewertungsleistung ( $p_j$ ) nach DIN V 18599-4 tendenziell überein (vgl. [23] Teil 4). Die dokumentierte Beleuchtungsleistung ( $p$ ) beträgt in den Klassenräumen durchschnittlich  $10,3 \text{ W/m}^2_{\text{kond.NGF}}$ . Die errechnete Bewertungsleistung ( $p_j$ ) stellt sich gegenüber den Anschlussleistungen mit  $11,3 \text{ W/m}^2_{\text{kond.NGF}}$  als leicht erhöht dar (Abbildung 27).

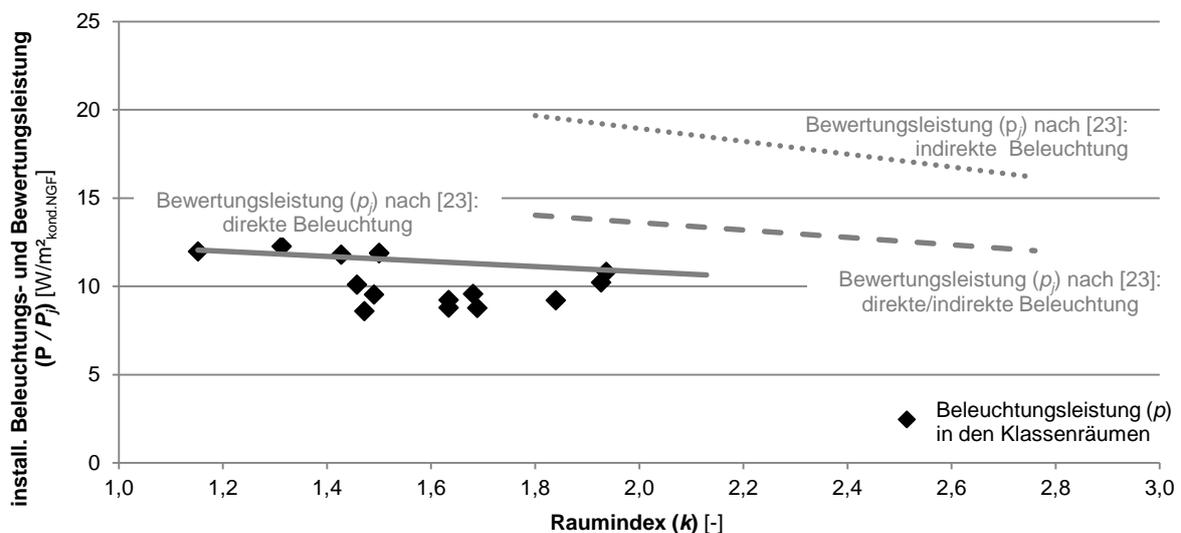


Abbildung 27 Vergleich der Bewertungsleistung ( $p_j$ ) mit der Beleuchtungsleistung ( $p$ )

Die Umsetzung unterschiedlicher Beleuchtungsarten<sup>18</sup> wirkt sich auf die Bewertungsleistung der Anlagen ( $p_j$ ) sowie den Raumindex ( $k$ ) aus. Die Einbausituation der direkt/indirekten sowie indirekten Beleuchtung der Räume hat aufgrund abhängender Leuchten (Annahme: Abhängigkeitshöhe 50 cm) Auswirkungen auf die Beleuchtungsleistung ( $p_j$ ).

Gegenüber der direkten Beleuchtung weisen die Anlagen mit abgehängten Leuchten eine höhere Bewertungsleistung ( $p_j$ ) auf. Die durchschnittliche Bewertungsleistung ( $p_j$ ) der untersuchten Klassenräume beträgt bei direkter Beleuchtung und dem Einsatz von Leuchtstofflampen mit konventionellen Vorschaltgeräten (KVG)  $11,3 \text{ W/m}^2_{\text{kond.NGF}}$ . Eine Veränderung der Beleuchtungsart in Kombination von direkter/indirekter Beleuchtung erhöht die Bewertungsleistung ( $p_j$ )

<sup>18</sup> Unter den unterschiedlichen Beleuchtungsarten ist die direkte, direkte/indirekte und indirekte Beleuchtung zu verstehen.

um 18 %. Die indirekte Beleuchtung weist die höchste Leistung von  $18,5 \text{ W/m}^2_{\text{kond.NGF}}$  auf und hebt die erforderliche Leistung gegenüber der direkten Beleuchtung um 64 % an (Tabelle 24).

**Tabelle 24** Bewertungsleistung ( $\rho$ ) unterschiedlicher Beleuchtungsarten

Art der Beleuchtung	direkte Beleuchtung	direkt/indirekte Beleuchtung	indirekte Beleuchtung
Bewertungsleistung ( $\rho$ ) [ $\text{W/m}^2_{\text{kond.NGF}}$ ]	11,3	13,3	18,5
Bewertungsleistung ( $\rho$ ) [-]	100 %	118 %	164 %

## 4.4 Energieverbrauch

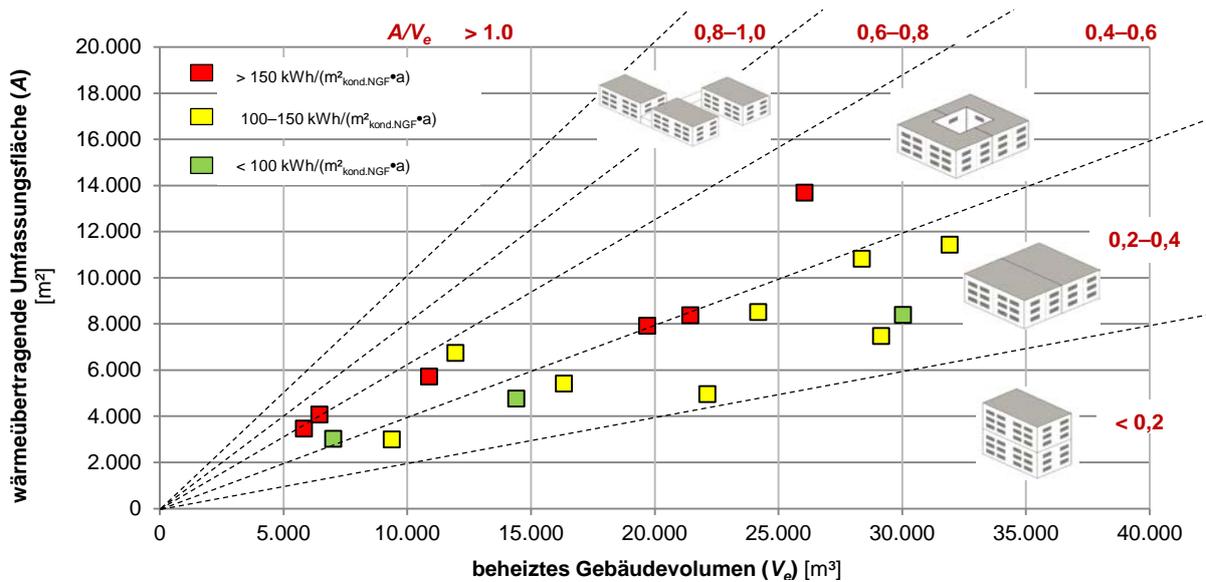
### 4.4.1 Wärmeverbrauch

Die Gebäudekompaktheit beschreibt das Verhältnis der wärmeübertragenden Umfassungsfläche ( $A$ ) zum beheizten Gebäudevolumen ( $V_e$ ). Das  $A/V_e$ -Verhältnis bezeichnet die Gegenüberstellung der Umfassungsfläche zum beheizten Gebäudevolumen. Die wärmeübertragende Umfassungsfläche ( $A$ ) stellt sich als Systemgrenze zwischen dem thermisch konditionierten Raum und der Außenluft, dem Erdreich sowie thermisch nicht konditionierten Räumen dar. Über die thermische Gebäudehülle treten Transmissionswärmeverluste ( $Q_T$ ) sowie Lüftungswärmeverluste ( $Q_V$ ) aufgrund von Undichtigkeiten an der Gebäudehülle sowie der Sicherstellung des Mindestaußenluftvolumenstroms ( $\dot{V}_{A, \text{sol}}$ ) auf. Aufgrund der Wärmeabgabe der sich im Gebäude befindenden Personen und technischen Geräte entstehen interne Gewinne ( $Q_i$ ). Der Eintrag passiv-solarer Wärmemengen ( $Q_S$ ) erfolgt über die transparenten Bauteile der Gebäudehülle.

Die in der Feldstudie untersuchten Schulgebäude weisen  $A/V_e$ -Verhältnisse von  $0,22$  bis  $0,63 \text{ m}^{-1}$  auf. In den Bildungsstätten mit einem  $A/V_e$ -Verhältnis von  $0,2$  bis  $0,4 \text{ m}^{-1}$  beträgt der Endenergieverbrauch (Heizen)  $80$  bis  $150 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Die Gebäudeformen entsprechen dem eines Solitärs und stellen eine höhere Gebäudekompaktheit gegenüber den Schulgebäuden dar, die in Trakte aufgeteilt sind (z.B. „Kammtyp“).

Die „Traktbauten“ weisen eine Gebäudekompaktheit  $> 0,4 \text{ m}^{-1}$  auf. Der Endenergieverbrauch (Heizen) dieser Gebäude beläuft sich auf  $150$  bis  $250 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Folglich führt eine höhere Gebäudekompaktheit zu geringeren Heizwärmeverbräuchen (Abbildung 28).

Demnach ist das  $A/V_e$ -Verhältnis neben der energetischen Bewertung der thermischen Gebäudehülle, der Gebäudedichtheit sowie der Anlagentechnik ein aussagekräftiger Parameter zur Beurteilung der energetischen Qualität von Gebäuden.

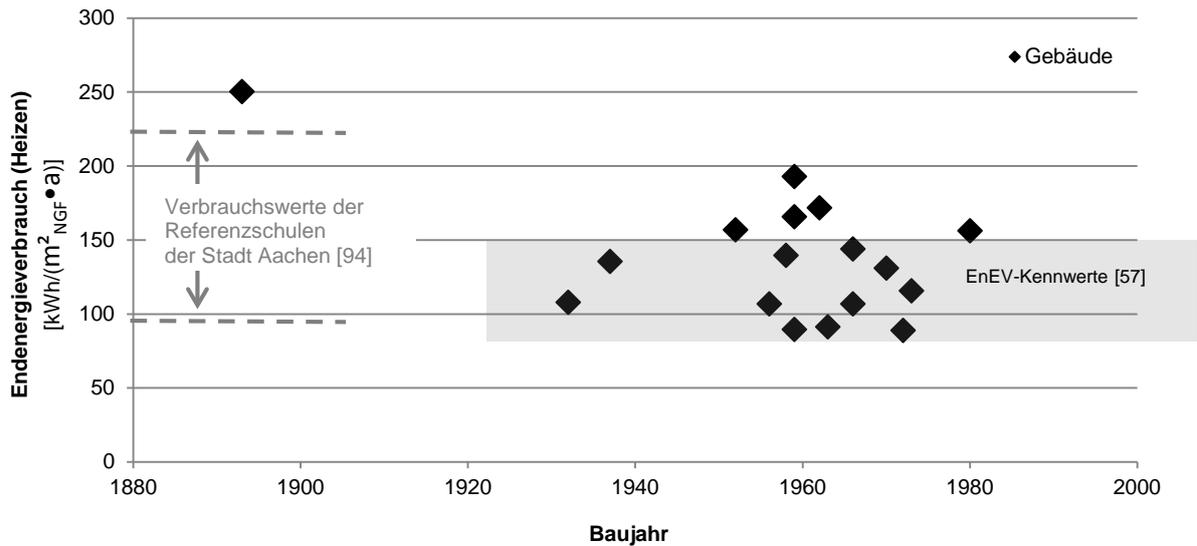


**Abbildung 28** Endenergieverbrauch (Heizen) in Abhängigkeit des  $A/V_e$ -Verhältnisses

Die folgende Untersuchung vergleicht den witterungsbereinigten Endenergieverbrauch (Heizen) der untersuchten Bildungsstätten mit bereinigten Verbrauchswerten von Referenzschulgebäuden der Stadt Aachen (vgl. [94] S. 6). Die Anzahl der Referenzgebäude beläuft sich auf 71 Schulen, die einen durchschnittlichen Verbrauch von  $164,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$  aufweisen<sup>19</sup>. Diese Werte sind mit den Wärmeverbräuchen der untersuchten Schulen vergleichbar.

Die Gegenüberstellung der erhobenen Daten mit Vergleichswerten nach EnEV 2007 ( $115\text{--}150 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$ ) und EnEV 2009 ( $80\text{--}105 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$ ) (vgl. [57] S. 22 ff.) ergibt ebenfalls eine Übereinstimmung. Anhand des Wärmeverbrauchs kann jedoch kein Baualter nachgewiesen werden. Abbildung 29 vergleicht die witterungsbereinigten Endenergieverbrauch (Heizen) mit den Verbrauchswerten der Referenzgebäude der Stadt Aachen (vgl. [94] S. 6) sowie den EnEV-Kennwerten (vgl. [57] S. 22 ff.).

<sup>19</sup> In der Veröffentlichung der Stadt Aachen wird die BGF als Energiebezugsfläche angegeben. Zur einheitlichen Gegenüberstellung mit den EnEV-Kennwerten [57] sowie den Verbrauchswerten der untersuchten Bildungsstätten werden die Verbrauchswerte der Stadt Aachen [94] mit einem NGF/BGF-Verhältnis von 0,83 [-] angepasst (vgl. Kap. 4.1.1).



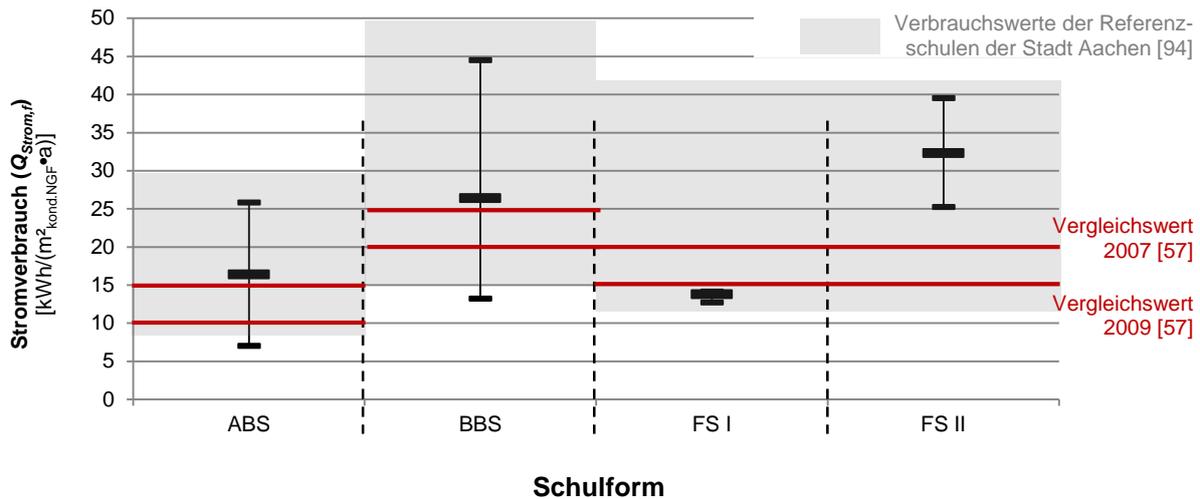
**Abbildung 29** Vergleich der witterungsbereinigten Endenergieverbräuche (Heizen) mit den Verbrauchswerten der Referenzgebäude [94] sowie den EnEV-Kennwerten [57]

#### 4.4.2 Stromverbrauch

Die Erfassung des Jahresstromverbrauchs ( $Q_{Strom,t}$ ) erfolgt gebäudeweise. Ein Vergleich des erfassten Stromverbrauchs der Schulgebäude aus der Feldstudie mit den Verbräuchen von Referenzschulgebäuden der Stadt Aachen (vgl. [94] S. 7) sowie mit den EnEV-Verbrauchskennwerten (vgl. [57] S. 22 ff.) lässt eine Bewertung zwischen den unterschiedlichen Schulformen zu. Ein gebäudebezogener Vergleich ist aufgrund unterschiedlicher Ausstattung der Gebäude nicht aussagekräftig.

Die ABS weisen den geringsten Jahresstromverbrauch mit einem Durchschnittswert von 16,4 kWh/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a) auf. Der Stromverbrauch der BBS beträgt 26,4 kWh/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a). Bei der Bewertung der FS werden die Förderschwerpunkte „Lernen“ (FS I) und „geistige Entwicklung“ (FS II) getrennt betrachtet. Der mittlere Jahresstromverbrauch der FS I ist mit dem durchschnittlichen Verbrauch der ABS zu vergleichen. Der hohe Betreuungsaufwand sowie die dezentrale Bereitstellung von Trinkwarmwasser begründet den hohen Verbrauch der FS II mit durchschnittlich 32,3 kWh/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a). Die Betreuung der Schüler erfordert den Einsatz von elektrischen Haushaltsgeräten. Diese tragen zum hohen Stromverbrauch bei.

Die BBS zeigen aufgrund unterschiedlicher Ausbildungsschwerpunkte und installierter Ausstattungen zum nutzungsspezifischen Lehrbetrieb die größte Varianz im Verbrauch auf. Die Stromverbräuche der Referenzgebäude der Stadt Aachen (vgl. [94] S. 7) sind mit den Verbräuchen der untersuchten Schulgebäude sowie den EnEV-Kennwerten (vgl. [57] S. 22 ff.) zu vergleichen (Abbildung 30).



**Abbildung 30** Stromverbrauch der Bildungsstätten im Vergleich mit den Referenzgebäuden der Stadt Aachen [94] sowie den Vergleichswerten [57]

Eine detaillierte Aufschlüsselung zur Verbrauchserfassung einzelner anlagentechnischer Systeme innerhalb der Gebäude ist aufgrund fehlender Strommengenähler nicht möglich. Die Anwendung der DIN V 18599 [23] ermöglicht einen Vergleich einzelner Anlagen anhand der Bedarfswerte. Der Strombedarf zur Beleuchtung der untersuchten Gebäude ( $Q_{L,e}$ ) beläuft sich auf durchschnittlich  $4,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Die Hilfsenergien ( $Q_{h,aux}$ ), weisen einen Bedarf von  $1,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$  auf. Der Strombedarf zur Trinkwarmwasseraufbereitung in den Sanitärbereichen und Klassenräumen der FS II beträgt durchschnittlich  $12,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Dieser Bedarf stellt sich als Näherungswert dar, da die dezentralen Durchlauferhitzer lediglich die Trinkwarmwasseraufbereitung in zwei Gebäuden sicherstellt.

Die Differenz aus dem erfassten Jahresstromverbrauch und der Summe der Bedarfswerte der anlagentechnischen Systeme bilden näherungsweise den „Nutzerstrom“ ab. Der durchschnittliche Bedarf beträgt in den untersuchten Schulen  $9,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$  und weist eine hohe Varianz auf, da das Nutzerverhalten der Lehrer und Schüler sowie die Ausstattung der Räume die Höhe des Stromverbrauchs beeinflussen. Tabelle 25 zeigt den Strombedarf einzelner anlagentechnischer Systeme sowie den „Nutzerstrom“.

**Tabelle 25** Nach anlagentechnischen Systemen separierter Strombedarf ( $Q_{Strom,t}$ ) sowie „Nutzerstrom“

Technische Anlage	Beleuchtung ( $Q_{L,t}$ ) [kWh/(m <sup>2</sup> <sub>kond.NGF</sub> •a)]	HE ( $Q_{h,aux}$ ) [kWh/(m <sup>2</sup> <sub>kond.NGF</sub> •a)]	Trinkwarmwasser ( $Q_{TWW,t}$ )* [kWh/(m <sup>2</sup> <sub>kond.NGF</sub> •a)]	„Nutzerstrom“ $Q_f$ [kWh/(m <sup>2</sup> <sub>kond.NGF</sub> •a)]
Minimum	3,6	0,8	9,1	0,6
<b>Mittelwert</b>	<b>4,3</b>	<b>1,3</b>	<b>12,0</b>	<b>9,7</b>
Maximum	5,2	1,8	14,0	31,4

\* in den Förderschulen II

#### 4.4.3 Primärenergieverbrauch / CO<sub>2</sub>-Emissionen

Die Beheizung der Gebäude mit Strom stellt sich als primärenergetisch ineffizienteste Variante dar. Der Aufwand von zusätzlich 160 % an Energien für vorgelagerte Prozessketten resultiert aus dem Wärme- und Stromverbrauch ( $Q_f$ ) der Gebäude. Die Verwendung von Gas und Öl als Energieträger zur Wärmebereitstellung bedingt eine primärenergetisch bessere Bilanz. Dem Verbrauch aus dem Gebäudebetrieb lagern zusätzlich 21 % bzw. 30 % an Energien vor. Die Beheizung des Gebäudes mit Fernwärme stellt sich, unter den in den unsanierten Schulgebäuden umgesetzten Versorgungskonzepten, als primärenergetisch sinnvollste Variante dar. Die Emission von Kohlendioxid lässt neben der primärenergetischen Betrachtung eine weitere Bewertung der Umwelteinwirkung durch den Gebäudebetrieb zu. Die Beheizung der Schulen mit Fernwärme inklusive des Stromverbrauchs emittiert im Durchschnitt 44,1 kgCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a). Die Verwendung von Gas erhöht den Ausstoß auf 47,5 kgCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a) und die Nutzung von Öl auf 55,6 kgCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a). Die elektrische Direktheizung weist die höchste CO<sub>2</sub>-Emission von 101,3 kgCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a) auf. Abbildung 31 zeigt die Auswirkung der eingesetzten Energieträger auf den Primärenergieverbrauch.

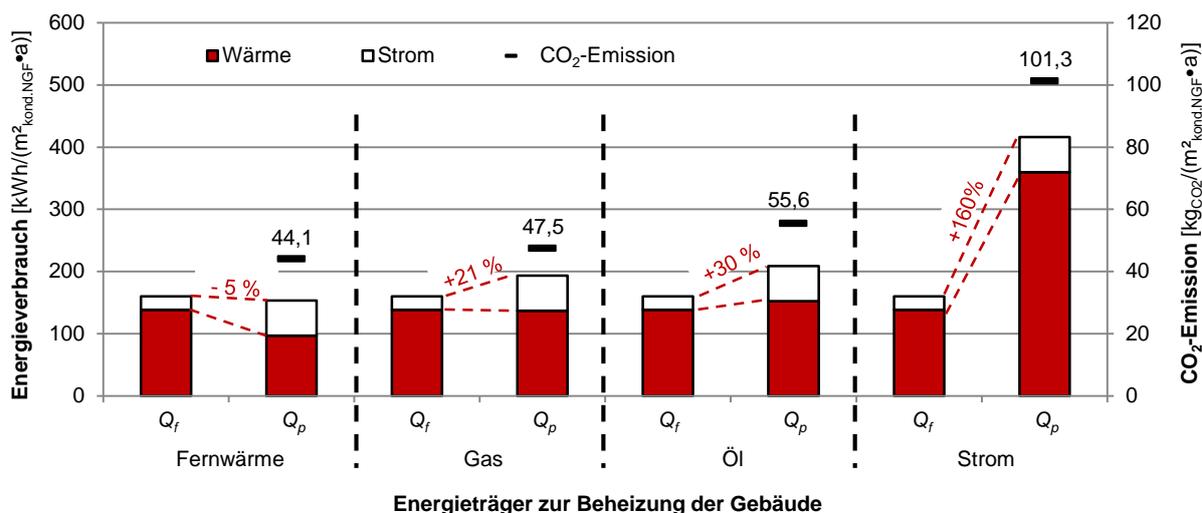


Abbildung 31 Auswirkung der Energieträger auf den Primärenergieverbrauch ( $Q_p$ ) sowie die CO<sub>2</sub>-Emissionen

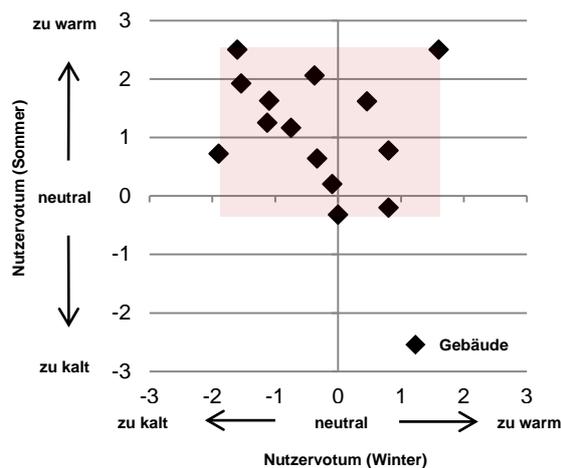
## 4.5 Nutzerakzeptanz der unsanierten Gebäude

### 4.5.1 Bewertung des Innenraumkomforts anhand des Nutzervotums

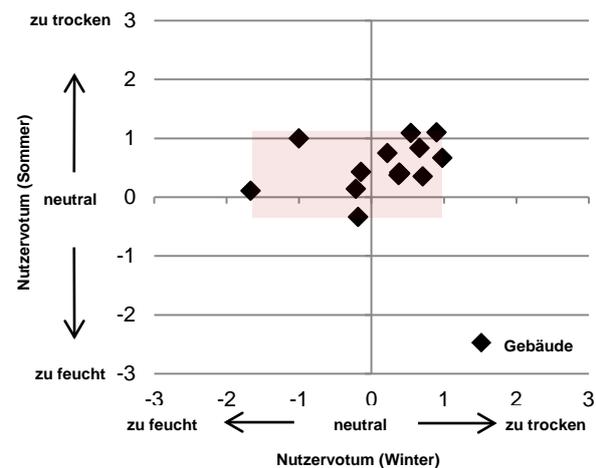
Die Nutzer bewerten den thermischen Innenraumkomfort im Winter von „kalt“ (-2) bis „warm“ (+2). Größtenteils stellen sich in der Winterzeit zu kalte und im Sommer zu warme Innenraumtemperaturen ( $\theta_{i,ar}$ ) ein. Die Nutzer empfinden in einigen Gebäuden die Innenraumtemperaturen im Sommer als „neutral“ und im Winter als „zu warm“. Die Umfragen zum thermischen Innenraumkomfort zeigen keine einheitliche Tendenz. Das durchschnittliche Votum im Winter

beträgt  $-0,37 [-]$  und im Sommer  $1,18 [-]$ . Nach Nutzervotum treten in den untersuchten Gebäuden häufiger Probleme aufgrund einer Raumüberhitzung im Sommer als durch eine Unterkühlung der Schulräume im Winter auf (Abbildung 32).

Das durchschnittliche Votum zur Luftfeuchtigkeit in den Schulen beträgt im Winter  $0,14 [-]$  und im Sommer  $0,52 [-]$ . Diese Werte befinden sich gegenüber der empfundenen Lufttemperatur in den Innenräumen ( $\theta_i$ ) im neutralen Bereich, da die relative Luftfeuchtigkeit ( $\varphi$ ) schwerer zu empfinden ist. Die Umfragen verzeichnen im Gegensatz zur Lufttemperatur keine Einschränkungen des hygrischen Komforts in den unsanierten Schulgebäuden (Abbildung 33).

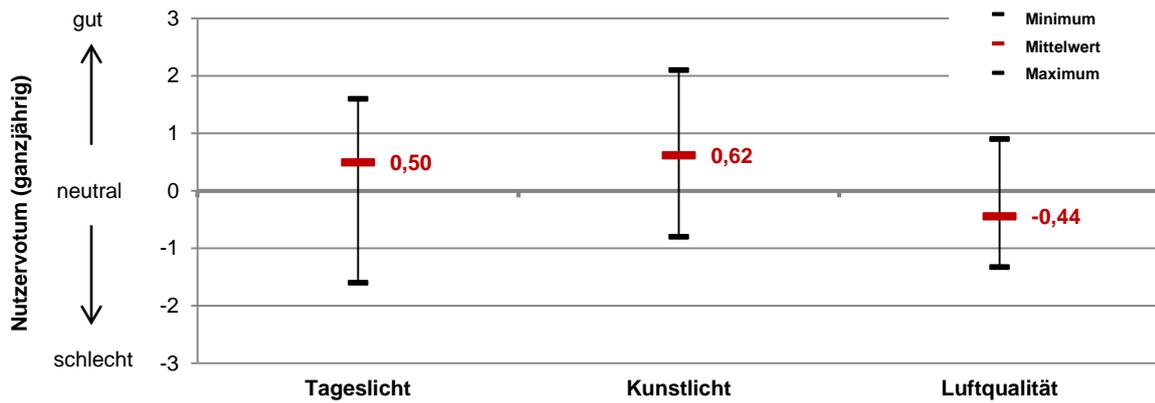


**Abbildung 32** Bewertung der Lufttemperatur in den Innenräumen ( $\theta_{i,ar}$ ) der Bildungsstätten (Anzahl der befragten Lehrer:  $n = 287$ )



**Abbildung 33** Bewertung der Luftfeuchtigkeit in den Innenräumen ( $\varphi$ ) der Bildungsstätten (Anzahl der befragten Lehrer:  $n = 287$ )

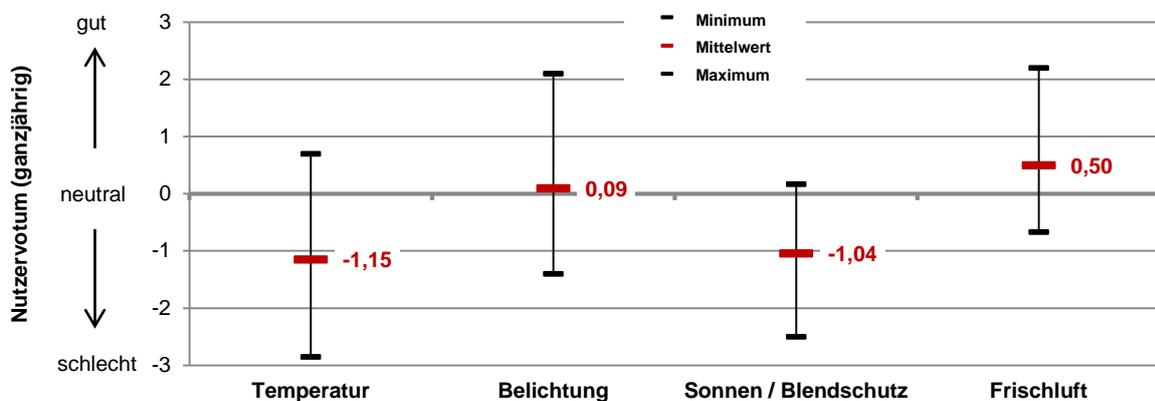
Die Nutzerbefragung beinhaltet zudem die Komfortparameter zur Belichtung und Belüftung der Räume. In den unsanierten Gebäuden tritt eine hohe Varianz des Ergebnisses zur Tages- und Kunstlichtversorgung auf. Das Votum liegt in einem Bereich von  $-1,60$  bis  $2,10 [-]$  und weist einen durchschnittlichen Wert von  $0,50 [-]$  (Tageslicht) bzw.  $0,62 [-]$  (Kunstlicht) auf. Die Umfrage stellt keine Abhängigkeit des Fensterflächenanteils unterschiedlicher Fassadentypen (Loch- oder Band-/Skelettfassade) zur Bewertung der Tageslichtqualität fest (Abbildung 34). Die Bewertung der Luftqualität ergibt mit einem Durchschnitt von  $-0,44 [-]$  das schlechteste Ergebnis.



**Abbildung 34** Bewertung der Tages- und Kunstlichtversorgung sowie der Luftqualität in den Schulgebäuden (Anzahl der befragten Lehrer: n = 287)

#### 4.5.2 Bewertung der Regulierbarkeit von Komfortparametern

Die Regulierung der Temperaturen in den Innenräumen sowie die Benutzung eines einwandfrei funktionierenden Sonnen- bzw. Blendschutzsystems scheinen in den Schulen Probleme zu verursachen. Das durchschnittliche Nutzervotum liegt in den Schulen bei -1,15 [-] (Regulierung der Temperatur), bzw. bei -1,04 [-] (Regelung von Sonnen- und Blendschutz) und ist als „neutral“ bis „schlecht“ zu bewerten. Die Gebäudenutzer bewerten die Belichtung der Lehrräume sowie die Zufuhr von Frischluft mit „neutral“, obwohl auch hier eine hohe Varianz vorliegt (Abbildung 35).



**Abbildung 35** Bewertung der Regulierbarkeit von Komfortparametern (Anzahl der befragten Lehrenden: n = 287)

#### 4.6 Zusammenfassung zur Bestandsaufnahme der unsanierten Gebäude

Der Anteil der zwischen den 1950er und 1970er Jahren errichteten Schulen beträgt zwei Drittel aller untersuchten Gebäude. Fünf Gebäude wurden nach 1970 und drei Bildungsstätten vor dem Zweiten Weltkrieg errichtet. Diese historische Verteilung ist mit dem Schulbaubestand in Deutschland nach Studien des Bremer Energie-Instituts (vgl. [9] S. 31 f.; [20] S. 169) vergleichbar.

Die Einordnung der Gebäude in Baualtersklassen deckt eine Veränderung der Gebäudekubaturen von Beginn des 20. Jahrhunderts bis heute auf. Drei- bis fünfgeschossige Baukörper bilden das kasernenartige Erscheinungsbild der Schullandschaft am Ende des 19. Jahrhunderts. Die Kompaktheit dieser Gebäude beträgt  $< 0,4 \text{ m}^{-1}$ . Eine Verringerung der Gebäudehöhe bei gleichzeitiger Erhöhung der bebauten Fläche ist zu erkennen. Die ein- bzw. zweigeschossige Flachbauweise ab den 1970er Jahren weist Nettogrundflächen von über  $20.000 \text{ m}^2$  auf und führt zu einer Verringerung der Kompaktheit auf  $> 0,6 \text{ m}^{-1}$ .

Der bauliche Wärmeschutz entspricht größtenteils der Qualität des Errichtungszeitraums. Eine Reduzierung des mittleren Transmissionswärmeverlustes ( $H'_{\tau}$ ) von  $2,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  auf  $1,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  ist in Abhängigkeit des Baualters von 1880 bis 1980 ersichtlich. Die Verringerung kann einerseits auf die Einführung von gesetzlichen und normativen Vorgaben, andererseits auf die Entwicklung neuer Materialien und Fertigungsprozesse zurückgeführt werden.

Die 1-fach bzw. 2-fach verglasten Fenster weisen unter allen untersuchten Bauteilen die höchsten Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U_w$ ) auf. Mit dem Einbau von Fenstern mit 2-facher Isolierverglasung ab den 1970er Jahren ist eine Reduzierung des  $U_w$ -Wertes von über  $5,0$  auf  $3,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  erkennbar.

Die opaken Bauteile weisen ebenfalls eine energetische Verbesserung auf und erfüllen größtenteils die Anforderungen der jeweils zum Errichtungszeitpunkt gültigen DIN 4108-2 [21]; [78]; [79]; [80] (Tabelle 3). Vor allem bei den Dächern ist eine Reduzierung der Transmissionswärmeverluste zu erkennen. Während die um 1900 errichteten Dächer einen U-Wert von  $1,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  aufweisen, beträgt die thermische Qualität der in den 1970er Jahren errichteten Flachdächern  $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . An Außenwänden und Kellerdecken ist nur eine geringere Verbesserung zu erkennen. Die Gebäude halten die aktuell gültigen normativen und gesetzlichen Anforderungen der maximalen mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten nach EnEV 2014 [8] nicht ein.

Die Wärmeerzeugung geschieht in den untersuchten Gebäuden unter Einsatz fossiler Energieträger. In urbanen Gebieten erfolgt die Versorgung aus dem Prozess der KWK. Gasbefeuerte Kessel bzw. der Anschluss an bestehende Fernwärmenetze stellen die Wärme in 15 der

17 Schulen bereit. Nachtspeicheröfen und Ölkessel kommen in jeweils einem Schulgebäude zum Einsatz.

In den Gebäuden verteilen Umwälzpumpen die Heizwärme in geschlossenen Zweirohrsystemen. Größtenteils sind die Leitungen ungedämmt. Die dokumentierten Vorlauftemperaturen betragen in diesen Systemen bis zu 100 °C. Die Übergabe der Heizwärme an den Raum geschieht ausnahmslos über Radiatoren. Flächenheizsysteme zur Übergabe finden in den unsanierten Schulen keine Anwendung.

Neben den Wärmeverlusten über die Gebäudehülle deckt die Analyse hohe Verluste innerhalb der Heizungssysteme auf. Von der Wärmeerzeugung bzw. -übergabe an das Gebäude ( $Q_{h,f}$ ) bis zur Übergabe an den Raum betragen die Verluste nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 2 und 5) bis zu 43 %.

Die Belüftung der unsanierten Bildungsstätten erfolgt ausschließlich über die Fenster. Der Einsatz raumluftechnischer Anlagen mit wärmerückgewinnenden Systemen findet keine Anwendung. Aus der Fensterlüftung resultieren hohe Lüftungswärmeverluste, die neben den Transmissionswärmeverlusten zur Steigerung des Heizwärmeverbrauchs beitragen.

Die Norm-Heizlast ( $\Phi_{HL}$ ) der Schulen beträgt nach DIN EN 12831 [86] im Mittel 150 W/m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>. Aus der Fensterlüftung resultiert eine anteilige Last von 23 %. Die Transmissionswärmeverluste über die Bauteile bilden den höchsten Anteil von 58 %. Der infiltrationsbedingte Luftaustausch und die Wiederaufheizleistung verursachen 11 % bzw. 8 %.

In den Sanitärbereichen der ABS und BBS besteht nur ein Kaltwasserbedarf. Bei drei Schulgebäuden steht eine Sporthalle in räumlichem Zusammenhang. Anhand messtechnischer Untersuchungen ist der Warmwasserverbrauch in den Sporthallen gegenüber den Heizenergieverbräuchen als gering und das Nutzerverhalten der Schüler und Nutzer in den abendlichen Stunden als sparsam einzustufen.

Die Ausnahme bildet der Trinkwarmwasserbedarf in den Förderschulen mit dem Lehrschwerpunkt „geistige Entwicklung“. Begründet wird der hohe Warmwasserbedarf mit dem erhöhten Pflege- und Betreuungsaufwand der Schüler. In diesen Schulen erfolgt die Trinkwarmwasserbereitung über dezentrale Durchlauferhitzer.

Aus der Gebäudereinigung<sup>20</sup> ist ein zusätzlicher Warmwasserbedarf in allen Gebäuden festzustellen. Die Deckung geschieht ebenfalls über dezentrale Durchlauferhitzer. Dieser Bedarf ist hierbei zu vernachlässigen.

---

<sup>20</sup> Zum Zeitpunkt der Bestandsaufnahmen wird kein Mensabetrieb angeboten und dementsprechend liegt kein Trinkwarmwasserbedarf vor.

Die Bestandsaufnahme beschreibt den Einfluss der Gebäudekompaktheit ( $A/V_e$ ) auf den Endenergieverbrauch (Heizen) von durchschnittlich  $140 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Die Gebäude mit einer Kompaktheit von  $< 0,4 \text{ m}^{-1}$  weisen einen Verbrauch von 80 bis  $150 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$  auf. Der Verbrauch der Schulen mit einer Kompaktheit  $> 0,4 \text{ m}^{-1}$  beträgt  $> 150 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Die vorliegende Datenbasis lässt keine Aussage über die Abhängigkeit von Baualter und Heizwärmeverbrauch zu.

In der Deckenverkleidung integrierte Leuchten belichten die Klassenräume mit direktem Kunstlicht. Die Leuchtstofflampen mit konventionellen Vorschaltgeräten (KVG) sind über zwei bzw. drei Reihen manuell schaltbar und parallel zur Fassade angeordnet.

Eine hohe Varianz der gebäudespezifischen Stromverbräuche zum Mittelwert und eine Abhängigkeit des Verbrauchs zur Schulform sind festzustellen. Die höchsten Verbräuche weisen die berufsbildenden Schulen auf. Aus dem Betrieb nutzungsspezifischer Ausstattungen (Prozessenergien) sind diese hohen Verbräuche zu begründen. Die allgemeinbildenden Schulen sowie die Förderschulen mit dem Lehrschwerpunkt „Lernen“ weisen geringe Verbräuche auf. Durchschnittlich beträgt der Stromverbrauch  $22 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Förderschulen mit dem Lehrschwerpunkt „geistige Entwicklung“ weisen aufgrund der elektrischen Warmwasserbereitung ebenfalls einen hohen Stromverbrauch auf. Tabelle 26 zeigt den Stromverbrauch getrennt nach Schulform.

**Tabelle 26** Stromverbrauch getrennt nach Schulform

Schulform	Allgemeinbildende Schulen (ABS)	Berufsbildende Schulen (BBS)	Förderschulen Schwerpunkt „Lernen“	Förderschulen Schwerpunkt „geistige Entwicklung“
Stromverbrauch [kWh/(m <sup>2</sup> <sub>kond.NGF</sub> •a)]	16	26	14	32

Der durchschnittliche Primärenergieverbrauch variiert nach Schulform und Art der Wärmeerzeugung von  $130$  bis  $400 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Analog hierzu betragen die  $\text{CO}_2$ -Emissionen  $44$  bis  $101 \text{ kgCO}_2/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ .

Das Nutzervotum zeigt Störungen des thermischen Innenraumkomforts auf. Tendenziell wird die Lufttemperatur im Sommer als zu warm und im Winter als zu kalt empfunden. Das Nutzervotum zeigt keine Störung des hygrischen Komforts auf. Die Ergebnisse zeigen eine schlechte Regulierbarkeit von Innenraumtemperaturen und Sonnenschutz. Der Einfluss der Nutzer auf die Beleuchtung und Frischluftzufuhr wird besser bewertet. Eine mögliche Steigerung des Innenraumkomforts durch die energetischen Sanierungsmaßnahmen wird in den nächsten Arbeitsschritten betrachtet.

## 5 ERGEBNISSE AUS DER ANALYSE DER SANIERUNGSMÄßNAHMEN

### 5.1 Beschreibung der energetischen Sanierungsmaßnahmen

Die Sanierungen der Bildungsstätten fanden in den Jahren von 2008 bis 2010 statt und unterlagen den Anforderungen der EnEV 2007 (vgl. [6] Anl. 2) bzw. EnEV 2009 (vgl. [7] Anl. 2). Die EnEV-Konformität der evaluierten Maßnahmen wurde im Bilanzierungsverfahren (EnEV 2007) mit einer Unterschreitung der Anforderungen an den Primärenergiebedarf ( $Q_p$ ) sowie der Transmissionswärmeverluste um 30 % geführt. Die Sanierungen nach EnEV 2009 wurden im Bauteilverfahren und einer Verschärfung der Anforderungen von 30 % nachgewiesen.

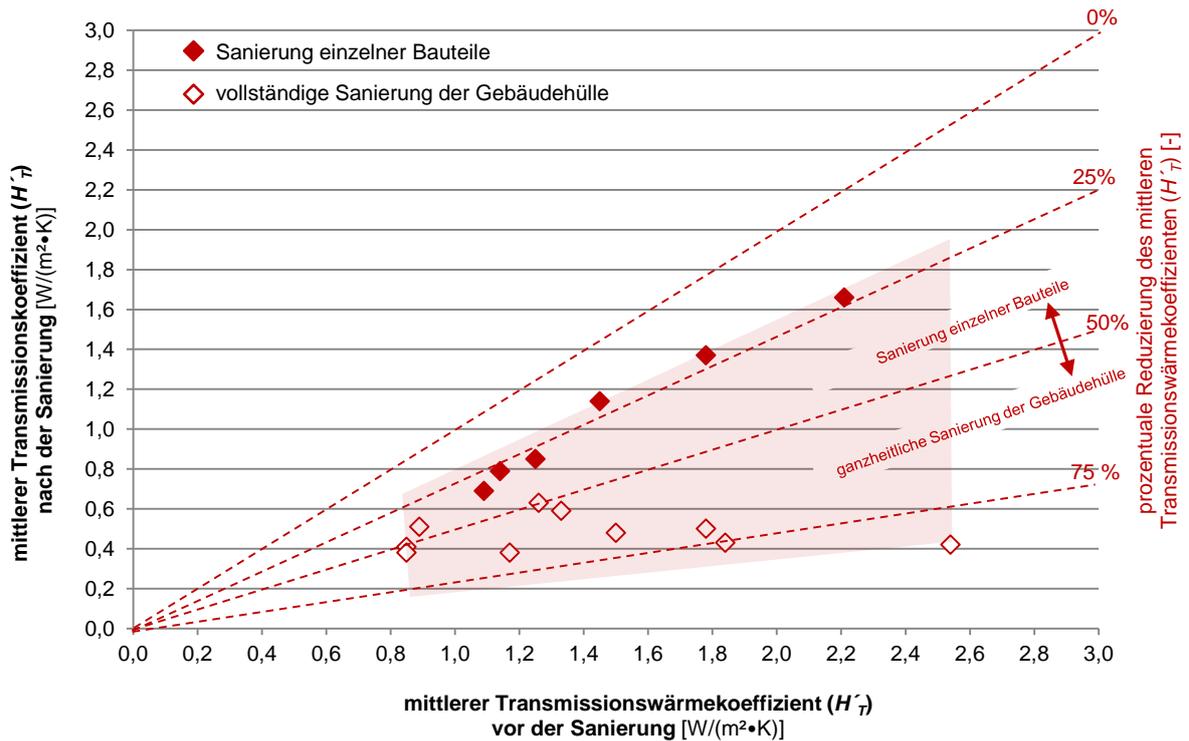
Die Evaluierung der Schulsanierungen beläuft sich auf insgesamt 17 Gesamt- und 76 Einzelmaßnahmen (Tabelle 27).

**Tabelle 27** Anzahl und Art der energetischen Einzelsanierungsmaßnahmen

Maßnahme	Baukonstruktion				Anlagentechnik		
	Dächer / Decken	Kellerdecken	Außenwände	Fenster	RLT	Heizung	Beleuchtung
Anzahl	16	5	12	19	8	9	7

#### 5.1.1 Gebäudehülle

Die in Kapitel 4.2 ermittelte Qualität des baulichen Wärmeschutzes der unsanierten Gebäudehüllen weist mittlere Transmissionswärmeverluste ( $H'_T$ ) von 0,85 bis 2,54 W/(m<sup>2</sup>•K) auf. Die mittleren Transmissionswärmeverluste ( $H'_T$ ) der sanierten Gebäude betragen 0,38 bis 1,66 W/(m<sup>2</sup>•K). An den vollständig sanierten Gebäudehüllen ist eine Verringerung dieser Verluste um mindestens 50 % festzustellen. Die Sanierung einzelner Bauteile erzielt eine geringere Reduzierung der Transmissionswärmeverluste (Abbildung 36).



**Abbildung 36** Mittlerer Transmissionskoeffizient ( $H_T$ ) vor und nach den Sanierungsmaßnahmen sowie prozentuale Verbesserung gegenüber dem unsanierten Zustand

Die in Kapitel 4.2 ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten der unsanierten Bauteile dienen als Grundlage zur Bewertung der Maßnahmen.

### 5.1.1.1 Dächer / oberste Geschossdecken

Das Aufbringen von Dämmebenen mit einer wasserführenden Schicht erfolgt auf die zur Außenluft grenzenden Flachdächer als „Warmdach“.

Die Zwischen- oder Untersparrendämmung ermöglicht die Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes von bestehenden Schrägdächern. Diese grenzen an unbeheizten Dachraum bzw. an beheizte Aufenthaltsräume im Dachgeschoss. Das Einbringen von Dampfsperren verhindert den möglichen Tauwasserausfall auf und in den Bauteilen. Die Dämmung der obersten Geschossdecken gegen unbeheizten Dachraum geschieht oberseitig.

Die EnEV 2007 (vgl. [6] Anl. 3) und EnEV 2009 (vgl. [7] Anl. 3) sowie die DIN 4108-2 (vgl. [48] S. 15) trennen die Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz von Flach- sowie Schrägdächern. Bei der Sanierung von Flachdächern beträgt die Mindestdämmschichtstärke zur Einhaltung der EnEV 2009 mit einer Wärmeleitgruppe (WLG) 0,035  $W/(m \cdot K)$  15 cm und bei Dachschrägen 13 cm. Die Anforderung an die Bauteile ist gegenüber der EnEV 2007 verschärft.

Tabelle 28 zeigt die nach EnEV 2007 und 2009 maximal zulässigen Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) bei der Erneuerung von Flachdächern und Dachschrägen sowie die notwendigen Dämmschichtstärken.

**Tabelle 28** Nach Energieeinsparungsverordnung 2007 / 2009 maximal zulässige Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) von Flachdächern und Dachschrägen bei Bauteilsanierung

Anforderung	maximal zulässiger Wärmedurchgangskoeffizient [ $W/(m^2 \cdot K)$ ] (Anlage 3; Tab.1)	erforderliche Dämmschichtstärke (WLG 035) [cm]
EnEV 2007 (Flachdach)	0,25	12
EnEV 2009 (Flachdach)	0,20	15
EnEV 2007 (Dachschräge)	0,30	10
EnEV 2009 (Dachschräge)	0,24	13

Der durchschnittliche Wärmedurchgangskoeffizient der unsanierten Dächer beträgt  $1,5 W/(m^2 \cdot K)$ . Dieser Wert entspricht der energetischen Qualität von ungedämmten Dächern der 1960er Jahre (vgl. [59] Kap. 3.2.4, S. 4 ff.). Die Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) der sanierten Dachkonstruktionen betragen  $0,08$  bis  $0,25 W/(m^2 \cdot K)$  und weisen einen Mittelwert von  $0,16 W/(m^2 \cdot K)$  auf.

Die zur Reduzierung der Transmissionswärmeverluste ( $Q_T$ ) aufgebrachten Dämmschichtstärken betragen  $12$  bis  $34$  cm. Abbildung 37 zeigt die Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) der sanierten Dächer und obersten Geschossdecken sowie die Dämmschichtstärken. Die Sanierungsmaßnahmen erfüllen die Anforderungen der zum Sanierungszeitraum gültigen EnEV sowie der DIN 4108-2 (vgl. [48] Tab. 3, S. 15).

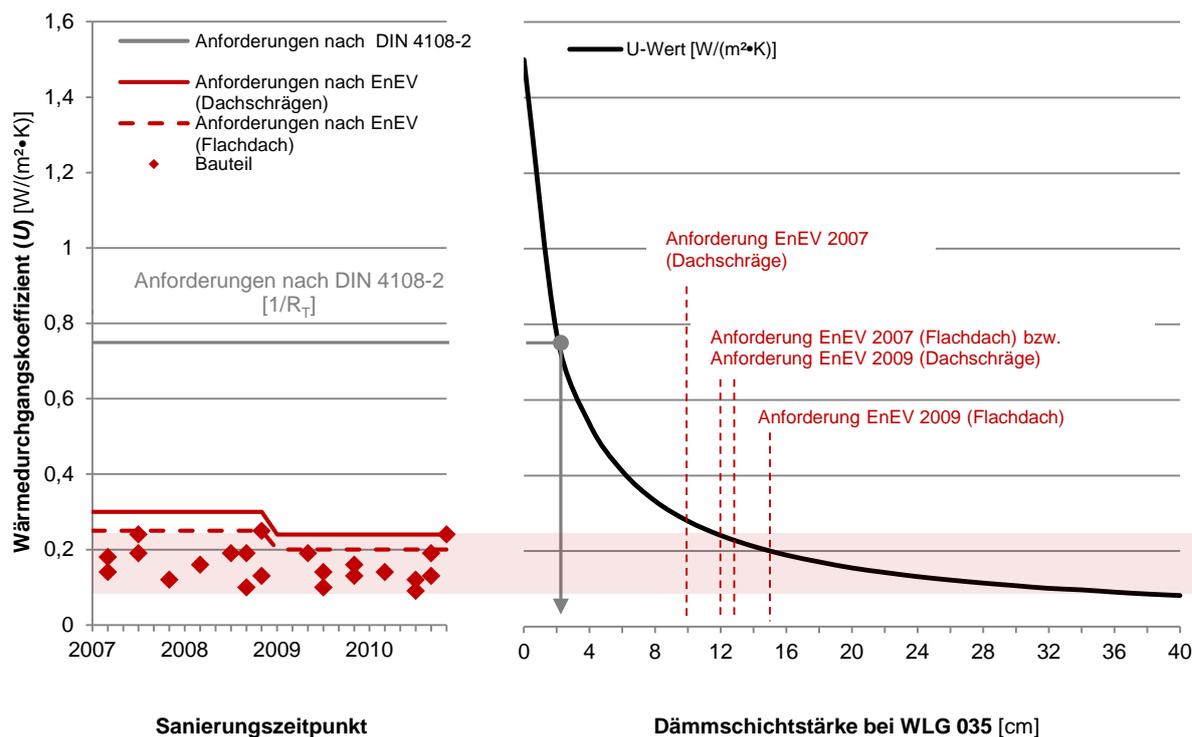


Abbildung 37 Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) der sanierten Dächer und obersten Geschossdecken

### 5.1.1.2 Kellerdecken

Die unterseitig aufzutragenden Dämmebenen bewirken eine Verringerung der in Kapitel 4.2 ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) von Geschossdecken zu unbeheizten Kellerräumen. Das Aufbringen der Dämmung stellt sich aufgrund der Zugänglichkeit an die Bauteile sowie eines geringen Konstruktionsaufwandes als vorteilhaft dar.

Die EnEV 2007 (vgl. [6] Anl. 3) und EnEV 2009 (vgl. [7] Anl. 3) sowie die DIN 4108-2 (vgl. [48] Tab. 3, S. 15) stellt die Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz von Kellerdecken. Die Einhaltung der EnEV-2007-Anforderungen verlangt bei der Erneuerung dieser Bauteile eine Dämmschichtstärke von 4 cm. Die EnEV 2009 fordert 8 cm (Tabelle 29).

Tabelle 29 Nach Energieeinsparungsverordnung 2007 / 2009 maximal zulässige Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) von Kellerdecken bei Bauteilsanierung

Anforderung	maximal zulässiger Wärmedurchgangskoeffizient [ $W/(m^2 \cdot K)$ ] (Anlage 3; Tab.1)	erforderliche Dämmschichtstärke (WL 035) [cm]
EnEV 2007 (Kellerdecke)	0,50	4
EnEV 2009 (Kellerdecke)	0,30	8

Der durchschnittliche Wärmedurchgangskoeffizient von unteren Geschossdecken der untersuchten Schulen beträgt  $1,1 W/(m^2 \cdot K)$ . Die U-Werte der sanierten Kellerdecken betragen  $0,13$

bis  $0,44 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  und weisen einen Mittelwert von  $0,27 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  auf, was einer aufgetragenen Dämmschichtenstärke von 4 bis 24 cm entspricht. Abbildung 38 zeigt die Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) der sanierten Kellerdecken sowie die Anforderungen und notwendigen Dämmschichtstärken. Die Sanierungsmaßnahmen erfüllen die Anforderungen der zum Sanierungszeitraum gültigen EnEV sowie der DIN 4108-2 (vgl. [48] Tab. 3, S. 15).

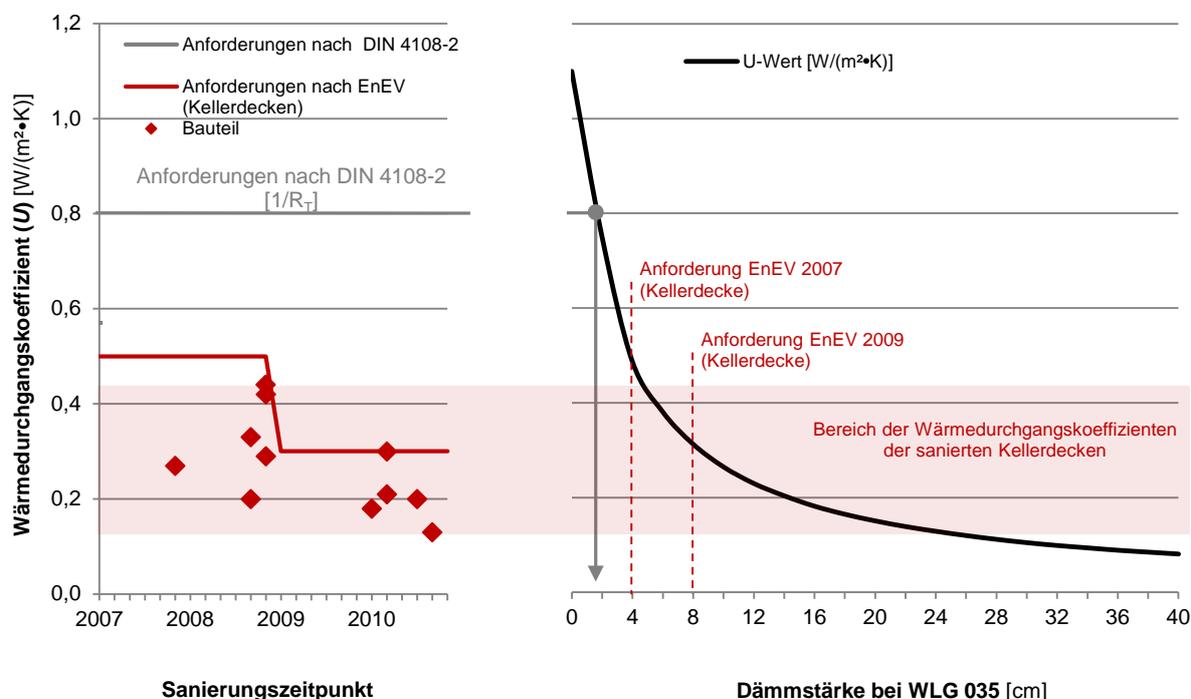


Abbildung 38 Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) der sanierten Kellerdecken

### 5.1.1.3 Außenwände

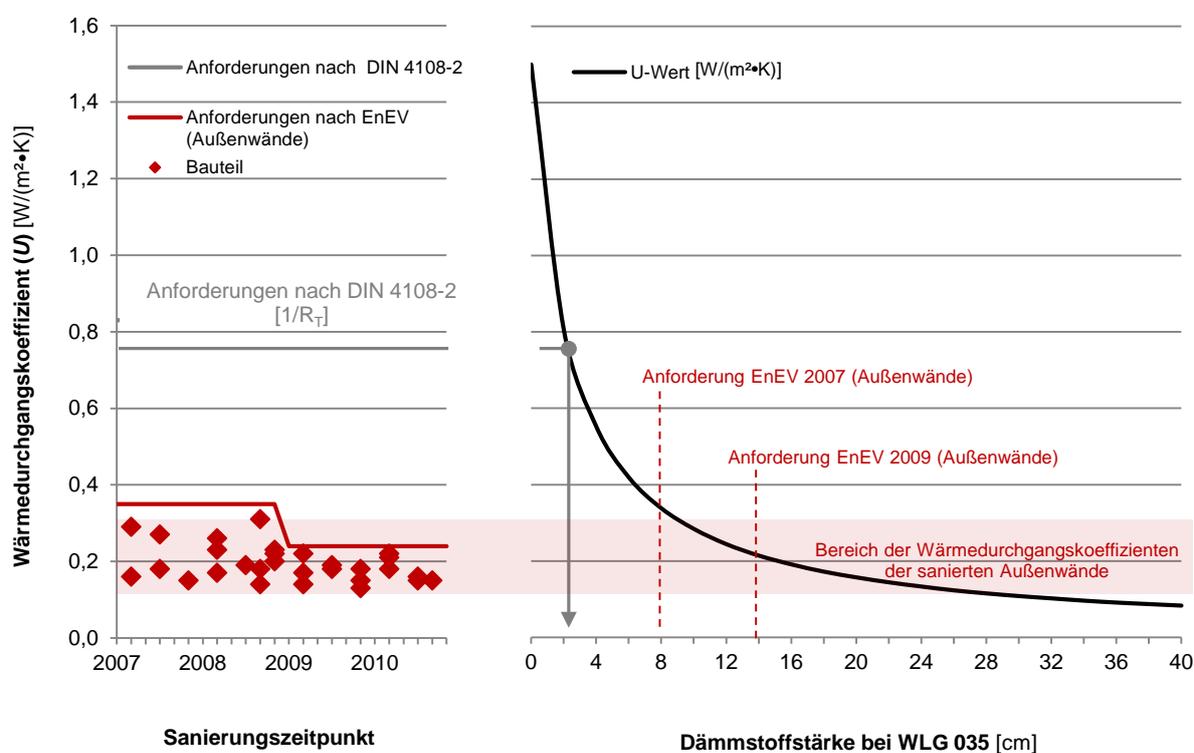
Die Sanierung der Wände der drei denkmalgeschützten Gebäude erfolgt mit einer Innendämmung, wohingegen die Dämmebenen nicht denkmalgeschützter Gebäude an der Außenseite aufgebracht werden. Die Sanierungen nicht denkmalgeschützter Gebäude weisen unterschiedliche Umsetzungsvarianten auf. Das Anbringen von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) stellt dabei den konstruktiv geringsten Aufwand dar. Konstruktiv aufwändiger ist die Ausführung von gedämmten Vorhangfassaden mit einer bewegten Luftschicht zwischen Dämmebene und Ebene des Witterungsschutzes.

Die EnEV 2007 (vgl. [6] Anl. 3) und EnEV 2009 (vgl. [7] Anl. 3) sowie die DIN 4108-2 (vgl. [48] Tab. 3, S. 15) stellen Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz von Außenwänden. Die zur Einhaltung der Anforderungen nach EnEV 2007 notwendige Dämmschichtstärke beträgt 8 cm. Um die Anforderungen der EnEV 2009 einzuhalten, ist eine Dämmschichtstärke von 14 cm erforderlich. Tabelle 30 zeigt die nach EnEV 2007 und 2009 maximal zulässigen Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) bei der Erneuerung von Außenwänden gegen Außenluft.

**Tabelle 30** Nach Energieeinsparungsverordnung 2007 / 2009 maximal zulässige Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) beim Austausch von Außenwänden gegen Außenluft

Anforderung	Maximal zulässiger Wärmedurchgangskoeffizient [ $W/(m^2 \cdot K)$ ] (Anlage 3; Tab.1)	erforderliche Dämmstärke (WLG 035) [cm]
EnEV 2007 (Außenwand)	0,35	8
EnEV 2009 (Außenwand)	0,24	14

Die unsanierten Außenwände der untersuchten Gebäude weisen einen durchschnittlichen  $U$ -Wert von  $1,5 W/(m^2 \cdot K)$  auf. Die Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) aller betrachteten Einzelmaßnahmen betragen  $0,13$  bis  $0,32 W/(m^2 \cdot K)$  und bilden einen Mittelwert von  $0,19 W/(m^2 \cdot K)$ . Die Dämmschichtstärken auf den bestehenden Fassaden betragen  $9$  bis  $30$  cm (Abbildung 39). Die Sanierungsmaßnahmen erfüllen die Anforderungen der zum Errichtungszeitraum gültigen EnEV sowie der DIN 4108-2 (vgl. [48] Tab. 3, S. 15).



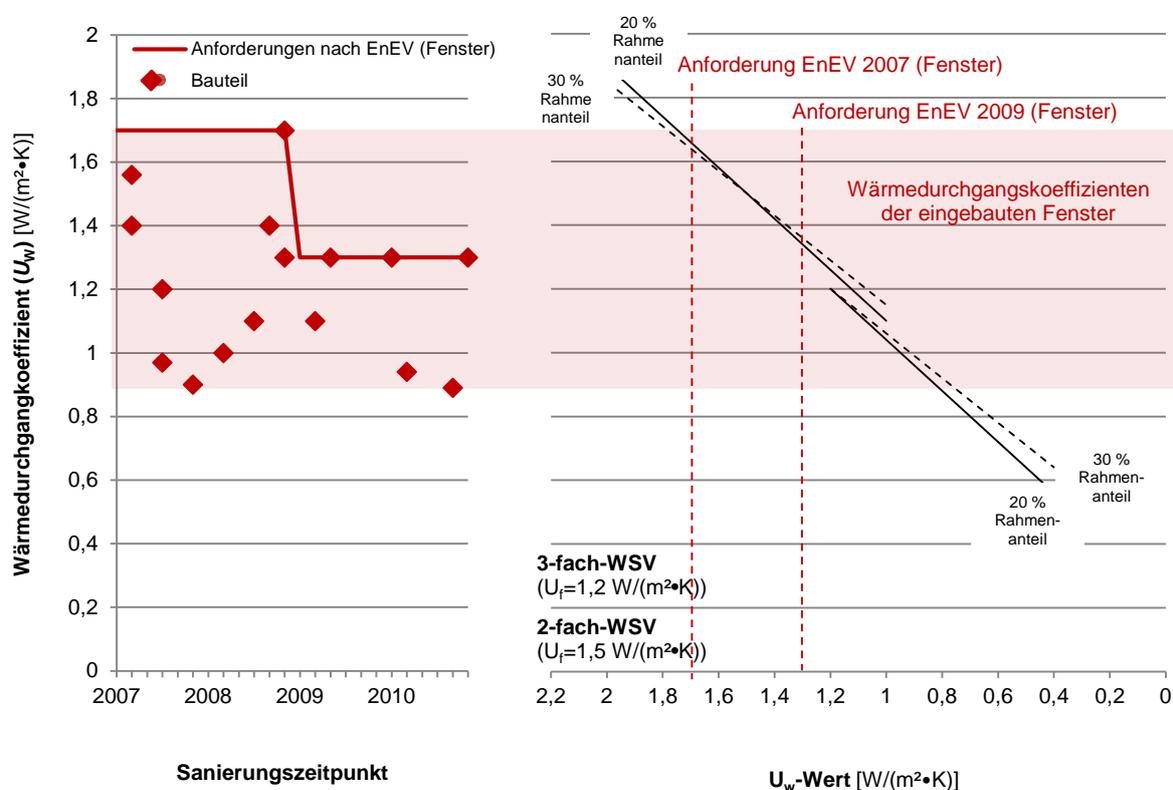
**Abbildung 39** Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) der sanierten Außenwände

#### 5.1.1.4 Fenster

Die Sanierung der transparenten Bauteile sieht den Austausch der bestehenden Bauteile durch neue Fenster mit einer Zwei- bzw. Dreischeiben-WSV vor.

Die Maßnahmen berücksichtigen zum Teil die zusätzliche Installation außenliegender Sonnenschutzsysteme auf den nach Osten, Süden und Westen liegenden Fassaden. Ziel der

Maßnahme ist die Vermeidung einer sommerlichen Überhitzung der Innenräume und eine Verbesserung des visuellen Komforts. Die verbauten Fenster weisen Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U_w$ ) von 0,82 bis 1,70  $W/(m^2 \cdot K)$  auf und bilden einen Mittelwert von 1,14  $W/(m^2 \cdot K)$ . Zur Einhaltung der geforderten Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U_w$ -Wert) der Fenster ist die energetische Qualität der Rahmen sowie der Verglasung und des Randverbunds zu betrachten. Die Berechnung der  $U_w$ -Werte setzt prozentuale Rahmenanteile von 20 % bzw. 30 % an. Die energetische Bewertung der 2-fach-WSV legt den Wärmedurchgangskoeffizienten des Standardrahmens ( $U_f$ ) mit 1,5  $W/(m^2 \cdot K)$  fest. Die Bewertung von 3-fach-WSV berücksichtigt einen  $U_f$ -Wert des optimierten Fensterrahmens von 1,2  $W/(m^2 \cdot K)$ . Die Ermittlung des  $U_w$ -Wertes berücksichtigt unterschiedliche Verglasungsqualitäten. Abbildung 40 zeigt die Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U_w$ ) der eingebauten Fenster.



**Abbildung 40** Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U_w$ ) der eingebauten Fenster

Die Wärmedurchgangskoeffizienten der eingebauten Fenster ( $U_w$ ) betragen 0,9 bis 1,7  $W/(m^2 \cdot K)$  und erfüllen die Anforderungen der zum Errichtungszeitraum gültigen EnEV 2007 (vgl. [6] Anl. 3; [7] Anl. 3).

Seit Inkrafttreten der EnEV 2009 ist eine Verbesserung der Verglasungsqualität ( $U_g$ ) bei identischem Rahmen um 0,4  $W/(m^2 \cdot K)$  erforderlich. Die Evaluierung zeigt die zur Erfüllung der jeweiligen EnEV-Anforderungen unterschiedlichen Verglasungs- und Rahmenqualitäten beim Fensteraustausch auf (Tabelle 31).

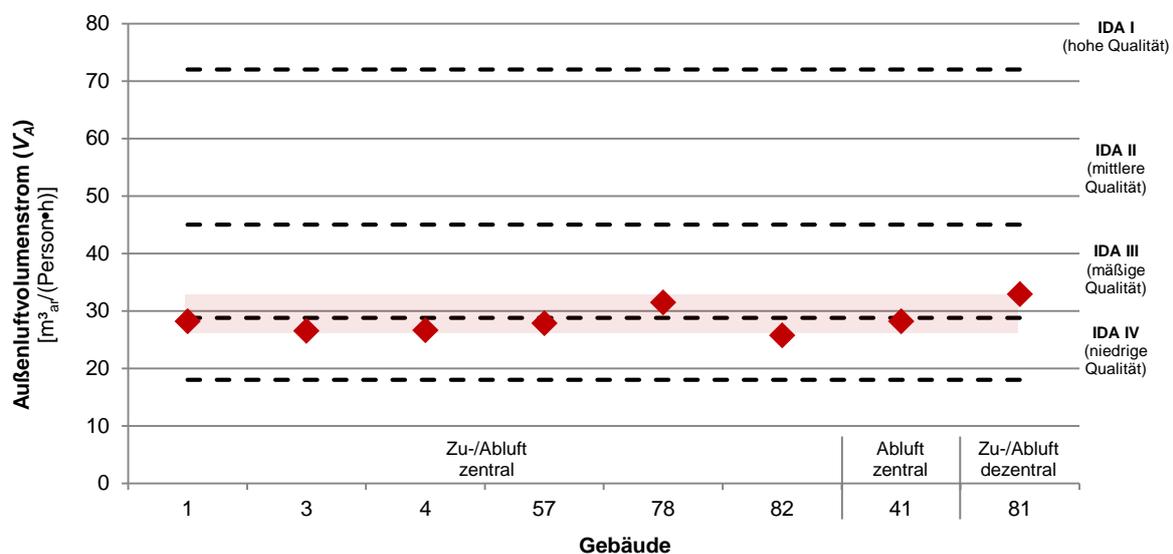
**Tabelle 31** Nach Energieeinsparungsverordnung 2007 / 2009 maximal zulässige Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U_w$ ) von Fenstern bei Bauteilsanierung

	Anforderung	Maximal zulässiger Wärmedurchgangskoeffizient ( $U_w$ ) [ $W/(m^2 \cdot K)$ ] (Anlage 3; Tab.1)	erforderliche Verglasung ( $U_g$ ) [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]
20 % Rahmenanteil	EnEV 2007 (Fenster)	1,70	1,40
	EnEV 2009 (Fenster)	1,30	1,00
30 % Rahmenanteil	EnEV 2007 (Fenster)	1,70	1,50
	EnEV 2009 (Fenster)	1,30	1,30

## 5.1.2 Anlagentechnik

### 5.1.2.1 Raumluftechnische Anlagen

Die Installation raumluftechnischer Anlagen erfolgte in acht der 17 Schulgebäude. Der personenbezogene Außenluftvolumenstrom dieser Anlagen beträgt 25,8 bis 32,9  $m^3/(Person \cdot h)$  und weist einen Mittelwert von 28,5  $m^3/(Person \cdot h)$  auf. Dieser Mittelwert entspricht näherungsweise dem in Klassenräumen nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 7) geforderten Außenluftvolumenstrom ( $\dot{V}_A$ ) von 30  $m^3/(Person \cdot h)$ . Die geringen Abweichungen begründen sich durch schwankende Belegungsdichten. Die DIN EN 13779 (vgl. [73] S. 59) ordnet die in den Klassenräumen zu erwartende Luftqualität der IDA-III-Kategorie zu (Abbildung 41).



**Abbildung 41** Volumenstrom ( $\dot{V}_A$ ) der RLT-Anlagen und Bewertung der Luftqualität nach DIN EN 13779 [73]

Die Ventilatoren in den RLT-Anlagen weisen eine spezifische Leistung ( $p_{SFP}$ ) von 0,23 bis 0,64  $W \cdot m^{-3}_{ar} \cdot h$  auf und bilden einen Mittelwert von 0,40  $W \cdot m^{-3}_{ar} \cdot h$ . Bis auf eine Ausnahme ordnet die DIN EN 13779 (vgl. [73] S. 64 f.) die spezifischen Ventilatorleistungen der SFP-Klasse III sowie IV zu. Das Ergebnis weist keine abweichenden SFP-Werte zwischen zentralen und dezentralen sowie Abluft- und Zu-/Abluftanlagen auf (Abbildung 42).

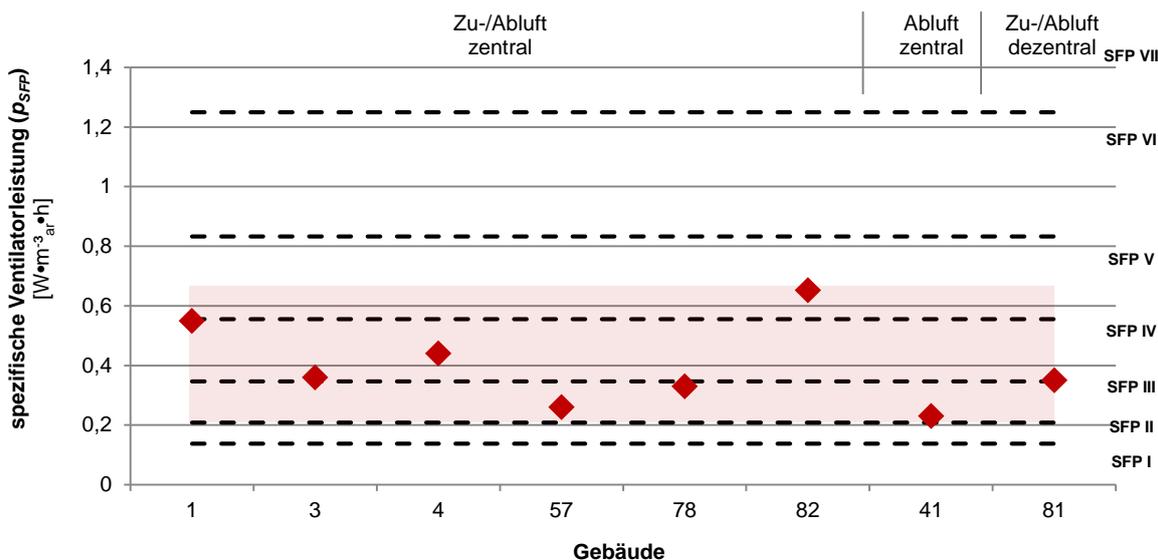


Abbildung 42 Spezifische Ventilatorleistung ( $p_{SFP}$ ) der RLT-Anlagen nach DIN EN13779 [73]

Die Installation der Anlagen berücksichtigt die Integration von wärmerückgewinnenden Systemen mit einem thermischen Wirkungsgrad von 0,75 [-]. Der Einsatz dieser Systeme führt zu einer Reduzierung der Lüftungswärmeverluste.

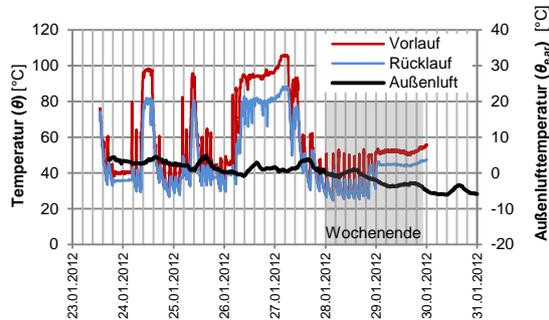
### 5.1.2.2 Instandsetzung und Austausch der Heizungsanlagen

Der Austausch von bestehenden Wärmeerzeugungsanlagen erfolgte in vier Schulgebäuden. Die installierten Wärmeerzeuger wurden mit erneuerbaren Energieträgern (Holz) beschickt. Ein weiteres Schulgebäude wird nach der Sanierung über ein Nahwärmenetz versorgt. Ein Gasbrennwertkessel, der in einem angrenzenden Gebäude aufgestellt ist, stellt die Wärmeversorgung sicher.

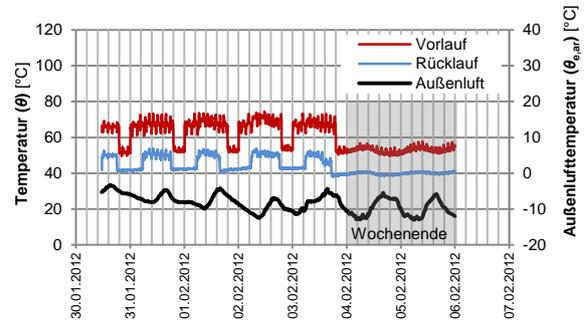
Der Austausch von Fernwärme-Hausübergabestationen sowie eine Anpassung der Anschlussleistungen an die Norm-Heizlast ( $\Phi_{HL,i}$ ) fand vor Sanierungsbeginn in einigen Schulen statt. Im Zuge der Sanierungsmaßnahmen wurden die Dämmung der Verteilleitungen, ein hydraulischer Abgleich wassergeführter Heizungssysteme und der Ersatz bestehender Umwälzpumpen durch leistungseffiziente Pumpen durchgeführt.

Im Rahmen dieser Untersuchung werden Vor- und Rücklauftemperaturen einzelner Heizungsstränge im Verlauf von jeweils einer Woche aufgezeichnet und gegenübergestellt. Beim Vergleich der beiden Heizungsstränge treten Unterschiede im Temperaturverlauf und den Betriebszeiten auf. Eine konstante Nacht- und Wochenendabsenkung ist innerhalb des Systems ohne hydraulischen Abgleich nicht erkennbar. Eine Übersteuerung der automatischen Regelung durch manuellen Eingriff verhindert die Absenkung von Vorlauftemperaturen außerhalb der Nutzungszeit und trägt zum erhöhten Wärmeverbrauch außerhalb der Nutzungszeit bei (Abbildung 43).

Das Zeitprofil des hydraulisch abgeglichenen Verteilkreises lässt eine Absenkung der Systemtemperaturen außerhalb der Nutzungszeiten durch eine Nacht- und Wochenendabsenkung sowie geringere Vor- und Rücklauftemperaturen im Verteilkreis erkennen. Eine Verringerung der Betriebszeit und folglich eine Reduzierung des Wärmeverbrauchs ist die Folge. Abbildung 44 zeigt das Wochenprofil des Heizkreises nach den Sanierungsmaßnahmen.



**Abbildung 43** Wochenprofil des Heizkreises vor den Sanierungsmaßnahmen



**Abbildung 44** Wochenprofil des Heizkreises nach den Sanierungsmaßnahmen

### 5.1.2.3 Reduzierung der Norm-Heizlast

Die nicht denkmalgeschützten Gebäude (Kategorie I) unterliegen keinen konstruktiv oder architektonisch zu schützenden Vorgaben der Baukonstruktion. Diese Gebäude weisen gegenüber den denkmalgeschützten Gebäuden eine höhere Reduzierung der Norm-Transmissionswärmeverluste ( $\Phi_T$ ) auf. Die spezifischen Verluste der sanierten Gebäude betragen 15,8 bis 36,7  $\text{W/m}^2_{\text{therm.Gebäudehülle}}$  und bilden einen Mittelwert von 24,2  $\text{W/m}^2_{\text{therm.Gebäudehülle}}$  (vgl. [86] S. 28 ff.).

Der Norm-Transmissionswärmeverlust ( $\Phi_T$ ) der drei denkmalgeschützten Gebäude (Kategorie II) beträgt 46,3 bis 62,4  $\text{W/m}^2_{\text{therm.Gebäudehülle}}$  und bildet einen Mittelwert von 56,5  $\text{W/m}^2_{\text{therm.Gebäudehülle}}$ . Abbildung 45 zeigt die Reduzierung der Norm-Transmissionswärmeverluste ( $\Phi_T$ ) aufgrund der Sanierungsmaßnahmen in Abhängigkeit vom mittleren Transmissionswärmeverlust ( $H'_T$ ).

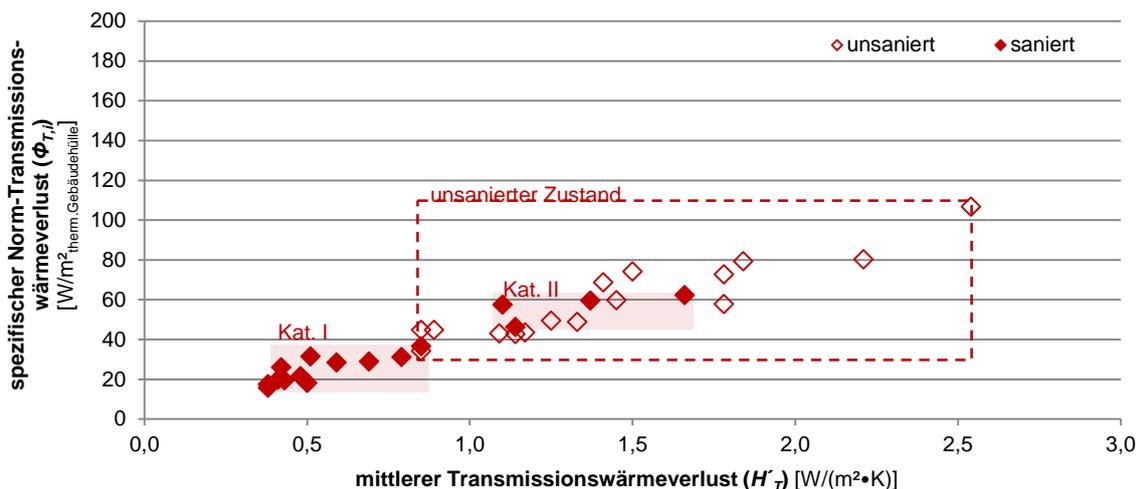


Abbildung 45 Reduzierung der Norm-Transmissionswärmeverluste ( $\Phi_T$ ) nach DIN EN 12831 [86]

Der Norm-Infiltrationswärmeverlust ( $\Phi_{V,i}$ ) der Bestandsgebäude weist einen spezifischen Wert von 2,8 W/m<sup>3</sup><sub>Ve</sub> auf. Die Verbesserung der Gebäudedichtheit auf 4 h<sup>-1</sup> ( $n_{50}$ ) führt zur Reduzierung des Wärmeverlustes auf 1,8 W/m<sup>3</sup><sub>Ve</sub>. Aus einer Verbesserung der Gebäudedichtheit auf 2 h<sup>-1</sup> ( $n_{50}$ ) resultiert ein Norm-Infiltrationswärmeverlust von 0,9 W/m<sup>3</sup><sub>Ve</sub> (vgl. [86] S. 29) (Abbildung 46).

Der Norm-Lüftungswärmeverlust ( $\Phi_{min}$ ) (vgl. [86] S. 28 ff.) entsteht durch die Einhaltung des Mindestaußenluftvolumenstroms ( $\dot{V}_A$ ) von 30 m<sup>3</sup>/(Person•h) nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 10). Der Verlust beträgt in den Schulgebäuden, die natürlich über Fenster belüftet werden, 346,8 W/Person bzw. 11,6 W/m<sup>3</sup><sub>geförderte Luft</sub>. Die Verringerung der Norm-Lüftungsverluste durch den Einsatz wärmerückgewinnender Systeme ( $\eta_{WRG} = 0,75$  [-]) führt zu einer Reduzierung der Verluste auf 91 W/Person bzw. 3 W/m<sup>3</sup><sub>geförderte Luft</sub>. Die Abweichungen zum Mittelwert entstehen u.a. durch unterschiedliche Norm-Außentemperaturen ( $\theta_e$ ) an den Standorten (Abbildung 47).

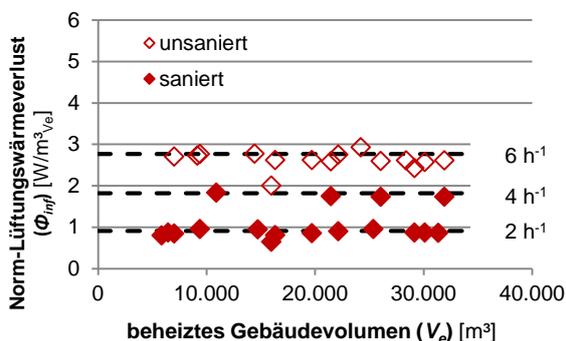


Abbildung 46 Reduzierung der Norm-Lüftungswärmeverluste ( $\Phi_V$ ) nach DIN EN 12831 [86]

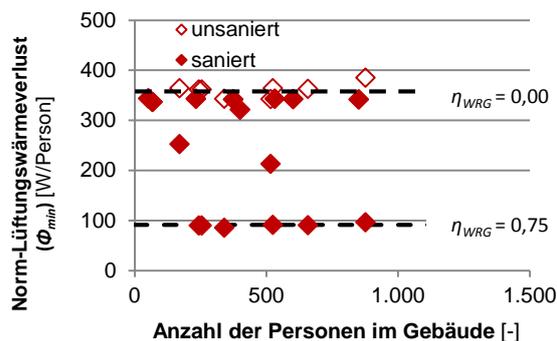


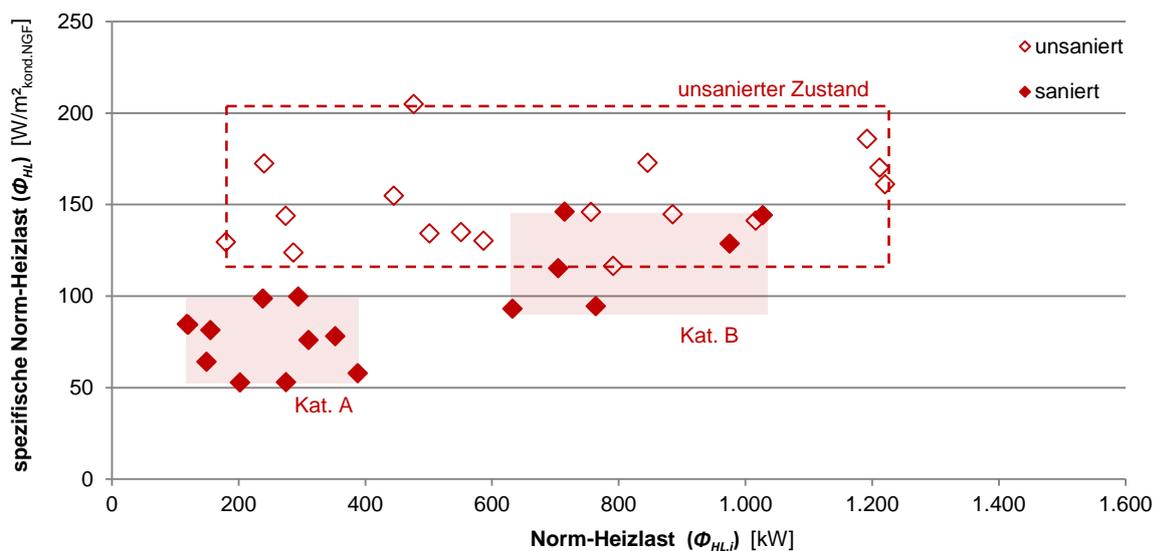
Abbildung 47 Reduzierung der Norm-Lüftungswärmeverluste ( $\Phi_{min}$ ) nach DIN EN 12831 [86]

Die Wiederaufheizleistung ( $\Phi_{RH,i}$ ) von 17 W/m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub> unterliegt keinem Einfluss durch die energetischen Sanierungsmaßnahmen.

Die Sanierungsmaßnahmen erzielen in allen Gebäuden eine Reduzierung der Norm-Heizlast ( $\Phi_{HL}$ ). Die evaluierten Sanierungskonzepte unterteilen sich beim Gebäudevergleich ebenfalls in zwei Kategorien.

In die Kategorie A entfallen zehn Sanierungskonzepte, die den Einsatz raumluftechnischer Anlagen und die vollständige Sanierung der Gebäudegülle berücksichtigen. Sie weisen eine spezifische Norm-Heizlast ( $\Phi_{HL}$ ) von 52,9 bis 99,8  $\text{W/m}^2_{\text{kond.NGF}}$  auf und bilden einen Mittelwert von 76,2  $\text{W/m}^2_{\text{kond.NGF}}$ .

Die Kategorie B beinhaltet sechs Konzepte, in denen der erforderliche Mindestaußenvolumenstrom ( $\dot{V}_A$ ) weiterhin über die natürliche Fensterlüftung sicherstellt wird und einzelne Bauteile saniert werden. Höhere Transmissions- und Lüftungswärmeverluste bedingen einen Anstieg der Norm-Heizlast ( $\Phi_{HL}$ ) gegenüber den Gebäuden der Kategorie A. Die Gebäude der Kategorie B weisen eine Heizlast von 93,2 bis 146,2  $\text{W/m}^2_{\text{kond.NGF}}$  auf und bilden einen Mittelwert von 120,3  $\text{W/m}^2_{\text{kond.NGF}}$ . Abbildung 48 zeigt die Reduzierung der Norm-Heizlast ( $\Phi_{HL}$ ) durch die Sanierungsmaßnahmen.



**Abbildung 48** Reduzierung der Norm-Heizlast ( $\Phi_{HL}$ ) in den Bildungsstätten nach DIN EN 12831 [86]

Die Kategorisierung der Sanierungskonzepte zeigt das Potenzial zur Reduzierung von Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten durch die vollständige Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes sowie den Einsatz raumluftechnischer Anlagen mit wärmerückgewinnenden Systemen auf. Dabei ist die Einhaltung des geforderten Mindestaußenluftvolumenstroms ( $\dot{V}_A$ ) nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 10) sicherzustellen.

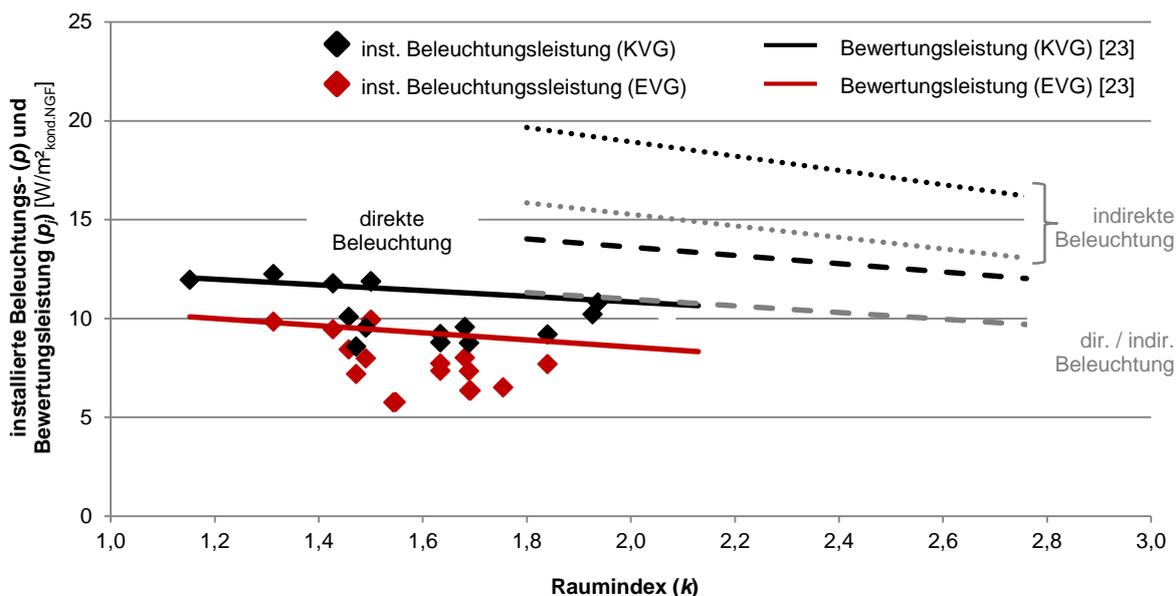
In den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen (Kapitel 5.4) wird die Einhaltung des Mindestaußenluftvolumenstroms ( $\dot{V}_A$ ) angenommen und die Einhaltung bei der Bewertung des Innenraumkomforts (Kapitel 5.5) überprüft.

### 5.1.2.4 Beleuchtungsanlagen

Der Einbau von effizienten Beleuchtungsanlagen geschieht ausschließlich durch den Ersatz von Leuchten durch Leuchtstofflampen und von konventionellen (KVG) durch elektronische Vorschaltgeräte (EVG). Die Ausstattung mit einer zusätzlichen Präsenzmeldung bzw. tageslichtabhängigen Steuerung erfolgt in Klassen- und Verwaltungsräumen, auf Verkehrsflächen sowie in den Sanitärbereichen nur vereinzelt.

Der Austausch der Beleuchtungsanlagen führt zu einer Reduzierung der installierten Beleuchtungsleistung und zeigt energetische Einsparpotenziale auf.

Die Bewertungsleistung ( $p_j$ ) der Anlagen in den Referenzräumen mit direkter Beleuchtung beträgt nach der Sanierung durchschnittlich  $9,2 \text{ W/m}^2_{\text{kond.NGF}}$ . Die installierte Beleuchtungsleistung ( $p$ ) in den Räumen beläuft sich auf durchschnittlich  $7,8 \text{ W/m}^2_{\text{kond.NGF}}$ . Die Klassenräume, die direkt / indirekt beleuchtet werden, weisen eine höhere installierte Beleuchtungsleistung ( $p$ ) von durchschnittlich  $8,3 \text{ W/m}^2_{\text{kond.NGF}}$  auf. Die Bewertungsleistung ( $p_j$ ) fällt gegenüber der tatsächlich installierten Beleuchtungsleistung ( $p$ ) höher aus (Abbildung 49).



**Abbildung 49** Bewertungsleistung ( $p_j$ ) nach DIN V 18599 [23] und installierte Beleuchtungsleistung ( $p$ )

Der Austausch von KVG durch EVG stellt sich als energetisch effektive Maßnahme dar, um eine Reduzierung der Bewertungs- bzw. Beleuchtungsleistung zu erzielen (Tabelle 32).

**Tabelle 32** Bewertungsleistung ( $p$ ) unterschiedlicher Beleuchtungsarten in Klassenräumen nach DIN V 18599 [23]

Beleuchtungsart	direkt	direkt/indirekt	indirekt
Leuchtstoffröhren (KVG)	11,3 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> (100 %)	13,3 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> (117 %)	18,5 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> (164 %)
Leuchtstoffröhren (EVG)	9,2 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> (81,4 %)	10,8 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> (95,6 %)	14,9 W/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> (131 %)

## 5.2 Energetische Einsparung

### 5.2.1 Bewertung der verwendeten Berechnungsmethoden zur Energieeinsparung

Die Gegenüberstellung von verändertem Energiebedarf und Verbrauch durch die Sanierungen ermöglicht die Validierung der Rechenmethoden der DIN V 18599 [23].

Die Maßnahmen führen nach DIN V 18599 in allen Bildungsstätten zu einer Reduzierung des Endenergiebedarfs (Heizen) von bis zu 80 % gegenüber dem unsanierten Gebäudebestand<sup>21</sup>. Die Gegenüberstellung der reduzierten Bedarfs- und Verbrauchswerte deckt Abweichungen von -8,3 bis +8,4 % zwischen den Werten auf (Abbildung 50). Die geringen prozentualen Abweichungen zwischen der Reduzierung des Bedarfs und dem Verbrauch lassen das Ergebnis der Berechnung als aussagekräftig bewerten. Die Betrachtung der prozentualen Reduzierung des Energiebedarfs erlaubt die Bewertung der Einzelmaßnahmen an der Gebäudehülle mittels der Bedarfsberechnung in den folgenden Schritten.

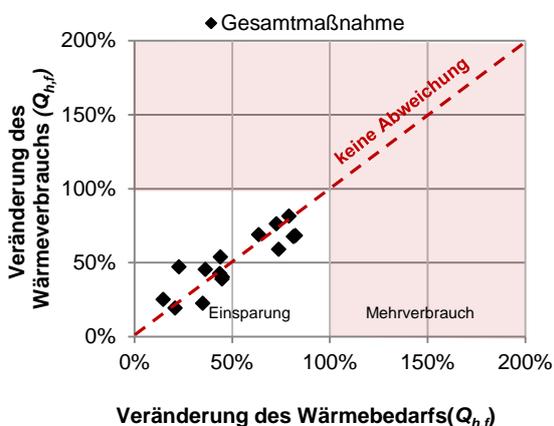
Einzelne Gebäudesanierungen weisen eine Reduzierung des Gesamtstromverbrauchs auf. Größtenteils liegt jedoch eine Erhöhung des Stromverbrauchs in den Schulgebäuden nach der Sanierung vor. Die Installation von z.B. raumluftechnischen Anlagen und die Ausstattung der Klassenräume mit neuen Medien begründen den Anstieg des Stromverbrauchs. Insgesamt ist eine Erhöhung des Stromverbrauchs um bis zu 82 % gegenüber dem unsanierten Zustand zu verzeichnen.

Bei der Gegenüberstellung der Bedarfs- mit den Verbrauchswerten treten hohe Abweichungen auf (Abbildung 51). Diese Abweichungen resultieren aus der Bilanzierung des Strombedarfs. Die in den Gebäuden installierten Geräte, wie z.B. Smartboards oder Beamer sowie weitere nutzungsspezifische Geräte, finden in der energetischen Bewertung von Nichtwohngebäuden nach DIN V 18599 [23] keine Berücksichtigung. Die Methode lässt keine Prognose zur Veränderung des Gesamtstromverbrauchs durch eine Sanierung zu.

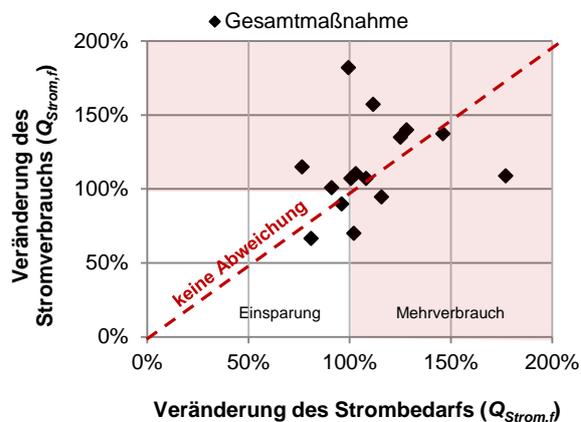
---

<sup>21</sup> Der Endenergieverbrauch (Warmwasser) kann aufgrund der größtenteils nicht vorhandenen Abnahme vernachlässigt werden (vgl. Kap. 4.3.2).

In späteren Arbeitsschritten wird der Stromverbrauch ( $Q_{Strom,t}$ ) einzelner anlagentechnischer Systeme ermittelt, die auf Rechenmodellen der DIN V 18599 [23] aufbauen und eine Bewertung ermöglichen.



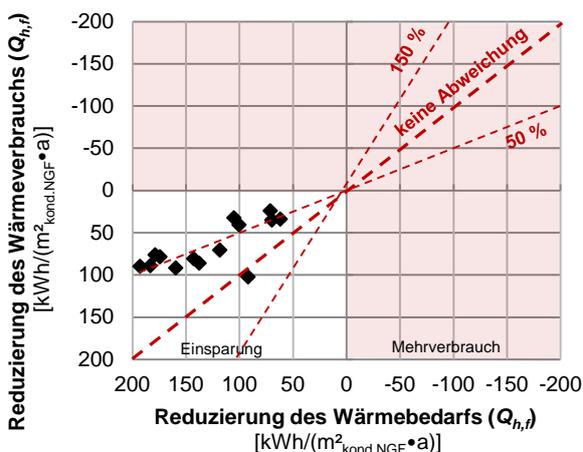
**Abbildung 50** Veränderung des Endenergiebedarfs (Heizen) und -verbrauchs ( $Q_{h,t}$ )



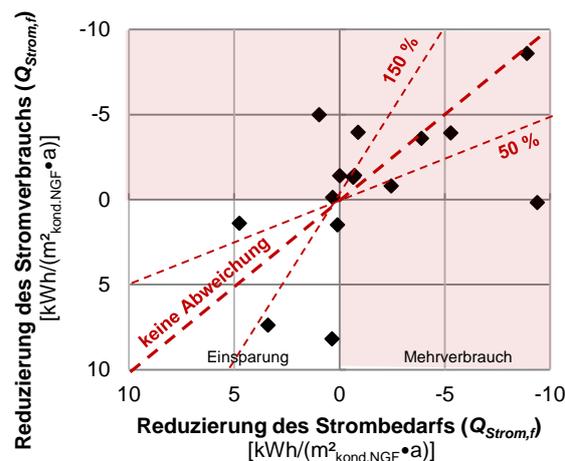
**Abbildung 51** Veränderung des Strombedarfs- und -verbrauchs ( $Q_{Strom,t}$ )

Bei der Gegenüberstellung absoluter Energieeinsparungen ( $Q_{h,t}$ ) entstehen hohe Abweichungen zwischen den Bedarfs- und Verbrauchswerten. Die tatsächlich reduzierten Wärmemengen ( $Q_{h,t}$ ) betragen 29 bis 53 % gegenüber den berechneten Bedarfs-einsparungen nach DIN V 18599 [23] (Abbildung 52).

Der Abgleich des reduzierten Strombedarfs ( $Q_{Strom,t}$ ) mit der Veränderung des Stromverbrauchs stimmt tendenziell (Mehrverbrauch / Einsparung) überein. Die energetische Bewertung nach DIN V 18599 [23] berücksichtigt den nutzungsspezifischen Strombedarf („Nutzungsstrom“) innerhalb der Gebäude nicht und ein Bedarfs-Verbrauchs-Abgleich ist anhand dieser Methode nicht aussagekräftig (Abbildung 53).



**Abbildung 52** Reduzierung des Endenergieverbrauchs (Heizen) und -verbrauchs ( $Q_{h,t}$ )



**Abbildung 53** Reduzierung des Strombedarfs- und -verbrauchs ( $Q_{Strom,t}$ )

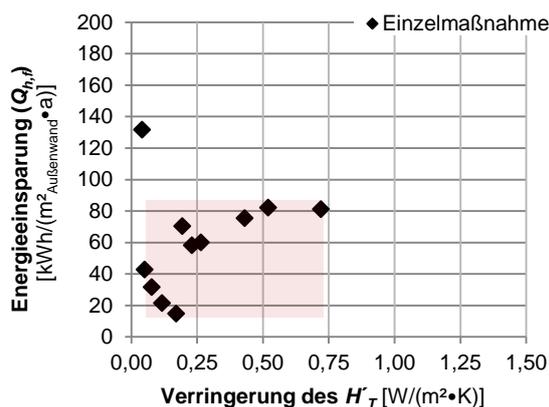
Die Erkenntnisse des Bedarfs-Verbrauchs-Abgleichs decken sich mit den Ergebnissen nach (vgl. [56] S. 3 ff.). Die Abweichung zwischen Verbrauchs- und Bedarfswerten ermöglicht eine energetische Bewertung der Sanierungsmaßnahmen unter Anwendung der DIN V 18599 [23] nur bedingt. Die energetische und ökonomischen Bewertung der Sanierungsmaßnahmen zur qualitativen Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes ist anhand der errechneten prozentualen Verringerung des Wärmeverbrauchs ( $Q_{h,i}$ ) in den nächsten Schritten durchzuführen. Der ermittelte Wärmebedarf ist im Vorfeld auf den tatsächlichen Wärmeverbrauch des jeweiligen Schulgebäudes anzupassen. Rechenmodelle zur Ermittlung des Stromverbrauchs einzelner anlagentechnischer Systeme sind aufzustellen, um plausible Aussagen zur Anlageneffizienz zu erhalten.

## 5.2.2 Energetische Bewertung der Einzelmaßnahmen (Gebäudehülle)

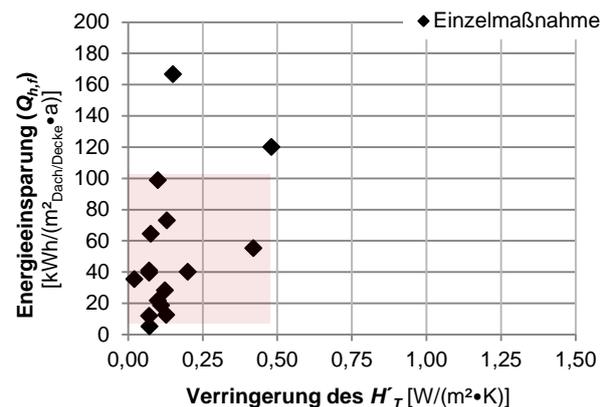
Unterschiedliche Gebäudekubaturen und -ausrichtungen lassen einen direkten Vergleich der sanierten Gebäude nicht zu. Die erzielten Wärmeeinsparungen ( $Q_{h,i}$ ) durch die Sanierung des jeweiligen Bauteils lassen in Abhängigkeit zum reduzierten Transmissionswärmeverlust ( $H'_T$ ) einen gebäudebezogenen Vergleich zu und ermöglichen den Vergleich von Bauteilen.

Die Außenwanddämmung führt zu einer Reduzierung des Endenergiebedarfs (Heizen) ( $Q_{h,i}$ ) um bis zu 131 kWh/(m<sup>2</sup><sub>Außenwand</sub>•a) und erzielt eine Verringerung des mittleren Transmissionswärmeverlustes ( $H'_T$ ) um bis zu 0,75 W/(m<sup>2</sup>•K) (Abbildung 54).

Aus der Dämmung von Flachdächern und obersten Geschossdecken resultiert eine Verringerung des Wärmebedarfs von bis zu 167 kWh/(m<sup>2</sup><sub>Dachfläche</sub>•a) und eine Reduzierung des Transmissionswärmeverlustes ( $H'_T$ ) um bis zu 0,48 W/(m<sup>2</sup>•K) (Abbildung 55).



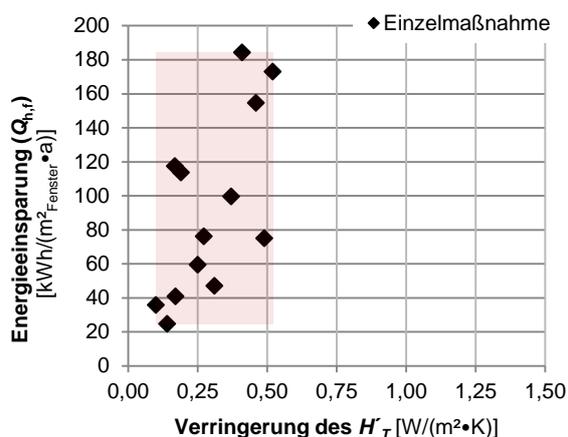
**Abbildung 54** Reduzierung des Energiebedarfs ( $Q_{h,i}$ ) durch die Dämmung von Außenwänden



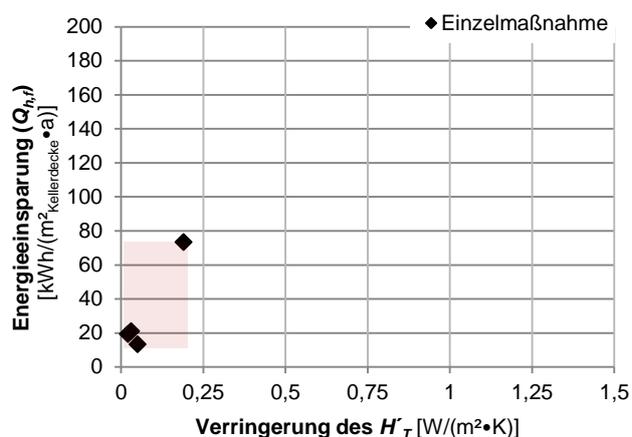
**Abbildung 55** Reduzierung des Energiebedarfs ( $Q_{h,i}$ ) durch die Dämmung von Dächern und obersten Geschossdecken

Der Fensteraustausch weist gegenüber der Dachdämmung ein höheres Potenzial zur Reduzierung des Endenergiebedarfs (Heizen) ( $Q_{h,i}$ ) auf. Der Austausch der Fenster führt zur Verringerung des Transmissionswärmeverlustes ( $H'_{\tau}$ ) um bis zu  $0,52 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  und des Wärmebedarfs ( $Q_{h,i}$ ) um bis zu  $184 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Fenster}} \cdot \text{a})$  (Abbildung 56). Die erzielten Energieeinsparungen durch den Austausch transparenter Bauteile sind mit der Außenwanddämmung zu vergleichen.

Die Kellerdeckendämmung erzielt eine Reduzierung des Endenergiebedarfs ( $Q_{h,i}$ ) um bis zu  $73 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Kellerdecke}} \cdot \text{a})$  und eine Verringerung des mittleren Transmissionswärmeverlustes ( $H'_{\tau}$ ) von maximal  $0,19 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  (Abbildung 57).



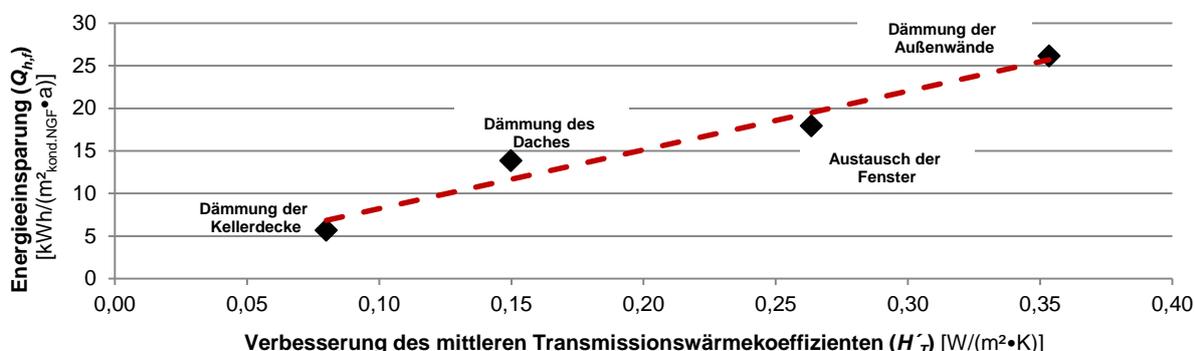
**Abbildung 56** Reduzierung des Energiebedarfs ( $Q_{h,i}$ ) durch den Austausch von Fenstern



**Abbildung 57** Reduzierung des Energiebedarfs ( $Q_{h,i}$ ) durch die Dämmung von Kellerdecken

Die Ableitung von Potenzialen zur Reduzierung des Wärmebedarfs ( $Q_{h,i}$ ) sowie des Transmissionswärmeverlustes ( $H'_{\tau}$ ) lässt eine Gegenüberstellung der Bauteile zu und bildet eine aus energetischer Sicht sinnvolle Reihenfolge zur Umsetzung dieser Maßnahmen.

Aus der Verringerung des mittleren Transmissionswärmeverlustes ( $H'_{\tau}$ ) um  $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  resultiert in Schulen eine Verringerung des Endenergiebedarfs ( $Q_{h,i}$ ) um  $6,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Kond.NGF}} \cdot \text{a})$  (Abbildung 58).



**Abbildung 58** Reduzierung des Wärmebedarfs ( $Q_{h,i}$ ) durch die Verbesserung des mittleren Transmissionswärmekoeffizienten ( $H'_{\tau}$ )

## 5.2.3 Energetische Bewertung der Einzelmaßnahmen (Anlagentechnik)

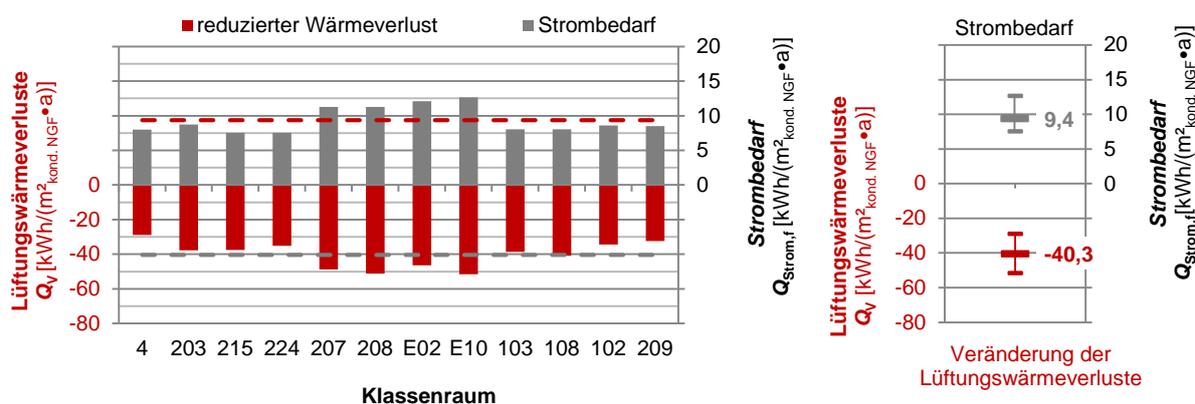
### 5.2.3.1 Austausch und Modernisierung der Heizungsanlagen

Ein Vergleich unterschiedlicher Wärmeversorgungskonzepte ist aufgrund der vorliegenden Datenlage nicht möglich. Die Analyse bewertet den Anlagenbetrieb vor dem Hintergrund eingesetzter Energieträger und deren Auswirkungen auf die Umwelt. Die umgesetzten Gesamtsanierungsmaßnahmen zeigen Potenziale zur Reduzierung des Primärenergieverbrauchs ( $Q_P$ ) und der CO<sub>2</sub>-Emission auf und ermöglichen eine ökologische Bewertung in späteren Arbeitsschritten.

### 5.2.3.2 Installation raumluftechnischer Anlagen

Die Ermittlung des Strombedarfs sowie die reduzierten Lüftungswärmeverluste ermöglichen eine Aussage über die Sinnhaftigkeit des Betriebs raumluftechnischer Anlagen in Bezug auf die end- und primärenergetischen Einsparungen. Die Analyse stellt die reduzierten Lüftungswärmeverluste dem Betriebsstrombedarf der raumluftechnischen Anlagen in zwölf Klassenräumen gegenüber. Der personenbezogene Luftwechsel wird dabei berücksichtigt. Der natürliche Luftaustausch über die Fassade wird analog aus den erfassten Volumenströmen der Lüftungsanlagen übernommen, um eine einheitliche Gegenüberstellung zu gewährleisten. In den Zeiträumen, in denen die Außenlufttemperatur ( $\theta_{e,ar}$ ) höher als die Lufttemperatur im Innenraum ( $\theta_{i,ar}$ ) ist, treten Lüftungswärmegewinne auf. Diese Gewinne finden innerhalb der Betrachtung bilanziell keine Berücksichtigung.

Der Betrieb von RLT-Anlagen mit wärmerückgewinnenden Systemen weist eine Verringerung der Lüftungswärmeverluste ( $Q_V$ ) gegenüber den frei belüfteten Gebäuden um durchschnittlich 40,3 kWh/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a) auf. Der Strombedarf der Anlagen ( $Q_{Strom,t}$ ) beträgt durchschnittlich 9,4 kWh/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a) (Abbildung 59).



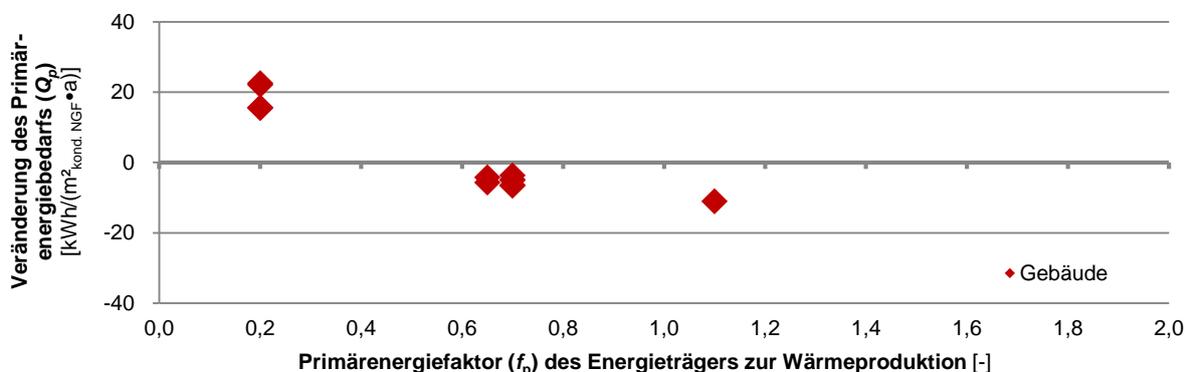
**Abbildung 59** Reduzierung der Lüftungswärmeverluste ( $Q_{V,e}$ ) und Strombedarf ( $Q_{Strom,t}$ ) beim Betrieb raumluftechnischer Anlagen

Die Bewertung erweitert die Betrachtung der reduzierten Lüftungswärmeverluste sowie des Betriebsstrombedarfs in Abhängigkeit des geförderten Luftvolumens. Der Betrieb raumluftechnischer Anlagen führt zur Verringerung der Lüftungswärmeverluste gegenüber der Fensterlüftung um  $2,6 \text{ Wh}/(\text{m}^3_{\text{ar}} \cdot \text{a})$ . Der Reduzierung steht ein Strombedarf von  $0,6 \text{ Wh}/(\text{m}^3_{\text{ar}} \cdot \text{a})$  gegenüber (Tabelle 33). Die Benchmarks ermöglichen die Betrachtung unterschiedlicher Betriebsstrategien bei veränderten Nutzungszeiten oder Außenluftvolumenströmen in späteren Arbeitsschritten.

**Tabelle 33** Reduzierung des Wärmebedarfs ( $Q_{h,i}$ ) sowie Strombedarfs ( $Q_{\text{Strom},i}$ ) durch den Betrieb von RLT-Anlagen

	Verringerung der Lüftungswärmeverluste ( $Q_v$ ) [Wh/(m <sup>3</sup> <sub>ar</sub> •a)]	Betriebsstrombedarf ( $Q_{\text{Strom},i}$ ) [Wh/(m <sup>3</sup> <sub>ar</sub> •a)]
Maximum	2,8	0,7
<b>Mittelwert</b>	<b>2,6</b>	<b>0,6</b>
Minimum	2,1	0,5

Beim Einsatz von Gaskesseln oder Fernwärme und dem Betrieb von RLT-Anlagen beträgt die Primärenergieeinsparung  $11 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Die Verwendung von Energieträgern zur Wärmeproduktion mit einem Primärenergiefaktor ( $f_P$ ) < 0,6 [-] kann zu einem primärenergetischen Mehrbedarf von bis zu  $22 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$  führen (Abbildung 60).



**Abbildung 60** Veränderung des Primärenergiebedarfs durch den Betrieb raumluftechnischer Anlagen und den Einsatz unterschiedlicher Energieträger zur Wärmeproduktion

Zur Vermeidung eines primärenergetischen Mehrbedarfs durch den Betrieb von raumluftechnischen Anlagen ist die regenerative Stromproduktion mit Eigenstromnutzung in den folgenden Arbeitsschritten zu untersuchen.

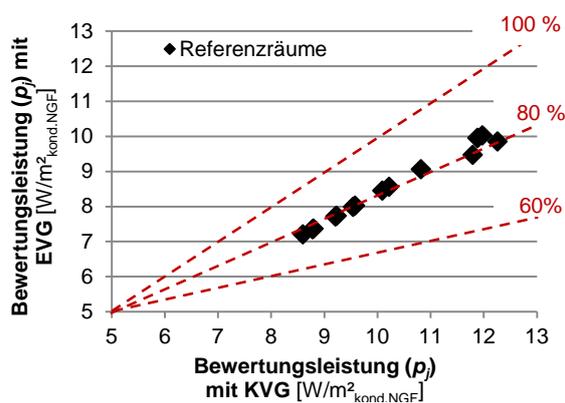
### 5.2.3.3 Austausch der Beleuchtungsanlagen

Der Austausch von Beleuchtungsanlagen bedingt eine Reduzierung der installierten Beleuchtungs- ( $p$ ) und berechneten Bewertungsleistungen ( $p_i$ ) in den Klassenräumen. Der Austausch der Anlagen durch Leuchtstofflampen mit elektronischen Vorschaltgeräten (EVG) erzielt eine

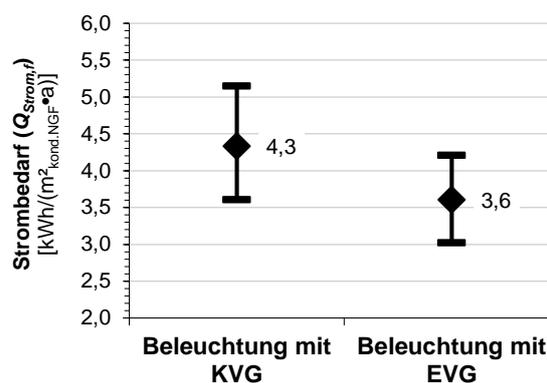
Reduzierung der Bewertungsleistung von durchschnittlich 19,3 % (vgl. auch Kap. 5.1.2.4) (Abbildung 61).

Die jährlichen Betriebsstunden von Beleuchtungsanlagen in Schulen sind nicht bekannt. Eine relative Dauer der Beleuchtungsanlagen im Betrieb von „Büros mit intensiver Tageslichtnutzung“ legt die Betriebsstunden anteilig fest (vgl. [95] S. 65). Die Nutzungsstunden mit eingeschaltetem Licht im fensternahen Bereich belaufen sich auf 19 % und im fensterfernen Bereich mit 42 %, gemessen an der Gesamtnutzungszeit. Der Mittelwert beträgt 30,5 %. Dieser Anteil wird anhand der jährlichen Gesamtnutzungszeit von Schulen (1.400 h/a nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 10)) angesetzt. Die Betriebsstunden der Beleuchtungsanlagen in Schulen beträgt demnach 420 h/a.

Der Strombedarf zur Beleuchtung der Räume mit Leuchtstoffröhren und KVG beträgt durchschnittlich  $4,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Der Austausch der Anlagen durch Leuchtstoffröhren mit EVG verringert den Strombedarf auf durchschnittlich  $3,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Die Varianzen der Bedarfswerte von bis zu  $1,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$  begründen sich durch abweichende Geometrien der Klassenräume. Abbildung 62 zeigt die Verringerung des Strombedarfs ( $Q_{\text{Strom},f}$ ) durch den Austausch der Beleuchtungsanlagen.



**Abbildung 61** Verringerung der Bewertungsleistung ( $p_j$ ) in den Klassenräumen



**Abbildung 62** Verringerung des Strombedarfs ( $Q_{\text{Strom},f}$ ) durch den Austausch von KVG mit EVG

#### 5.2.4 Bewertung der energetischen Gesamtanierungsmaßnahmen

Die Bewertung der Gesamtmaßnahmen stellt den veränderten Wärme- ( $Q_{h,f}$ ) und Stromverbrauch ( $Q_{\text{Strom},f}$ ) vor und nach den Sanierungsmaßnahmen gebäudebezogen gegenüber. Die Gegenüberstellung ermöglicht die Einteilung der Gesamtanierungsmaßnahmen in verschiedene Sanierungskonzepte und leitet deren Potenziale zur Energieeinsparung auch aus primärenergetischer Sicht ab.

Die Gebäude, an denen einzelne Bauteile energetisch saniert werden, weisen eine Reduzierung des Endenergieverbrauchs (Heizen) von bis zu 30 % gegenüber dem unsanierten Zustand auf. Die vollständige Sanierung der Gebäudehülle erzielt eine Reduzierung des Endenergieverbrauchs (Heizen) von über 50 %. Der zusätzliche Betrieb raumluftechnischer Anlagen mit wärmerückgewinnenden Systemen weist die höchste Reduzierung des Wärmeverbrauchs auf.

Die Untersuchung fasst Gesamtsanierungskonzepte zusammen, in denen raumluftechnische Anlagen installiert werden. Der Betrieb raumluftechnischer Anlagen bewirkt eine Erhöhung des Stromverbrauchs um bis zu 50 % gegenüber dem unsanierten Gebäudezustand. Der Mehrverbrauch ist neben dem Betrieb der Anlagen auch zusätzlich auf die Installation von nutzungsspezifischen Geräten, besonders in den BBS, zurückzuführen. Die Gebäude, die nach der Sanierung weiterhin natürlich belüftet werden, weisen tendenziell eine Verringerung des Gesamtstromverbrauchs auf.

Die primärenergetische Bewertung berücksichtigt die Veränderung des Wärme- und Stromverbrauchs sowie den Einsatz unterschiedlicher Energieträger. Die Schulgebäude, die nach der Sanierung weiterhin mit fossilen Energieträgern beheizt werden, weisen eine Reduzierung des Primärenergieverbrauchs von bis zu 56 % gegenüber dem unsanierten Gebäudezustand auf. Die Verringerung ist auf die ganzheitliche Sanierung der Gebäudehülle zurückzuführen. Der Einsatz von erneuerbaren Energieträgern zur Wärmeproduktion weist Primärenergieeinsparungen von bis zu 80 % und somit das größte Potenzial zur Verringerung ökologischer Auswirkungen durch den Gebäudebetrieb auf.

Der erhöhte Stromverbrauch wirkt sich signifikant auf die Veränderung des Primärenergieverbrauchs aus. Die Sanierung eines Gebäudes bewirkt in diesem Fall einen primärenergetischen Mehrverbrauch nach der Sanierung. Die dezentrale Stromproduktion auf Basis erneuerbarer Energien findet in keinem der evaluierten Sanierungskonzepte Anwendung. Abbildung 63 zeigt die Veränderung des Primär- ( $Q_P$ ) und Endenergieverbrauchs ( $Q_f$ ) durch die energetischen Gesamtsanierungsmaßnahmen.

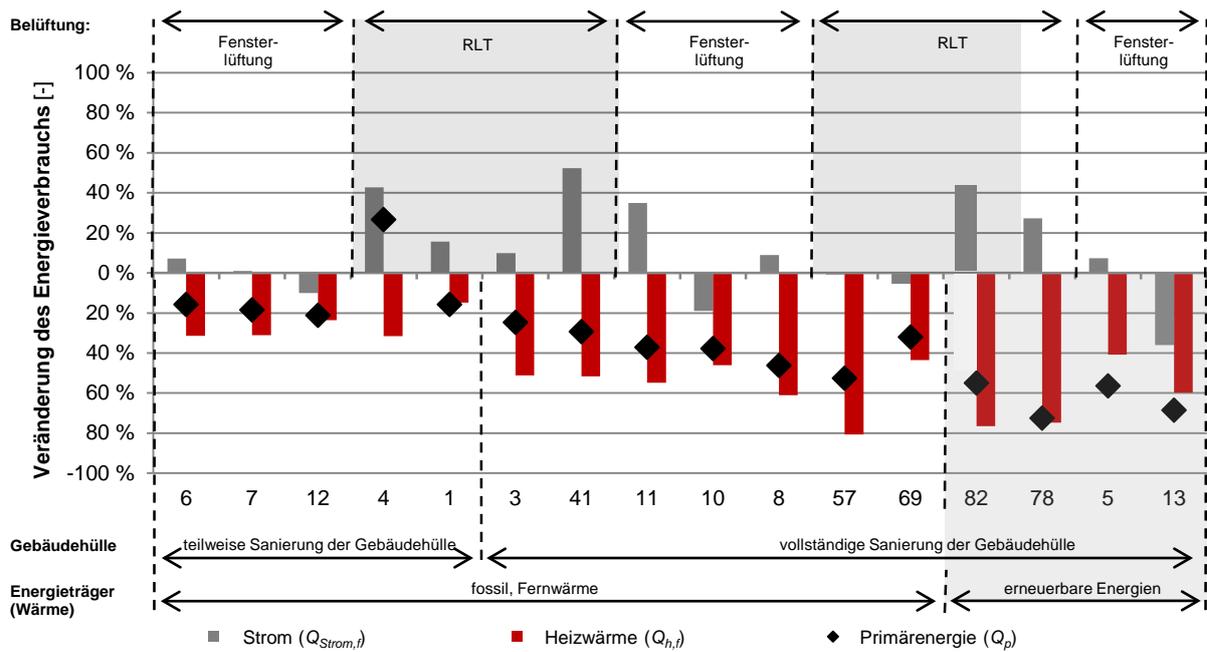


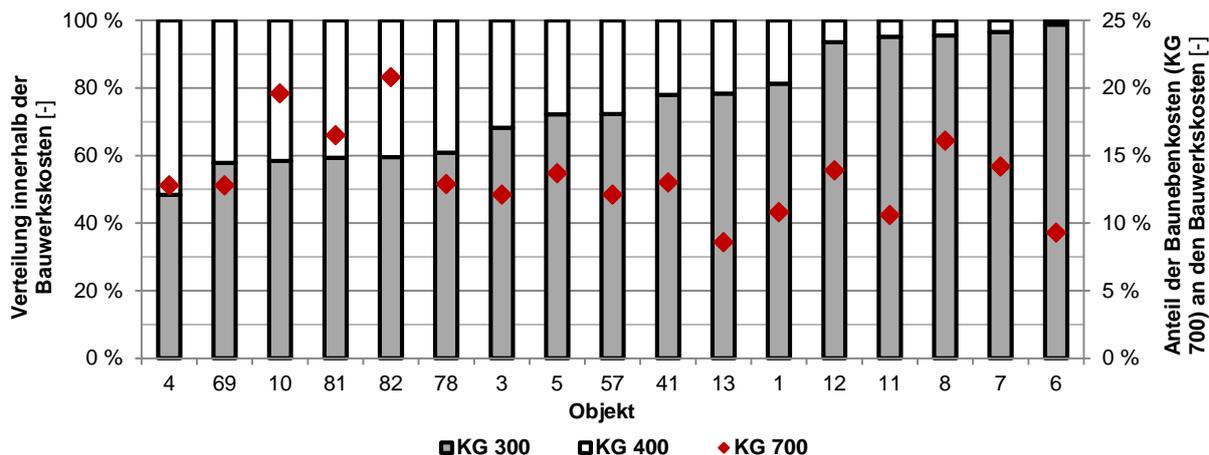
Abbildung 63 Veränderung des Primär- ( $Q_p$ ) und Endenergieverbrauchs ( $Q_t$ ) durch die energetischen Gesamt-sanierungsmaßnahmen

### 5.3 Feststellung der Bauwerks- und Baunebenkosten

#### 5.3.1 Kostenaufstellung nach DIN 276

Die DIN 276 (vgl. [63] S.10 ff.) ermöglicht eine Kostentrennung der Maßnahmen an der Baukonstruktion (KG 300) sowie den technischen Anlagen (KG 400) und den Vergleich dieser Bauwerkskosten zu den Baunebenkosten (KG 700). Die Kosten baukonstruktiver Maßnahmen belaufen sich auf 75 % und die Kosten technischer Anlagen auf 25 % aller Bauwerkskosten (62,4 Mio. €).

Die anteilig zu den Bauwerkskosten auftretenden Baunebenkosten (KG 700) entsprechen 8,6 bis 20,8 % und bilden einen Durchschnitt von 11 %. Die Untersuchung zeigt eine Abhängigkeit der Verteilung innerhalb der Bauwerkskosten zu den Baunebenkosten auf. Steigende Investitionen in anlagentechnische Systeme (KG 400) bewirken eine anteilige Erhöhung der Baunebenkosten zu den Bauwerkskosten (Abbildung 64).



**Abbildung 64** Verteilung der Bauwerkskosten (KG 300 und 400) in Abhängigkeit der Baunebenkosten (KG 700) nach DIN 276 [63]

### 5.3.2 Betrachtung der energetisch relevanten Kosten

Die energetischen Kosten sowie die Kosten zur Gebäudeinstandhaltung der untersuchten Bildungsstätten weisen einen Anteil von durchschnittlich 38 %, bzw. 50 % aller Gesamtkosten auf. Die Verteilung der Kosten sind mit den Angaben nach Reidenbach et al. (vgl. [20] S. 211) vergleichbar (vgl. Kap.2.3). Tabelle 34 zeigt die spezifischen Kosten sowie Verteilung der energetischen Kosten, Instandhaltungskosten sowie Baunebenkosten aller Sanierungsmaßnahmen.

**Tabelle 34** Verteilung der energetischen Kosten, Instandhaltungskosten sowie Baunebenkosten aller baulichen Gesamtmaßnahmen

Kostenart	energetische Kosten	Instandhaltungskosten	Baunebenkosten
Spezifische Kosten	290 €/m <sup>2</sup> <sub>kond.NGF</sub>	380 €/m <sup>2</sup> <sub>kond.NGF</sub>	90 €/m <sup>2</sup> <sub>kond.NGF</sub>
Verteilung (Mittelwert)	38 %	50 %	12 %

Die Spezifikation der Bauwerkskosten der KG 300 basiert auf der jeweiligen Bauteilfläche. Die spezifischen Kosten von anlagentechnischen Systemen beziehen sich auf die konditionierte NGF.

Der Austausch transparenter Bauteile weist die höchsten Kosten aller betrachteten Bauteile sowie die höchste Varianz innerhalb des Gewerks auf. Die Abweichungen treten aufgrund unterschiedlicher Ausführungen der Rahmen und Verglasungen sowie der Installation von außenliegenden Sonnenschutzsystemen auf. Eine Ausgliederung dieser Kosten ist aufgrund der vorliegenden Kostenverfolgungen nicht möglich.

Die Kosten zur energetischen Sanierung der Dächer und Wände sind vergleichbar. Aufgrund unterschiedlicher konstruktiver Ausführungen der Dachsanierungen sowie der Dämmung oberster Geschossdecken treten ebenfalls Abweichungen auf. Die Zwischensparrendämmung

in unbeheizten Dachräumen wirkt sich auf die Bauwerkskosten vorteilhaft aus. Wasserführende Konstruktionen von Flachdächern führen hingegen zu einem höheren Planungs-, Ausführungs- und Materialaufwand. Bei der Umsetzung von unterschiedlichen Baukonstruktionen, wie Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) oder hinterlüfteten Elementfassaden, treten gegenüber der Dachsanierung höhere Varianzen auf.

Die Installation raumlufttechnischer Anlagen weist die höchsten Kosten aller anlagentechnischen Systeme auf. Die Installation von Heizungs- und Beleuchtungsanlagen verzeichnet gegenüber den Lüftungsanlagen geringere Kosten. Die Investitionen zum Austausch oder zur Dämmung von z.B. Verteil-, Strang- und Anbindeleitungen lassen sich aus den jeweiligen Gewerken nicht trennen und begründen die geringeren Kosten innerhalb des Gewerks (Abbildung 65).

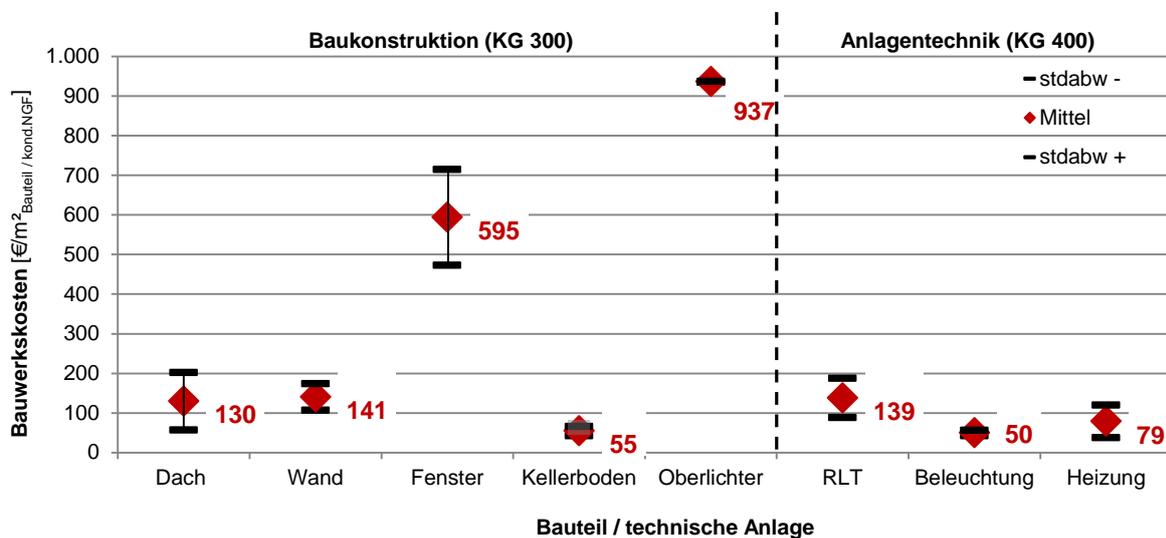
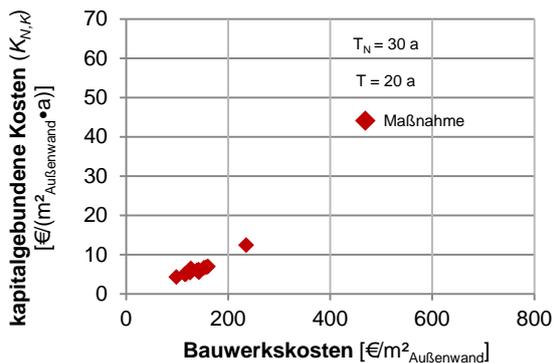


Abbildung 65 Spezifische Kosten (brutto inkl. Stundenlohnarbeiten) der energetischen Sanierungsmaßnahmen

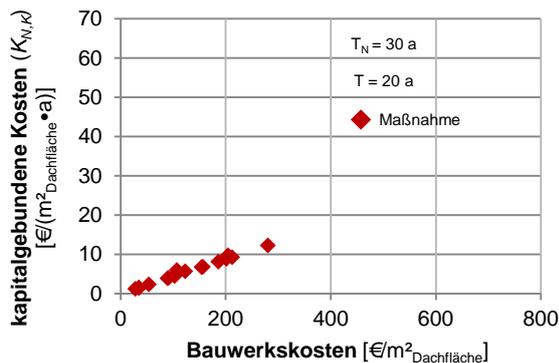
#### 5.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die energetischen Sanierungsmaßnahmen an Außenwänden, obersten Geschossdecken sowie Dächern zeigen vergleichbare kapitalgebundene Kosten ( $K_{N,K}$ ) auf. Die durchschnittlichen Kapitalkosten betragen  $6,2 \text{ €/}(m^2_{\text{Bauteil}} \cdot a)$ . Abbildung 66 und Abbildung 67 zeigen Bauwerks- und Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) der Maßnahmen.

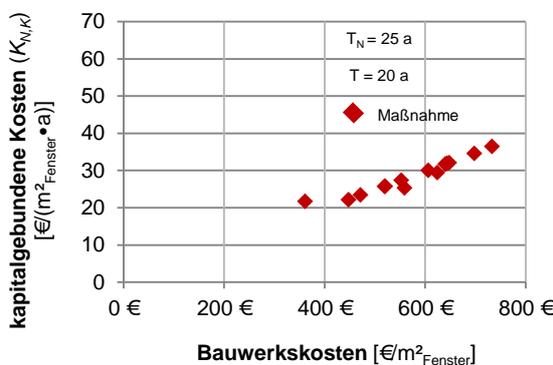
Die hohen Bauwerkskosten beim Fensteraustausch sowie die geringere Nutzungszeit ( $T_N$ ) der transparenten Bauteile, verursacht kapitalgebundene Kosten von 41 bis  $43 \text{ €/}(m^2_{\text{Fenster}} \cdot a)$  (Abbildung 68). Bei der unterseitigen Dämmung von Geschossdecken zu unbeheizten Kellerräumen fallen die geringsten Kapitalkosten aller betrachteten Bauteile von  $2,4 \text{ €/}(m^2_{\text{Kellerdecke}} \cdot a)$  an (Abbildung 69).



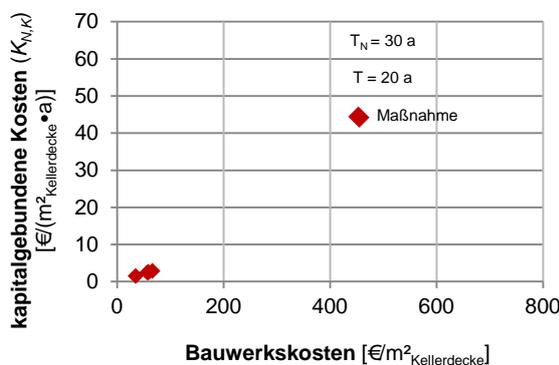
**Abbildung 66** Bauwerks- und Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) der Maßnahmen an Außenwänden ( $q = 1,5 \%/a$ )



**Abbildung 67** Bauwerks- und Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) der Maßnahmen an Dächern ( $q = 1,5 \%/a$ )



**Abbildung 68** Bauwerks- und Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) durch den Fensteraustausch ( $q = 1,5 \%/a$ )

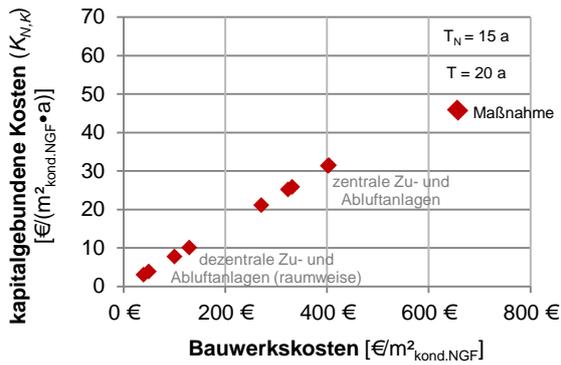


**Abbildung 69** Bauwerks- und Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) der Maßnahmen an Kellerdecken ( $q = 1,5 \%/a$ )

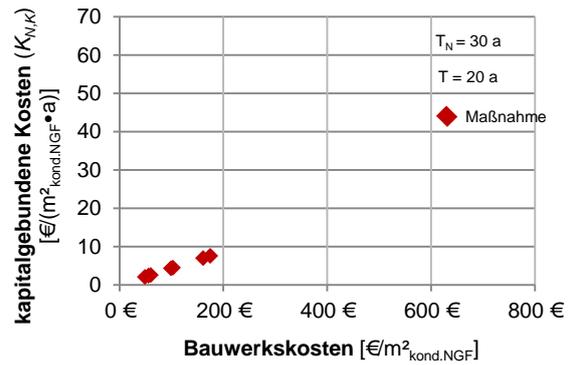
Die Installation anlagentechnischer Systemen zeigt, gegenüber den Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle, die höchsten Kapitalkosten ( $N_{K,N}$ ) aller betrachteten Gewerke auf. Die geringere Nutzungsdauer ( $T_N = 15 \text{ a}$ ) der Anlagen sowie die Berücksichtigung von Ersatzinvestitionen innerhalb der Nutzungszeit begründen die hohen Kapitalkosten.

Bei der Installation von dezentralen bzw. raumspezifischen Lüftungsanlagen entstehen kapitalgebundene Kosten von 3 bis 8  $\text{€/}(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Die Installation von zentralen Anlagen führen zu kapitalgebundenen Kosten von 21 bis 32  $\text{€/}(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$  (Abbildung 70).

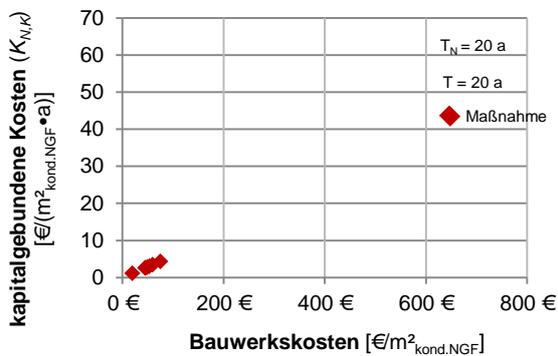
Der Austausch von Beleuchtungsanlagen bewirkt aufgrund einer längeren Nutzungszeit ( $T_N$ ) geringere kapitalgebundene Kosten von 4,4  $\text{€/}(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$  (Abbildung 71). Die Instandsetzung und Modernisierung einzelner Systemkomponenten weisen kapitalgebundene Kosten ( $N_{K,N}$ ) von maximal 2,5  $\text{€/}(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$  auf. Der Austausch von Wärmeerzeugungsanlagen verursacht Kosten von 2,8 bis 4,3  $\text{€/}(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$  (Abbildung 72). Eine Ersatzbeschaffung ( $B_{\text{Ersatz}}$ ) innerhalb des Betrachtungszeitraums ( $T$ ) ist bei Wärmeerzeugungs- sowie Beleuchtungsanlagen nicht zu berücksichtigen.



**Abbildung 70** Bauwerks- und Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) der Installation von raumluftechnischen Anlagen ( $q = 1,5 \text{ \%}/\text{a}$ )



**Abbildung 71** Bauwerks- und Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) durch den Austausch von Beleuchtungsanlagen ( $q = 1,5 \text{ \%}/\text{a}$ )



**Abbildung 72** Bauwerks- und Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) durch den Austausch von Heizungsanlagen ( $q = 1,5 \text{ \%}/\text{a}$ )

Bei der Umsetzung von Sanierungskonzepten, in denen der Wärmeschutz einzelner Bauteile verbessert und ein Austausch anlagentechnischer Systeme vernachlässigt wird, entstehen kapitalgebundene Kosten von 4 bis 12  $\text{€}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Die Sanierungskonzepte, in denen der bauliche Wärmeschutz aller Bauteile verbessert sowie die anlagentechnischen Systeme zur Beheizung, Belüftung und Beleuchtung ausgetauscht werden, weisen kapitalgebundene Kosten ( $K_{N,K}$ ) von 20 bis 44  $\text{€}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$  auf (Abbildung 73).

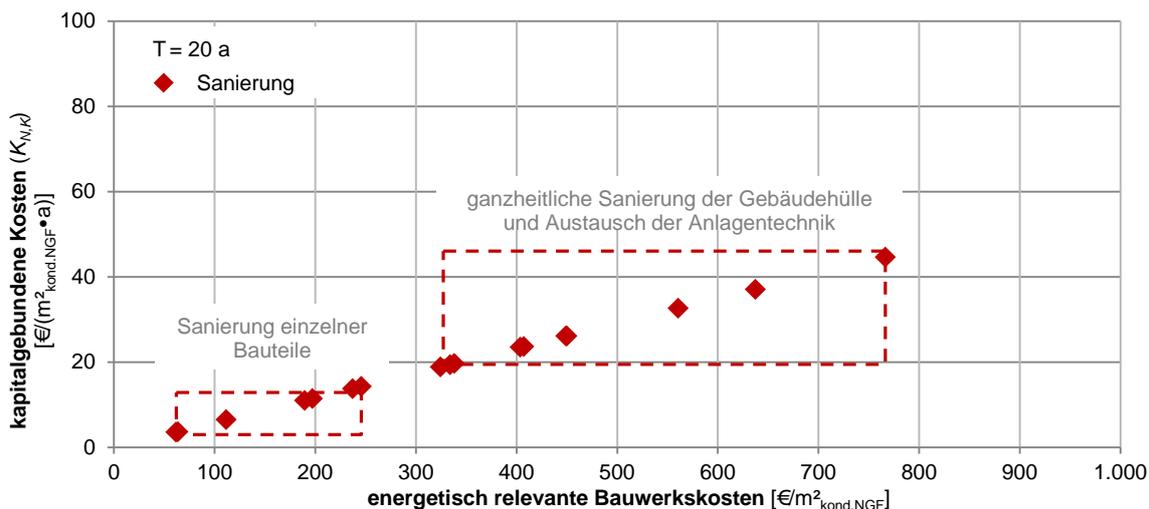


Abbildung 73 Bauwerks- und kapitalgebundene Kosten ( $K_{N,K}$ ) der energetischen Gesamtmaßnahmen ( $q = 1,5 \%/a$ )

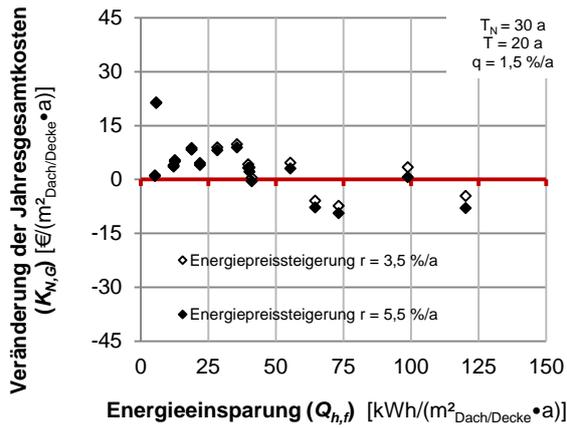
## 5.4.1 Ökonomische Wirtschaftlichkeit

### 5.4.1.1 Veränderung der Jahresgesamtkosten

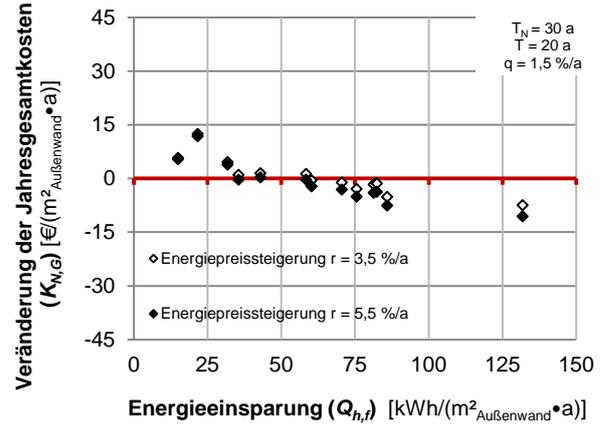
Alle energetischen Sanierungsmaßnahmen der unterseitigen Kellerdeckendämmung weisen eine Reduzierung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) auf. Neben geringeren Bauwerkskosten weisen diese Sanierungsmaßnahmen ein geringes Potenzial zur Reduzierung des Wärmeverbrauchs auf. Aufgrund des geringen Potenzials wirken sich erhöhte Energiepreissteigerungen ( $q$ ) nur gering auf die Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) aus. Abbildung 77 zeigt die Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) durch die Kellerdeckendämmung.

Die Auswirkung von unterschiedlichen Energiepreissteigerungen lassen sich bei der energetischen Sanierung von Außenwänden, Fenstern und Dächern erkennen, da höhere energetische Einsparpotenziale vorliegen. Die energetische Sanierung von Außenwänden und Dächern bewirkt vereinzelt eine Reduzierung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ). Abbildung 74 und Abbildung 75 zeigen die Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) durch diese Maßnahmen.

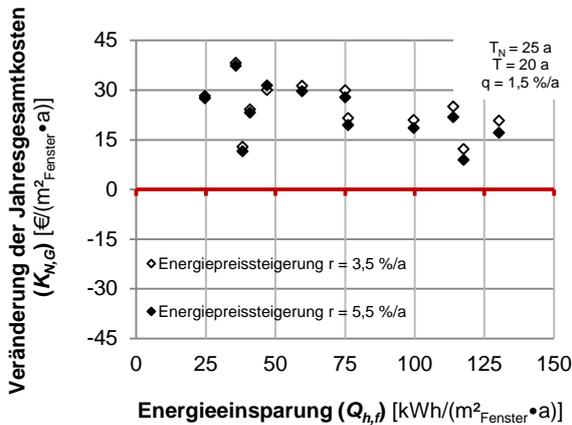
Der Fensteraustausch weist ein ebenfalls hohes Potenzial zur Energieeinsparung auf. Aufgrund hoher Bauwerkskosten erreicht keine der Maßnahmen eine Reduzierung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ). Der Austausch von Fenstern hat eine Erhöhung der Jahresgesamtkosten von 8 bis 33 €/m²<sub>Fenster</sub>•a zur Folge (Abbildung 76).



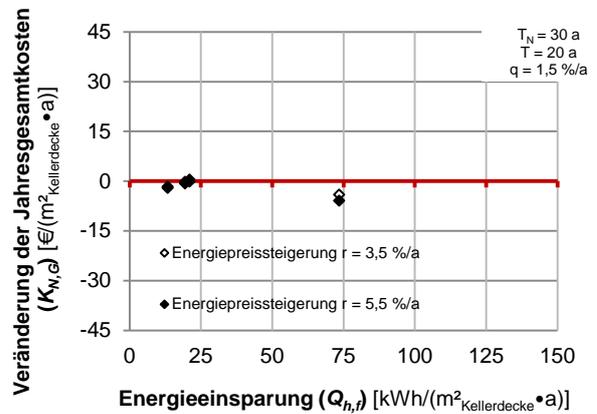
**Abbildung 74** Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) aufgrund der Dämmung von Dächern und obersten Geschossdecken ( $T_N = 30$  a)



**Abbildung 75** Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) aufgrund der Dämmung von Außenwänden ( $T_N = 30$  a)



**Abbildung 76** Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) aufgrund des Austauschs von Fenstern ( $T_N = 25$  a)

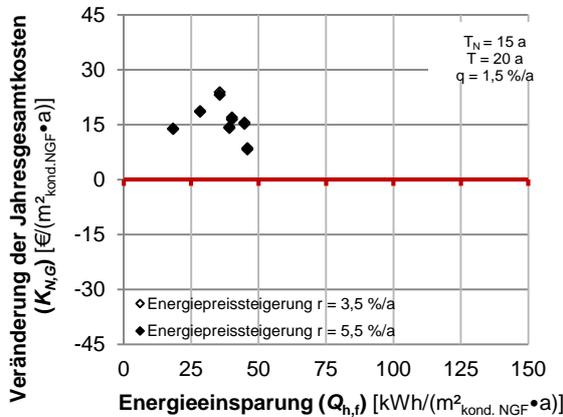


**Abbildung 77** Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) aufgrund der Dämmung von Kellerdecken ( $T_N = 30$  a)

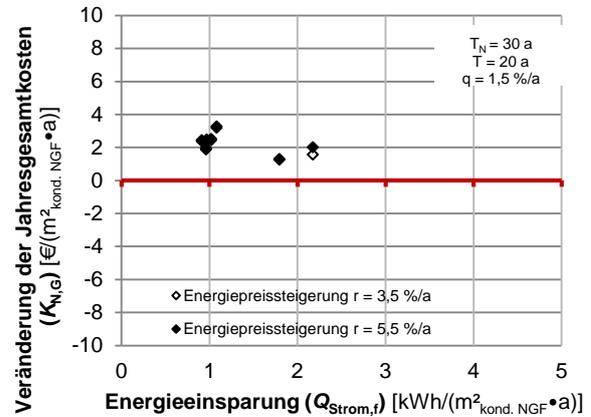
Bei der Installation und dem Betrieb raumluftechnischer Anlagen mit wärmerückgewinnenden Systemen ist eine Gegenüberstellung der kapitalgebundenen Kosten ( $K_{N,K}$ ) mit dem reduzierten Wärmebedarf ( $Q_{h,t}$ ) erforderlich. Der zum Betrieb der Anlagen notwendige Strombedarf ( $Q_{Strom,t}$ ) ist bei der Ermittlung der Jahresgesamtkosten berücksichtigt. Der Betrieb dieser Anlagen weist keine Reduzierungen der Jahresgesamtkosten auf. Höhere Energiepreissteigerungen bewirken keine Reduzierung der Jahresgesamtkosten. Aus der Installation und dem Betrieb raumluftechnischer Anlagen resultiert eine Erhöhung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) von 8 bis 25 €/m<sup>2</sup><sub>konnd.NGF</sub>·a) (Abbildung 78).

Die ökonomische Bewertung der installierten Beleuchtungsanlagen stellt die kapitalgebundenen Kosten ( $K_{N,K}$ ) dem reduzierten Strombedarf gegenüber. Der Austausch von Beleuchtungs-

anlagen erzielt ebenfalls keine Reduzierung der Jahresgesamtkosten. Das geringe energetische Einsparpotenzial bewirkt bei unterschiedlichen Energiepreissteigerungen keine signifikante Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ). Abbildung 79 zeigt Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) aufgrund des Austauschs von Beleuchtungsanlagen.

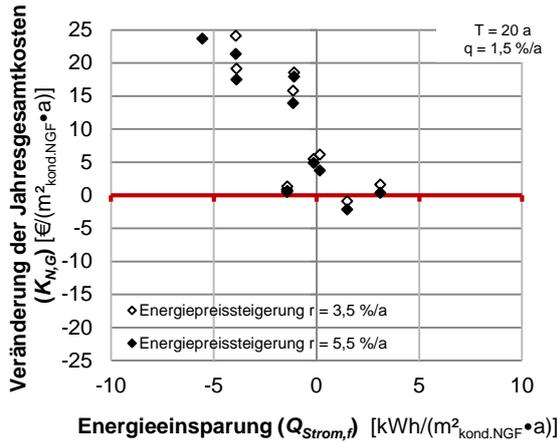


**Abbildung 78** Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) aufgrund der Installation und dem Betrieb von RLT-Anlagen ( $T_N = 15$  a)

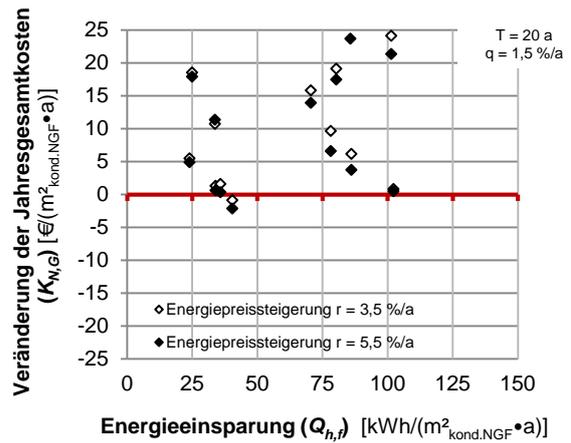


**Abbildung 79** Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) aufgrund des Austauschs von Beleuchtungsanlagen ( $T_N = 30$  a)

Durch die Installation raumluftechnischer Anlagen sowie der Ausstattung der Lehrräume mit Beamern und Smartboards ist eine Erhöhung des Stromverbrauchs ( $Q_{Strom,t}$ ) nach den Sanierungsmaßnahmen festzustellen. Der ökonomische Erfolg der Sanierungsmaßnahmen hängt in diesem Zusammenhang von der Veränderung des Stromverbrauchs ( $Q_{Strom,t}$ ) ab. Die Gebäude, in denen eine Erhöhung des Stromverbrauchs nach der Sanierung vorliegt, weisen gegenüber den anderen Gebäuden mit verringertem Stromverbrauch höhere Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) auf. Abbildung 80 zeigt die Abhängigkeit der veränderten Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) zu den Energieeinsparungen ( $Q_{Strom,t}$ ) der Gesamtmaßnahmen auf. Eine Abhängigkeit zwischen der Veränderung der Jahresgesamtkosten und der reduzierten Wärmeverbräuche ( $Q_{h,t}$ ) lässt sich nicht nachweisen (Abbildung 81).



**Abbildung 80** Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) und des Stromverbrauchs ( $Q_{Strom,t}$ ) durch die Gesamtmaßnahmen

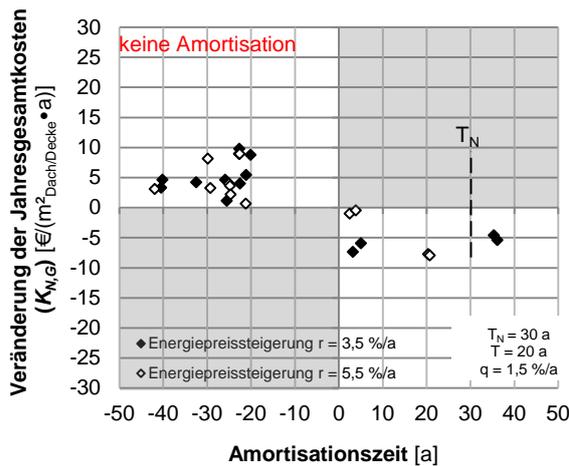


**Abbildung 81** Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) und des Wärmeverbrauchs ( $Q_{h,t}$ ) durch die Gesamtmaßnahmen

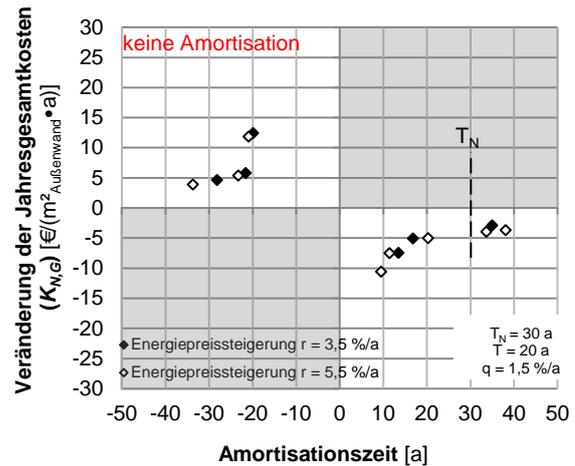
### 5.4.1.2 Ermittlung der Amortisationszeiten

Viele Sanierungsmaßnahmen an Dächern, obersten Geschossdecken und Außenwänden erreichen keine Amortisationszeit. Einige Maßnahmen amortisieren sich innerhalb der angesetzten Nutzungszeit ( $T_N$ ) von 30 Jahren (Abbildung 82 und Abbildung 83). Durch den Fensteraustausch ist keine Reduzierung der Jahresgesamtkosten und folglich keine Amortisation zu erwarten (Abbildung 84).

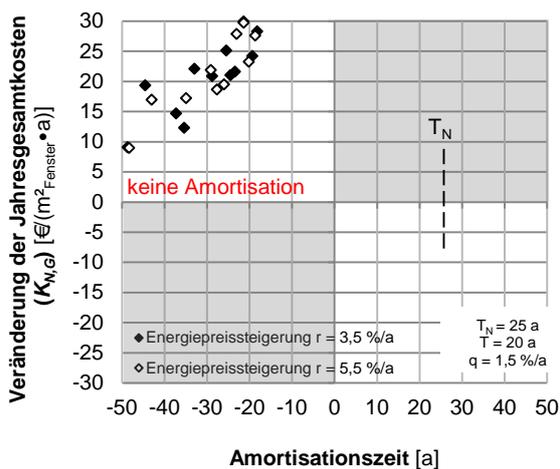
Die Dämmung der untersten Geschossdecken zu unbeheizten Kellerräumen weist eine Reduzierung der Jahresgesamtkosten auf. Trotz des geringen Potenzials zur Reduzierung des Wärmeverbrauchs ( $Q_{h,t}$ ) treten an diesem Bauteil die kürzesten Amortisationszeiten auf (Abbildung 85).



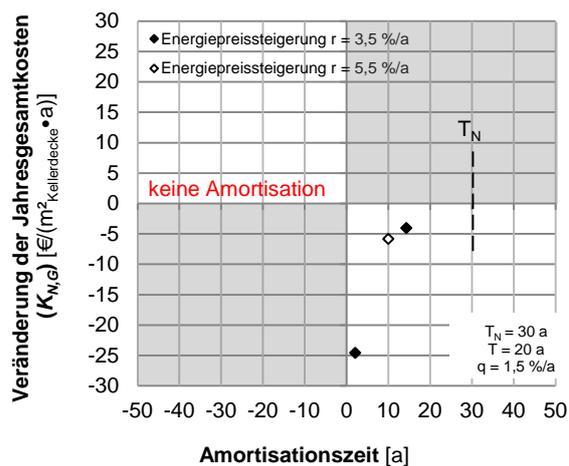
**Abbildung 82** Amortisationszeit bei der Dämmung von Dächern und obersten Geschossdecken ( $T_N = 30$  a)



**Abbildung 83** Amortisationszeit bei der Dämmung von Außenwänden ( $T_N = 30$  a)



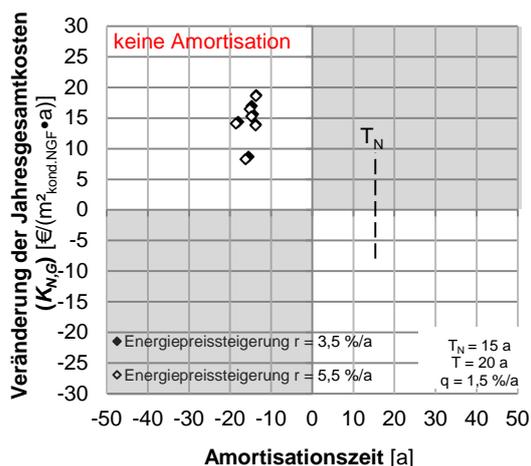
**Abbildung 84** Amortisationszeit beim Austausch von Fenstern ( $T_N = 25$  a)



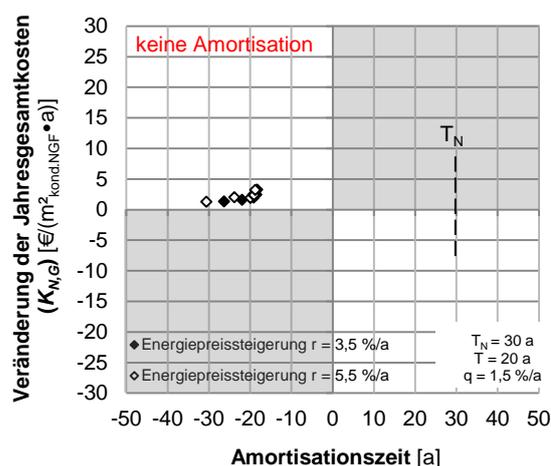
**Abbildung 85** Amortisationszeit bei der Dämmung von Kellerdecken ( $T_N = 30$  a)

Die Installation und der Betrieb raumlufttechnischer Anlagen mit wärmerückgewinnenden Systemen erzielt keine Amortisation. Aufgrund der notwendigen Ersatzbeschaffungen ( $B_{Ersatz}$ ) innerhalb der Betrachtungszeit ( $T$ ) fallen gegenüber den reduzierten bedarfsgebundenen Kosten höhere kapitalgebundenen Kosten an (Abbildung 86).

Der Austausch von Beleuchtungsanlagen weist gegenüber der Installation raumlufttechnischen Anlagen geringere kapitalgebundene Kosten auf und verzeichnet eine Reduzierung des Stromverbrauchs ( $Q_{Strom,r}$ ). Die energetischen Einsparungen decken die kapitalgebundenen Kosten jedoch nicht. Abbildung 87 zeigt die Amortisationszeit beim Austausch und Betrieb von Beleuchtungsanlagen.

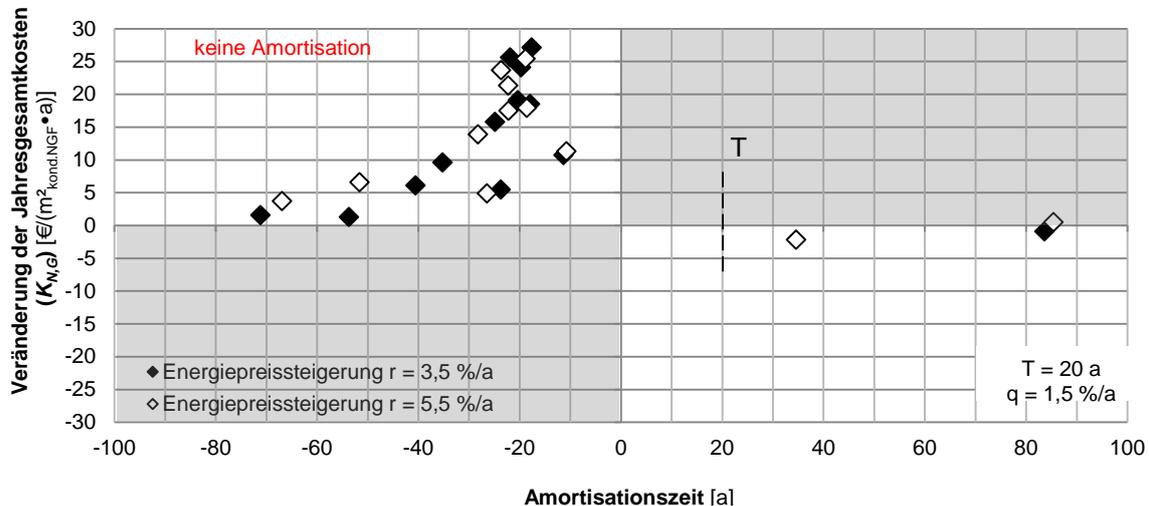


**Abbildung 86** Amortisationszeit bei der Installation und dem Betrieb von RLT-Anlagen ( $T_N = 15$  a)



**Abbildung 87** Amortisationszeit bei der Installation und dem Betrieb von Beleuchtungsanlagen ( $T_N = 30$  a)

Zwei der 17 Gesamtsanierungsmaßnahmen erzielen eine Reduzierung der Jahresgesamtkosten. Keine der Gesamtsanierungsmaßnahmen weist eine Amortisation innerhalb des Betrachtungszeitraums ( $T$ ) auf. Die Sanierungen stellen sich anhand dieser Bewertungsmethode als unwirtschaftlich dar (Abbildung 88).

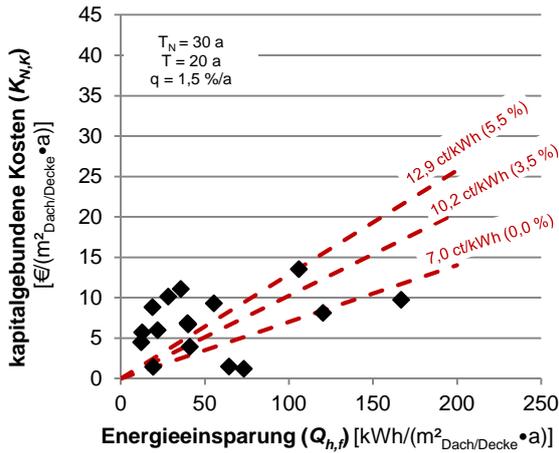


**Abbildung 88** Amortisationszeit der energetischen Gesamtsanierungsmaßnahmen ( $T = 20$  a)

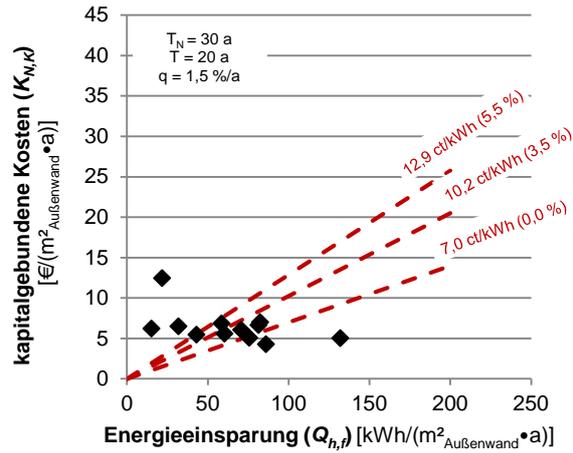
### 5.4.1.3 Ermittlung des äquivalenten Energiepreises

Die Ergebnisse der ökonomischen Betrachtung anhand des äquivalenten Energiepreises sind mit den Veränderungen der Jahresgesamtkosten zu vergleichen. Einige Sanierungsmaßnahmen an Dächern, obersten Geschossdecken und Außenwänden stellen sich erst ab einer Energiepreissteigerung von  $> 5,5$  %/a als wirtschaftlich dar (Abbildung 89 und Abbildung 90). Der Fensteraustausch weist gegenüber anderen Bauteilen hohe äquivalente Energiepreise auf (Abbildung 91).

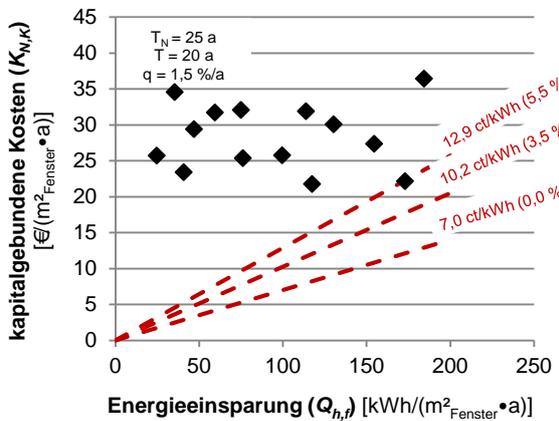
Aus der unterseitigen Dämmung von Geschossdecken, die an unbeheizte Kellerräume grenzen, resultieren die geringsten äquivalenten Energiepreise von  $< 12,5$  ct/kWh. Die Dämmung von untersten Geschossdecken ist bei einer Energiepreissteigerung von  $3,5$  %/a als wirtschaftlich zu bewerten (Abbildung 92).



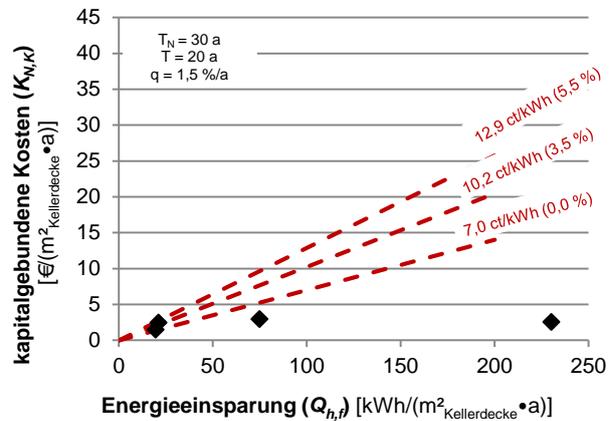
**Abbildung 89** Ermittlung des äquivalenten Energiepreises bei der Dämmung von Dächern und obersten Geschossdecken



**Abbildung 90** Ermittlung des äquivalenten Energiepreises bei der Dämmung von Außenwänden

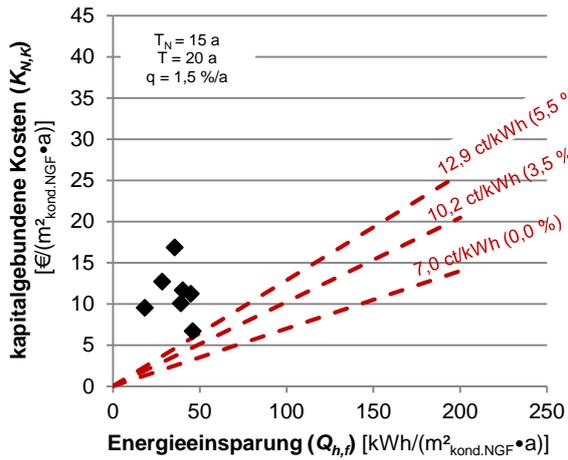


**Abbildung 91** Ermittlung des äquivalenten Energiepreises beim Austausch von Fenstern

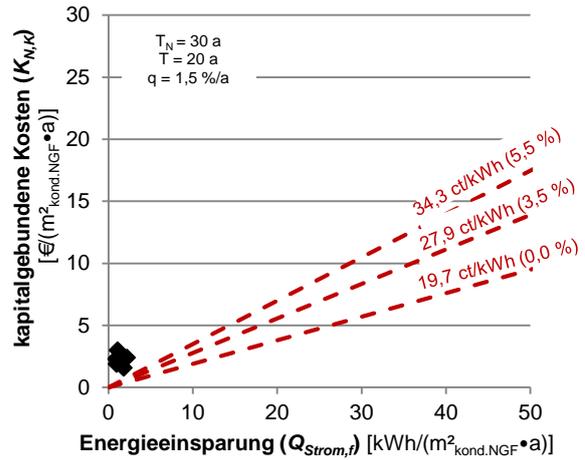


**Abbildung 92** Ermittlung des äquivalenten Energiepreises bei unterseitiger Dämmung von Kellerdecken

Aus der Gegenüberstellung der reduzierten Lüftungswärmeverluste ( $Q_{V,min}$ ) durch den Betrieb raumluftechnischer Anlagen mit wärmerückgewinnenden Systemen und den kapitalgebundenen Kosten ( $K_{N,K}$ ) resultiert ein äquivalenter Energiepreis zur Wärmeeinsparung. Die Betrachtung berücksichtigt die Energiekosten ( $K_{N,B}$ ) durch den Anlagenbetrieb. Alle Maßnahmen weisen hohe äquivalente Energiepreise von durchschnittlich 36 ct/kWh<sub>Wärme</sub> auf (Abbildung 93). Aus dem Austausch von Beleuchtungsanlagen fallen gegenüber aktuellen Strompreisen ebenfalls höhere äquivalente Energiepreise von rund 2 €/kWh<sub>Strom</sub> an (Abbildung 94).

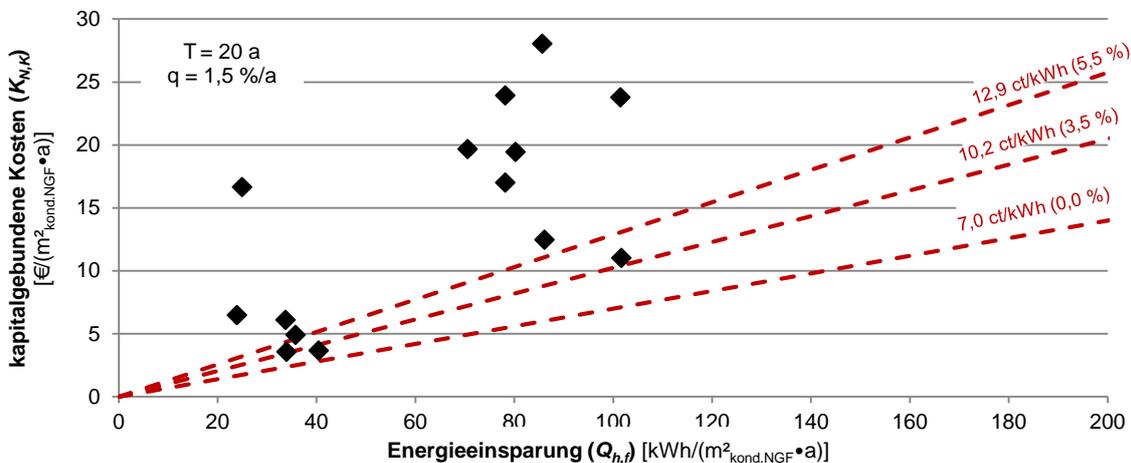


**Abbildung 93** Ermittlung des äquivalenten Energiepreises bei der Installation und dem Betrieb von RLT-Anlagen



**Abbildung 94** Ermittlung des äquivalenten Energiepreises bei Austausch und Betrieb von Beleuchtungsanlagen

Die äquivalenten Energiepreise der energetischen Gesamtsanierungsmaßnahmen basieren auf den reduzierten Wärmeverbräuchen ( $Q_{h,i}$ ) und den kapitalgebundenen Kosten ( $K_{N,K}$ ). Der äquivalente Energiepreis zur Reduzierung des Wärmeverbrauchs ( $Q_{h,i}$ ) ist gegenüber den durchschnittlichen Energiepreisen erhöht. Lediglich zwei der 17 Gesamtmaßnahmen weisen bei einer Energiepreissteigerung von 3,5%/a eine Wirtschaftlichkeit auf. Dabei handelt es sich um Sanierungskonzepte, die die Fensterlüftung bevorzugen und nach der Sanierung eine Reduzierung des Stromverbrauchs erzielen (Abbildung 95).



**Abbildung 95** Ermittlung des äquivalenten Energiepreises der energetischen Gesamtsanierungsmaßnahmen

Der Fensteraustausch weist innerhalb der Bauteile den höchsten äquivalenten Energiepreis von durchschnittlich 56 ct/kWh<sub>Wärme</sub> auf. Aus der unterseitigen Dämmung der Geschosdecken resultieren die geringsten äquivalenten Energiepreise von 6 ct/kWh<sub>Wärme</sub>. Der Betrieb von RLT-Anlagen mit wärmerückgewinnenden Systemen führt zu einem äquivalenten Energiepreis, der

den Energiepreis der Gesamtanierungsmaßnahmen übertrifft. Der Energiepreis der Gesamtmaßnahmen beträgt im Mittel 24 ct/kWh<sub>Wärme</sub> (Abbildung 96).

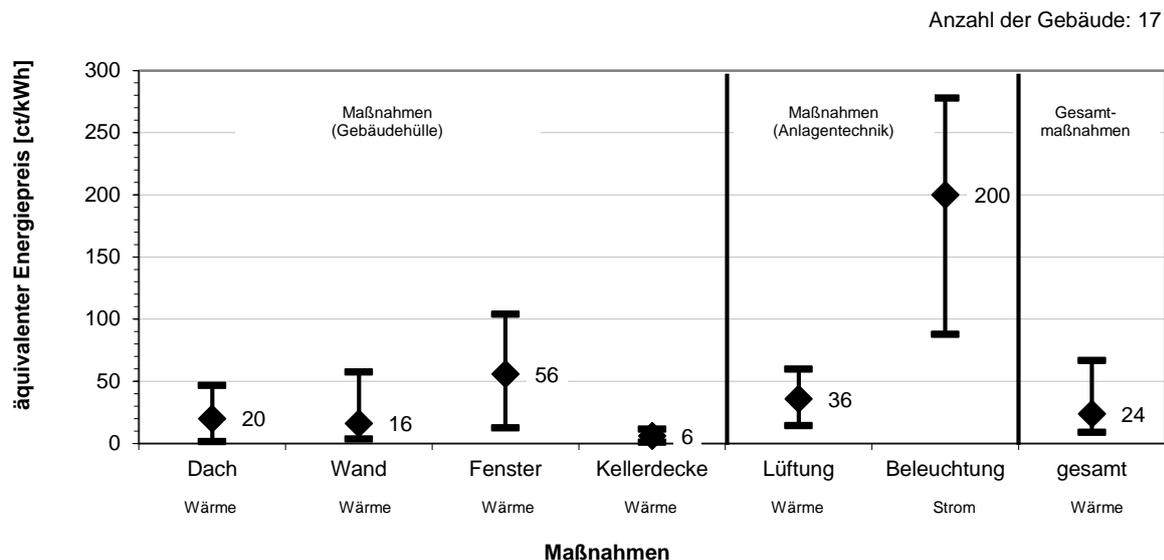


Abbildung 96 Gegenüberstellung des äquivalenten Energiepreises aller Einzel- sowie Gesamtmaßnahmen (T = 20 a)

### 5.4.2 Ökologische Wirtschaftlichkeit

Der Preis der eingesparten Primärenergieemenge beläuft sich bei den Gesamtmaßnahmen auf 10 bis 60 ct/kWh. Die roten Markierungen stellen die sanierten Gebäude dar, deren wärmeerzeugenden Anlagen nach der Sanierung auf erneuerbaren Energien basieren. Die Einbindung einer regenerativen Wärmeproduktion in das Gesamtversorgungskonzept weist gegenüber den Gesamtanierungsmaßnahmen mit konventionellen Wärmeerzeugungsanlagen ein Preis-Leistungs-Verhältnis (PLV) von < 30 ct/kWh auf (Abbildung 97). Die regenerative Wärmeproduktion erreicht bei der Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emission ein PLV von < 1 €/kg<sub>CO2</sub> (Abbildung 98).

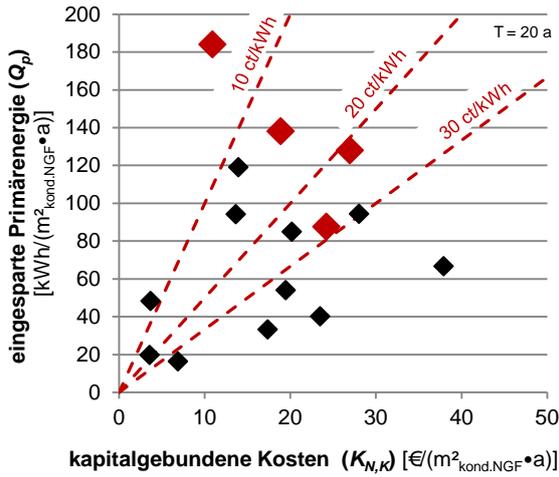


Abbildung 97 Ermittlung des PLV der eingesparten Primärenergie (T = 20 a)

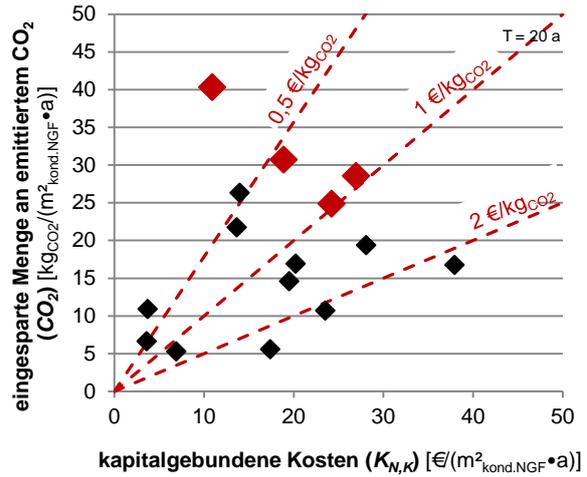


Abbildung 98 Ermittlung des PLV der reduzierten CO<sub>2</sub>-Emission (T = 20 a)

## 5.5 Innenraumkomfort

### 5.5.1 Thermischer Komfort

#### 5.5.1.1 Bewertung des thermischen Komforts nach DIN 4108-2 und VDI 6040

Der durchschnittliche Anteil, in dem der thermische Komfort nach VDI 6040 (vgl. [12] S. 3) der Kategorie I (neutral) zuzuordnen ist, beträgt 85,5 %. Der thermische Komfort entspricht in einzelnen Klassenräumen mit einer anteiligen Nutzungszeit von 30 % der Kategorie III- (kalt). Der Anteil des Zeitraums, in dem eine Überhitzung ( $(\theta_{ar,i}) > 26 \text{ °C}$ ) auftritt, beträgt maximal 12 % (Kategorie III+). Die in den Klassenräumen gemessenen Übertemperaturgradstunden überschreiten den Grenzwert von 254 Kh/a nicht und halten die Anforderungen der DIN 4108-2 (vgl. [48] Abs. 8) ein. In den Klassenräumen ist eher eine Einschränkung des thermischen Komforts aufgrund von Unterkühlung anstatt Überhitzung festzustellen (Abbildung 99).

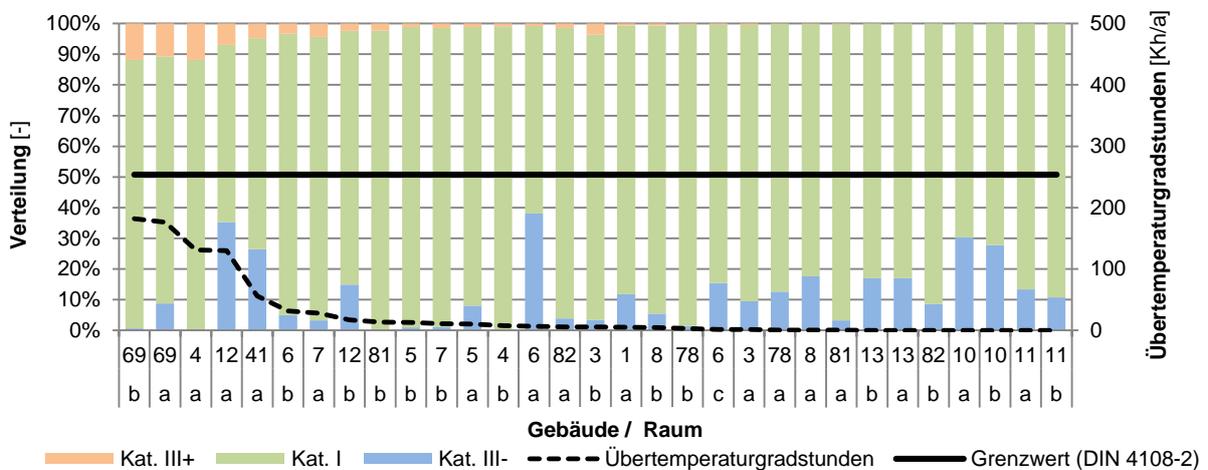
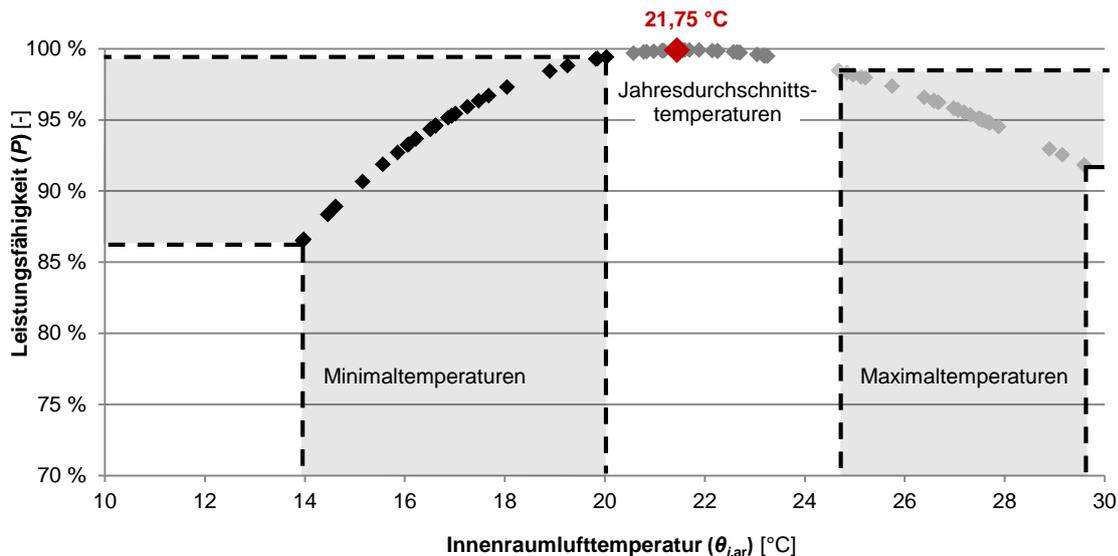


Abbildung 99 Bewertung des thermischen Komforts nach VDI 6040 [12] und DIN 4108-2 [48]

Das Ergebnis der Messung lässt den Schluss zu, dass zu kalte Innenraumlufttemperaturen ( $\theta_{i,ar}$ ) während der Heizperiode eine Verringerung der Leistungsfähigkeit ( $P$ ) um bis zu 14 % bei Schülern und Lehrern nach Seppänen et al. (vgl. [38] S. 6ff.) hervorrufen. Während der Nicht-Heizperiode treten geringere Einschränkungen der Leistungsfähigkeit ( $P$ ) der Schüler von maximal 8 % aufgrund zu warmer Innenraumtemperaturen ( $\theta_{i,ar}$ ) auf. Abbildung 100 zeigt die Leistungsfähigkeit ( $P$ ) der Schüler und Lehrer in Abhängigkeit zur Innenraumlufttemperatur ( $\theta_{i,ar}$ ) in den untersuchten Klassenräumen.

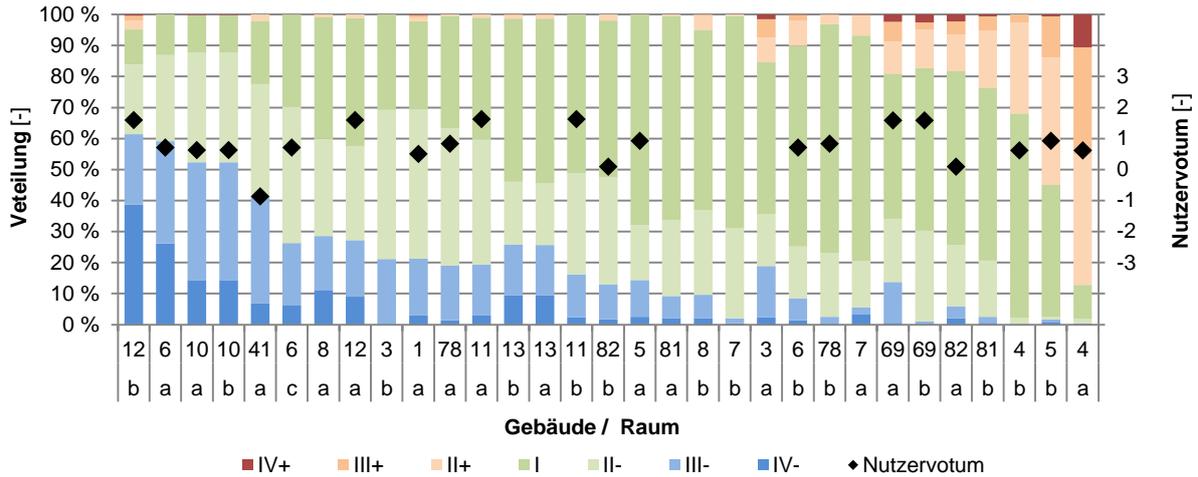


**Abbildung 100** Minimale Leistungsbereitschaft der Schüler in den 31 Klassenräumen nach Seppänen et al. [38]

### 5.5.1.2 Bewertung des thermischen Komforts während der Heizperiode

Die DIN EN ISO 7730 (vgl. [69] S. 21) bewertet den thermischen Komfort in der Heizperiode in 6 von 31 Klassenräumen als „zu kalt“ (Kat. IV-). Der Zeitraum, in dem der thermische Komfort der Kategorie IV- entspricht, weist einen Anteil von > 35 % des Zeitraums innerhalb der Heizperiode auf. Die Zeiträume, in dem die Innenraumlufttemperatur ( $\theta_{i,ar}$ ) als „zu warm“ zu bewerten ist, betragen maximal 10 % der Zeit innerhalb der Nicht-Heizperiode.

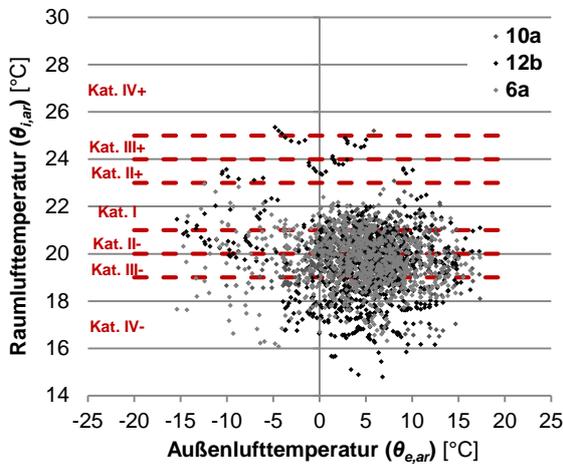
Die Gegenüberstellung der tatsächlichen Innenraumtemperatur mit dem Nutzervotum zum thermischen Komfort während der Heizperiode lässt keine Übereinstimmung zu. Die Ergebnisse zeigen keine Abhängigkeit des Nutzervotums zur gemessenen Innenraumtemperatur. Die Nutzer bewerten die Innenraumlufttemperatur ( $\theta_{i,ar}$ ) in allen Klassenräumen als „etwas warm“ (Nutzervotum: +1) (Abbildung 101).



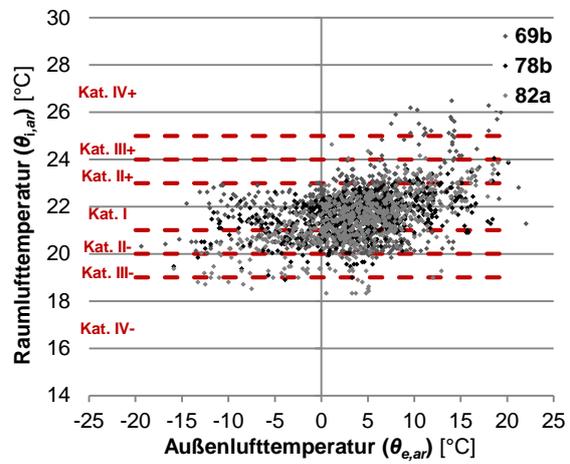
**Abbildung 101** Bewertung des thermischen Komforts in der Heizperiode nach DIN EN ISO 7730 [69] und den Nutzer

Die Unterkühlungsstunden treten bei einer Außenlufttemperatur ( $\theta_{e,ar}$ ) zwischen 0 bis 15 °C auf. Der thermische Komfort ist in diesem Zeitraum während der Heizperiode in die Kategorien III- (kalt) und IV- (zu kalt) einzuordnen. Abbildung 102 stellt den als zu kalt bewerteten thermischen Komfort während der Heizperiode nach DIN EN ISO 7730 (vgl. [69] S. 21) dar.

Die Gegenüberstellung von drei Klassenräumen, in denen ein guter thermischer Komfort gegeben ist, zeigt Abbildung 103. In diesen Räumen sind die Innenraumlufttemperaturen ( $\theta_{i,ar}$ ) den Kategorien I (neutral) bzw. II- (etwas kühl) zuzuordnen.



**Abbildung 102** Bewertung des thermischen Komforts in den Referenzräumen während der Heizperiode nach DIN EN ISO 7730 [69]



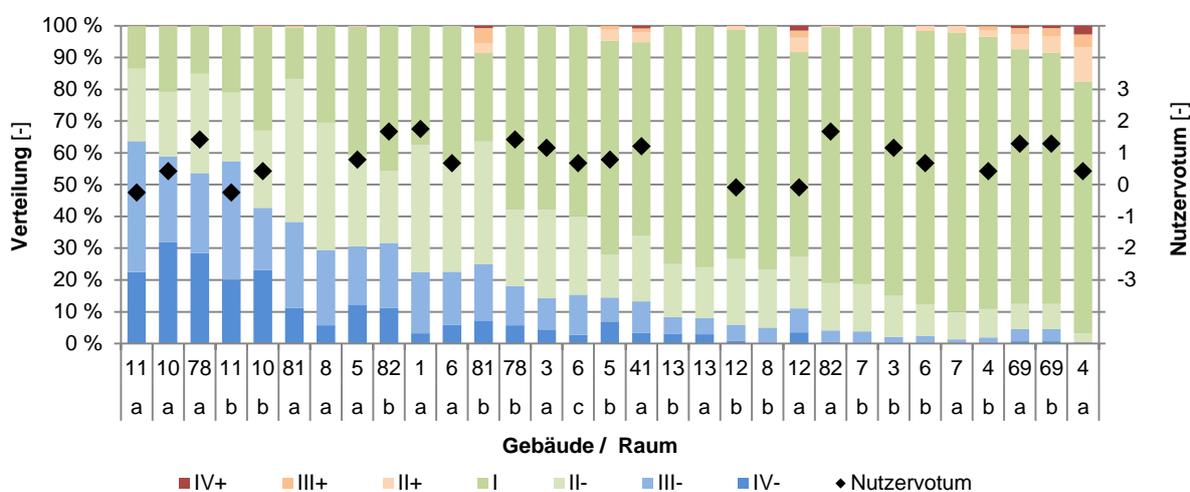
**Abbildung 103** Bewertung des thermischen Komforts in den Referenzräumen während der Heizperiode nach DIN EN ISO 7730 [69]

### 5.5.1.3 Betrachtung der Nicht-Heizperiode

Größtenteils entsprechen die Raumlufitemperaturen ( $\theta_{i,ar}$ ) in den untersuchten Klassenräumen den Kategorien III- bis III+. Die Zeiträume, in denen sich die Raumtemperaturen ( $\theta_{i,ar}$ ) im zu warmen Bereich (Kat. IV+) befinden, beträgt weniger als 5 % der Zeit.

Vielmehr treten zu kühle Temperaturen auf. Der Anteil des Messzeitraums, in dem zu kalte Temperaturen in den Räumen auftreten, beträgt maximal rund 30 %. Die DIN EN 15251 [68] bewertet den thermischen Komfort in acht Räumen als zu kalt (Kat. D-). Der Zeitraum, in dem der thermische Komfort in diesen Räumen der Kategorie D- zuzuordnen ist, beläuft sich auf einen Anteil von > 10 % des gesamten Messzeitraums.

Die Gegenüberstellung der gemessenen Temperaturen mit dem subjektiven Empfinden der Gebäudenutzer ergibt keine aussagekräftigen Ergebnisse. Die Nutzer bewerten den thermischen Komfort in der Nicht-Heizperiode mit „neutral“ bis „etwas warm“. Abbildung 104 zeigt die Bewertung des thermischen Komforts nach DIN EN 15251 [68] und durch den Nutzer während der Nicht-Heizperiode.

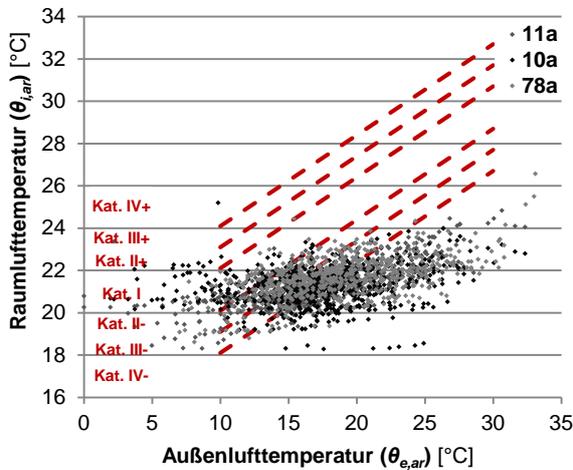


**Abbildung 104** Bewertung des thermischen Komforts nach DIN EN 15251 [68] und durch den Nutzer während der Nicht-Heizperiode

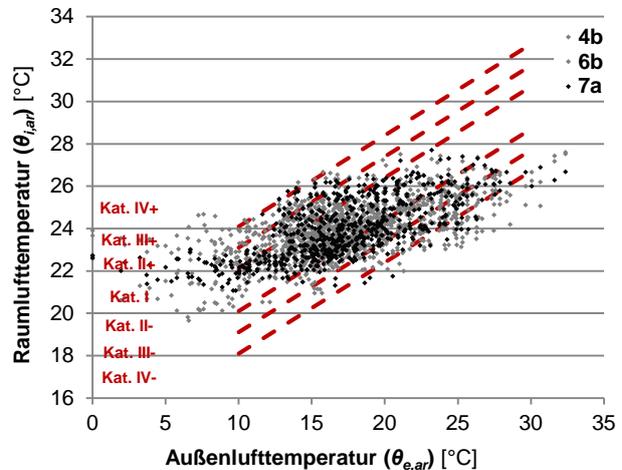
Den größten Anteil an Unterkühlungsstunden (Kat. IV-) weisen die Räume 10a, 11a und 78a auf. Der thermische Komfort in den Innenräumen ( $\theta_{i,ar}$ ) ist bei einer Außenlufttemperatur ( $\theta_{e,ar}$ ) über 15 °C der Kategorie IV- (zu kalt) zuzuordnen. Bei einer Außenlufttemperatur ( $\theta_{e,ar}$ ) > 26 °C überschreiten die Raumlufttemperaturen ( $\theta_{i,ar}$ ) die Grenzwerte der VDI 6040 (vgl. [12] S. 3) von 26 °C nicht. Abbildung 105 zeigt die Bewertung des thermischen Komforts in der Nicht-Heizperiode nach DIN EN 15251 [68].

Die Klassenräume, die mit außenliegenden Sonnenschutzsystemen ausgestattet sind, weisen den größten Anteil an Nutzungsstunden auf, in denen ein guter thermischer Komfort nach DIN EN 15251 [68] vorliegt. Ab einer Außenlufttemperatur > 20 °C treten Unterkühlungsstunden auf, die als „Ausreißer“ zu verstehen sind. Abbildung 106 zeigt die Bewertung des thermischen Komforts in der in der Nicht-Heizperiode nach DIN EN 15251 [68] sowie das Verhältnis der Raumlufttemperatur zur Außenlufttemperatur auf.

Eine Abhängigkeit der Raumorientierung sowie der Fensterflächenanteile der Fassaden zur Bewertung des thermischen Komforts ist nicht ersichtlich. Zur Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahmen werden diese Parameter in späteren Arbeitsschritten berücksichtigt.



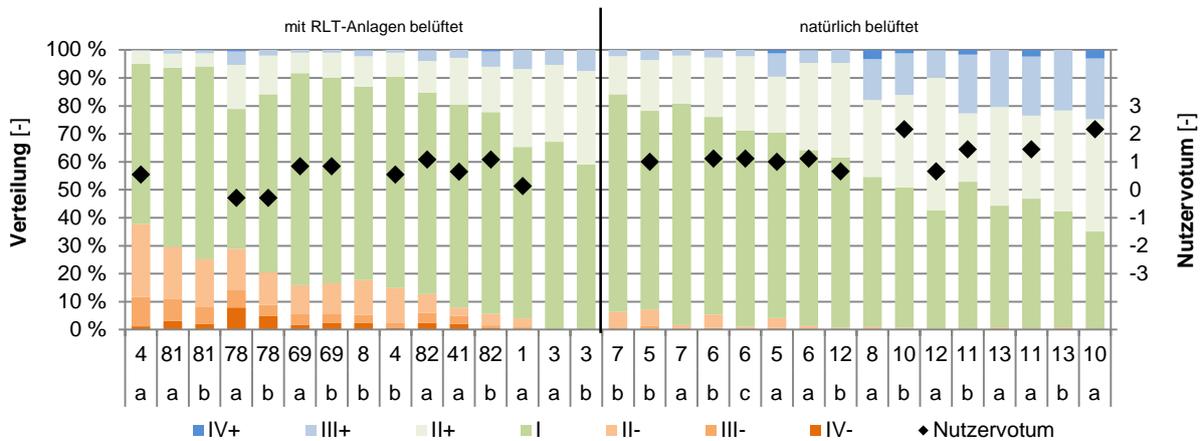
**Abbildung 105** Bewertung des thermischen Komforts in der Nicht-Heizperiode nach DIN EN 15251 [68]



**Abbildung 106** Bewertung des thermischen Komforts in der Nicht-Heizperiode nach DIN EN 15251 [68]

### 5.5.2 Hygrischer Komfort

Der hygrische Komfort entspricht nach DIN EN 15251 [68] in über 90 % der Nutzungszeit den Kategorien III- bis III+. Der Anteil des Betrachtungszeitraums, in denen die Innenraumluft als „zu trocken“ oder „zu feucht“ zu bewerten ist, beträgt < 10 %. Die Gegenüberstellung der Nutzerbefragung zeigt eine Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Die Nutzer empfinden mit steigender Innenraumluftfeuchtigkeit ( $\phi_{i,ar}$ ) den hygrischen Komfort in den Räumen als „feucht“ (Kat. III+) und in den Räumen, die über RLT-Anlagen belüftet werden, zeitweise als „zu trocken“.

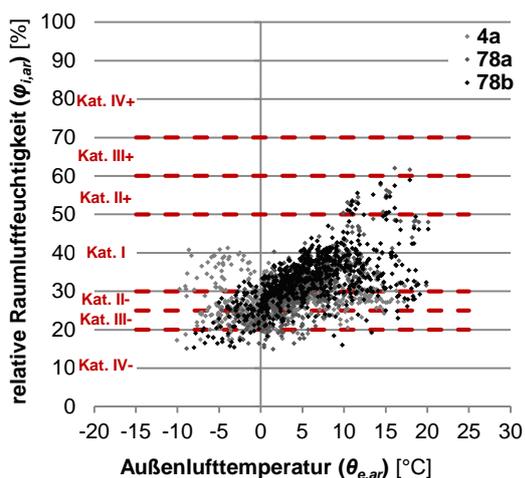


**Abbildung 107** Bewertung des hygrischen Komforts nach DIN EN 15251 [68] und durch den Nutzer

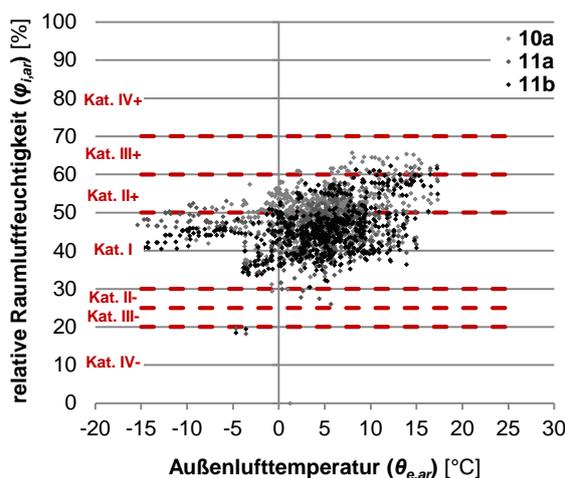
Das Auftragen der Außenlufttemperatur ( $\theta_{e,ar}$ ) gegenüber der gemessenen Raumluftfeuchte ( $\varphi_{i,ar}$ ) ermöglicht die Ermittlung des Zeitraums, in denen die Raumluft als „zu trocken“ zu bewerten ist.

In den Räumen 4a, 78a und 78b treten Unbehaglichkeiten aufgrund geringer Innenraumluftfeuchtigkeit bei einer Außenlufttemperatur ( $\theta_{e,ar}$ ) unter 5 °C auf. Die Belüftung dieser Räume geschieht ausschließlich über raumluftechnische Anlagen. Bis auf einige „Ausreißer“ sind keine Zeiträume ersichtlich, in denen die Luft eine relative Feuchtigkeit ( $\varphi_{i,ar}$ ) von mehr als 50 % aufweist (Abbildung 108). Eine aktive Befeuchtung der Zuluft bzw. eine Feuchterückgewinnung aus der Abluft ist in der kalten Jahreszeit zu empfehlen, um eine Austrocknung der Raumluft zu vermeiden.

Ein guter hygrischer Komfort tritt innerhalb des gesamten Jahres in den natürlich belüfteten Räumen auf. Die Luftfeuchtigkeit entspricht den Kategorien „neutral“ (Kat. I) bis „etwas feucht“ (Kat. II+). Abbildung 109 zeigt die Bewertung des hygrischen Komforts nach DIN EN 15251 [68] in den natürlich belüfteten Räumen.



**Abbildung 108** Bewertung des hygrischen Komforts in mechanisch belüfteten Räumen nach DIN EN 15251 [68]

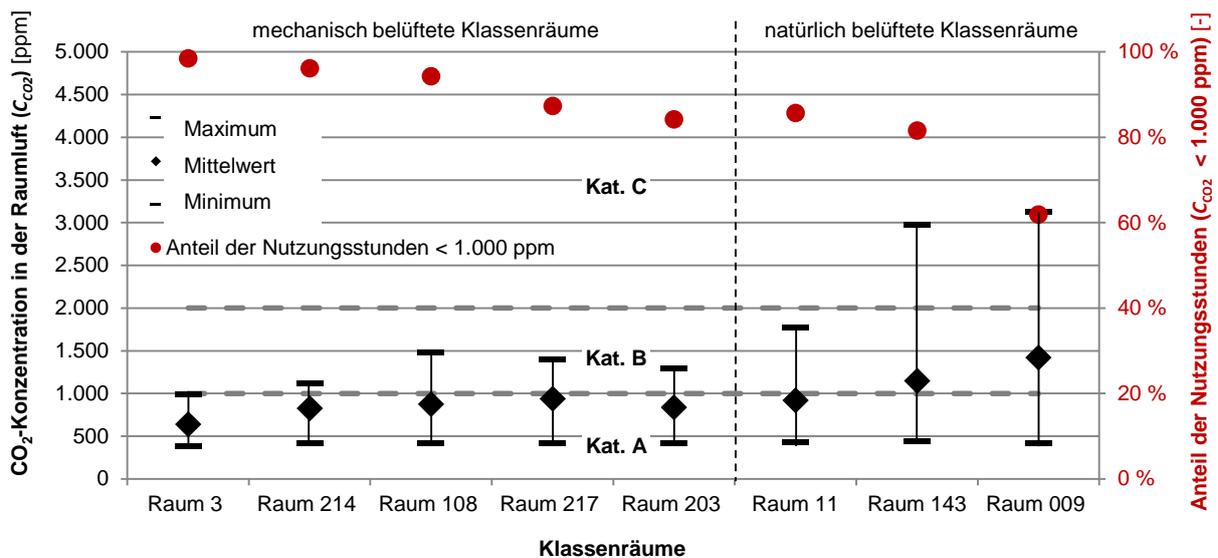


**Abbildung 109** Bewertung des hygrischen Komforts in natürlich belüfteten Räumen nach DIN EN 15251 [68]

### 5.5.3 Hygienischer Komfort

Einen Unterschied der Luftqualität in den mechanisch und natürlich belüfteten Klassenräumen zeigen die gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ( $C_{CO_2}$ ) in der Raumluft auf. Die durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Konzentration ( $C_{CO_2}$ ) in den mechanisch belüfteten Räumen beträgt weniger als 1.000 ppm und gilt als „hygienisch unbedenklich“ (Kat. A). Die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Innenraumluft entspricht dem Wert der Pettenkofer-Zahl [72]. Der Anteil der Nutzungsstunden, die nach VDI 6040 (vgl. [12] S. 4) als „hygienisch unbedenklich“ zu bewerten ist, beträgt > 80 % des Messzeitraums.

In den natürlich belüfteten Klassenräumen treten im Mittel höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Raumluft ( $C_{CO_2}$ ) von bis zu 3.100 ppm auf. Die Untersuchung bewertet die hygienische Raumluftqualität als z.T. „nicht akzeptabel“. Der Anteil der Nutzungsstunden, in der die hygienische Qualität der Raumluft nach VDI 6040 (vgl. [12] S. 4) als „hygienisch unbedenklich“ zu bewerten ist, beträgt 61 bis 85 %. Der Betrieb raumluftechnischer Anlagen verbessert somit die Luftqualität in Klassenräumen nachweislich. Abbildung 110 stellt die hygienische Raumluftqualität der natürlich und mechanisch belüfteten Klassenräume nach VDI 6040 [12] gegenüber.



**Abbildung 110** Bewertung der hygienischen Raumluftqualität in den Klassenräumen nach VDI 6040 [12]

Der Betrieb raumluftechnischer Anlagen führt mit der Sicherstellung des nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 10) geforderten Außenluftvolumenstroms zu einer Steigerung der Leistungsfähigkeit ( $P$ ) von Schülern und Lehrern um über 5 %. Abbildung 111 zeigt die Bewertung der natürlichen und mechanischen Belüftung von Klassenräumen sowie die Auswirkungen auf den Anteil unzufriedener Personen nach Olesen (vgl. [71] S. 6 f.) sowie die normierte Leistungsfähigkeit nach Wargocki (vgl. [13] S. 4 ff.).

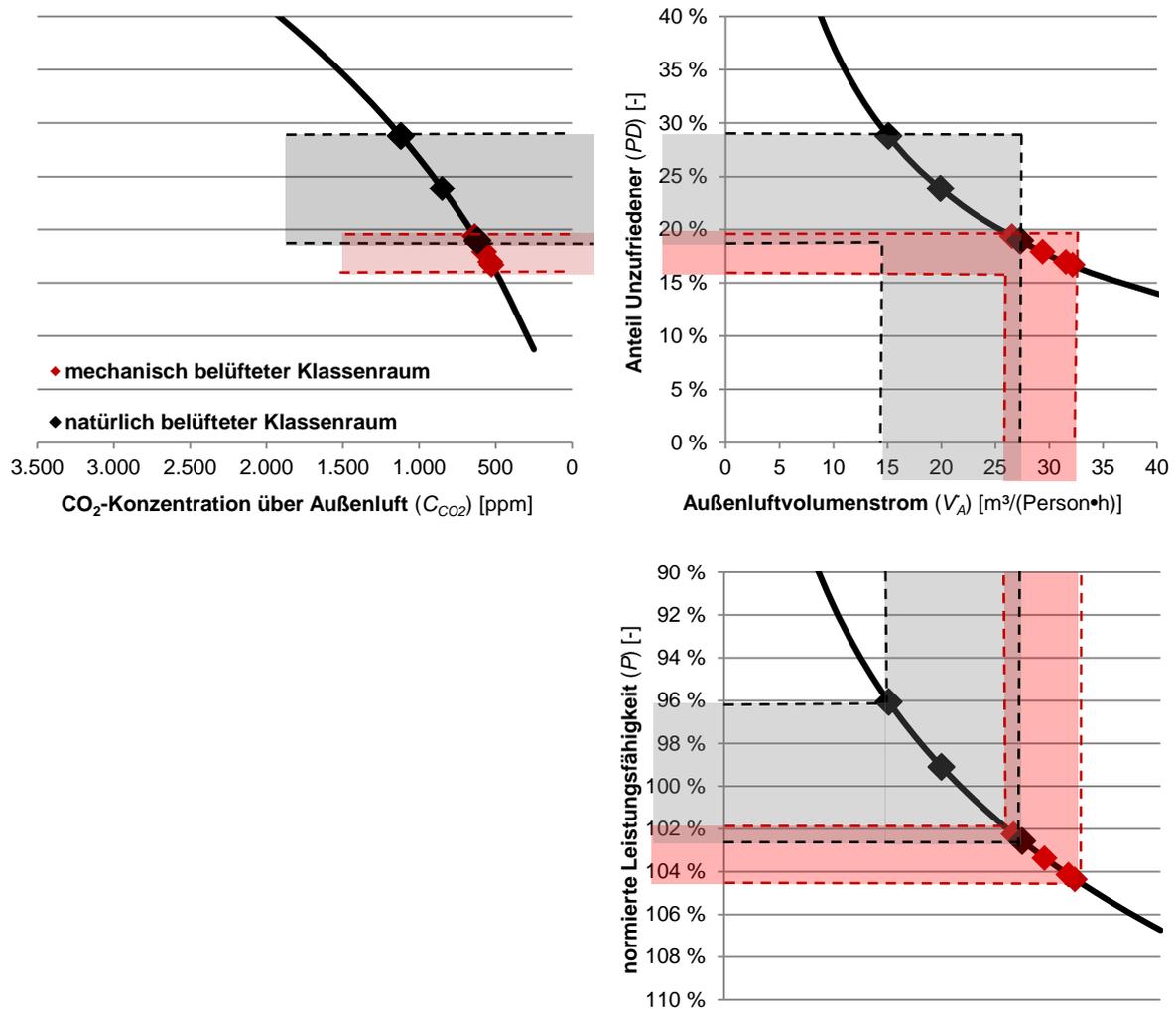


Abbildung 111 Anteil unzufriedener Personen und normierte Leistungsfähigkeit nach Wargocki [13] und Olesen [71]

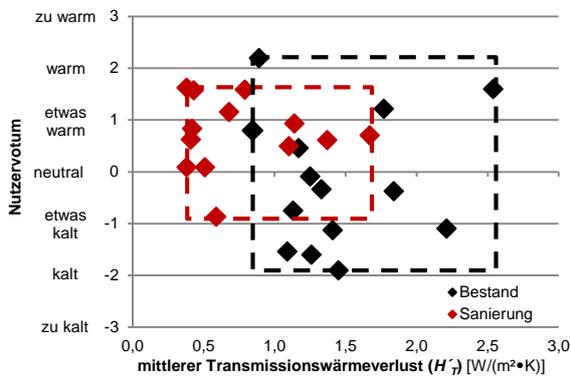
## 5.6 Nutzerakzeptanz der sanierten Gebäude

### 5.6.1 Verbesserung des Innenraumkomforts

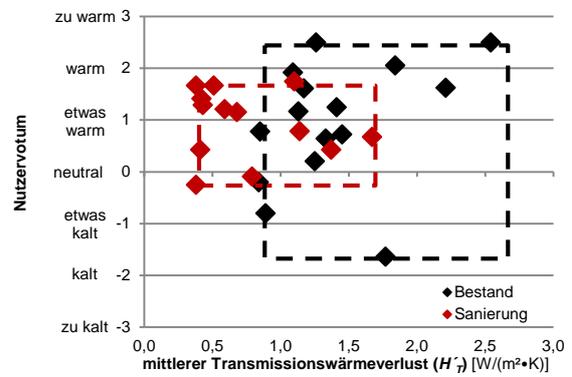
Eine Verbesserung des thermischen Innenraumkomforts im Zuge der Sanierungen ist ersichtlich. Das Nutzervotum zur Raumlufttemperatur ( $\theta$ ) im Winter fällt beim sanierten Zustand gegenüber dem unsanierten Zustand besser aus. Zwar bewerten die Nutzer den thermischen Komfort im Winter als durchschnittlich „etwas warm“, die Varianz des Votums zum sanierten Gebäudezustand fällt gegenüber dem unsanierten Zustand jedoch geringer aus (Abbildung 112).

Durchschnittlich bewerten die Gebäudenutzer die Raumlufttemperatur ( $\theta_{i,ar}$ ) im Sommer vor und nach der Sanierung in allen befragten Schulen mit „etwas warm“. Vor allem in den Gebäuden mit einem hohen baulichen Wärmeschutz ( $H'_T < 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ) empfinden die Nutzer die Raumtemperaturen ( $\theta$ ) während des gesamten Jahres als „warm“ (Abbildung 113). Die

Erkenntnisse zeigen den Bedarf zur Umsetzung einer Nachtlüftung oder die Installation von außenliegenden Sonnenschutzsystemen auf, um einer Überhitzung der Räume tagsüber entgegenzuwirken.



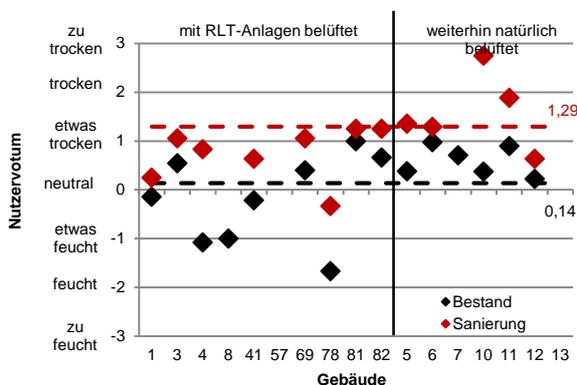
**Abbildung 112** Nutzervotum: Lufttemperatur ( $\theta_{i,ar}$ ) im Winter



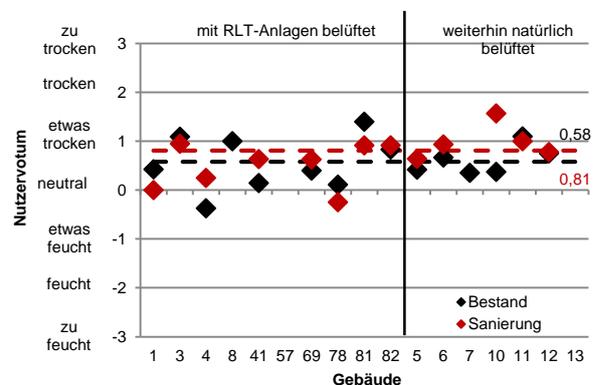
**Abbildung 113** Nutzervotum: Lufttemperatur ( $\theta_{i,ar}$ ) im Sommer

Anhand des schlechteren Empfindens der Raumlufffeuchte ( $\phi_{i,ar}$ ) lässt sich das tendenziell identische Ergebnis der Befragungen deuten. Der als „etwas warm“ empfundene thermische Komfort im Winter lässt sich auf den hygrischen Komfort übertragen. Das Ergebnis zeigt die Bewertung der Raumlufffeuchtigkeit ( $\phi_{i,ar}$ ) im unsanierten Zustand als „neutral“ und im sanierten Zustand als „etwas trocken“. Folglich deutet die zu warme Raumlufftemperatur ( $\theta_{i,ar}$ ) auf eine zu trockene Innenraumluff ( $\phi_{i,ar}$ ) hin und trifft in allen untersuchten Schulen zu.

Die Nutzer bewerten den hygrischen Komfort in den mechanisch belüfteten Gebäuden als „trocken“. Das Nutzervotum stimmt mit der messtechnischen Untersuchung überein (vgl. Kap. 5.5.2) (Abbildung 114). Die Umfragen ergeben keine Veränderung des subjektiven Empfindens zum hygrischen Komfort im Sommer nach den Sanierungsmaßnahmen. Die Nutzer empfinden die hygrische Behaglichkeit vor und nach der Sanierung als „neutral“ bis „etwas trocken“ (Abbildung 115).

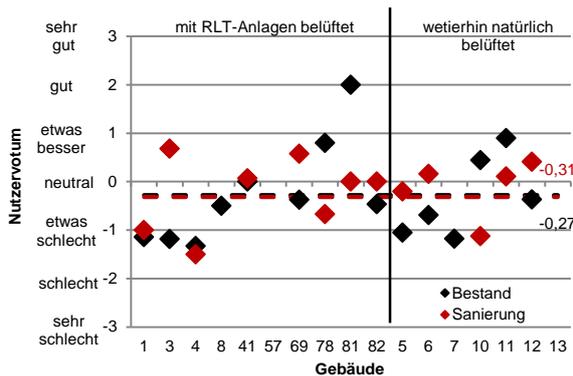


**Abbildung 114** Nutzervotum: Luftfeuchtigkeit ( $\phi$ ) im Winter



**Abbildung 115** Nutzervotum: Luftfeuchtigkeit ( $\phi$ ) im Sommer

Die hygienische Raumluftqualität lässt sich vom Menschen, der sich über einen längeren Zeitraum in einem Raum aufhält, ebenfalls schwer bewerten und begründet das identische Ergebnis beim unsanierten und sanierten Zustand. Die Nutzer stellen keine Verbesserung der Raumluftqualität fest und empfinden diese als „neutral“. Das Nutzervotum widerspricht den Ergebnissen aus der Messung zur CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft ( $C_{CO_2}$ ) (vgl. Kap. 5.5.3) und lässt keinen Unterschied zwischen der Luftqualität in mechanisch und natürlich belüfteten Räumen erkennen. Abbildung 116 zeigt das Ergebnis des Nutzervotums zur Verbesserung der Raumluftqualität ( $C_{CO_2}$ ) durch die Sanierungsmaßnahmen.

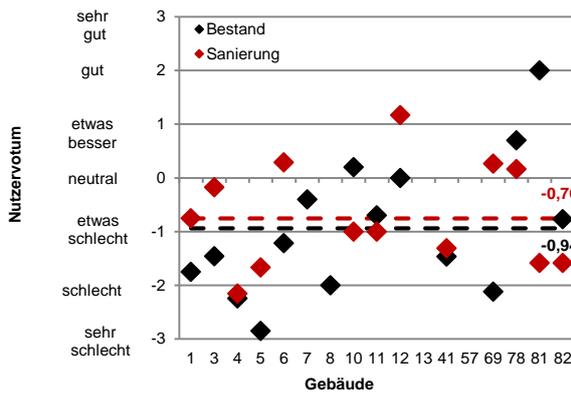


**Abbildung 116** Nutzervotum: Verbesserung der Raumluftqualität ( $C_{CO_2}$ )

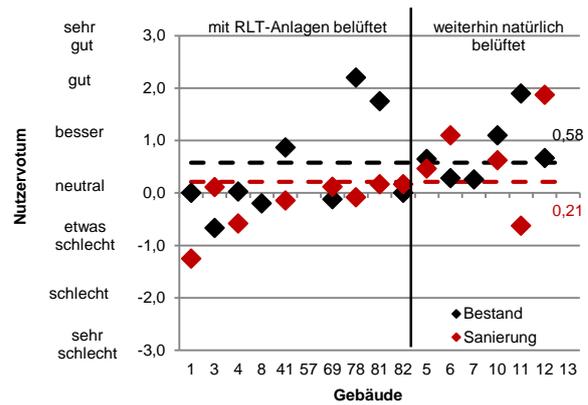
### 5.6.2 Verbesserung der Regulierbarkeit von Komfortparametern

Die Ergebnisse zeigen keine Verbesserung bei der Regulierbarkeit der Raumtemperatur auf. Durchschnittlich bewerten die Nutzer die Regulierbarkeit der Temperaturen in den unsanierten und sanierten Gebäuden mit „etwas schlecht“ (Abbildung 117).

Die Untersuchungen und Nutzerbefragungen überprüfen zudem die Regulierbarkeit der Frischluftversorgung. Die Nutzer bewerten den Eingriff in die Anlagentechnik vor der Sanierung als besser. Zwar verbessert sich diese in den Gebäuden, die weiterhin natürlich über Fenster belüftet werden, jedoch ist vor allem in den Gebäuden mit raumluftechnischen Anlagen eine Verschlechterung der Akzeptanz ersichtlich. Abbildung 118 zeigt das Nutzervotum zur Regulierbarkeit der Frischluftversorgung.



**Abbildung 117** Nutzervotum: Regulierbarkeit der Raumlufttemperatur ( $\theta_{i,ar}$ )



**Abbildung 118** Nutzervotum: Regulierbarkeit der Frischluftversorgung ( $\dot{V}_a$ )

## 5.7 Erkenntnisse aus den evaluierten Schulsanierungen

Die Bauwerkskosten der Sanierungen belaufen sich auf rund 63 Mio. Euro. Diese Summe entspricht flächenspezifischen Kosten von  $760 \text{ €/m}^2_{\text{kond.NGF}}$ . 38 % ( $290 \text{ €/m}^2_{\text{kond.NGF}}$ ) der Kosten stellen sich als energetisch relevant heraus. Die Bauwerksinstandsetzung, die u.a. den Brandschutz und die Barrierefreiheit beinhaltet, beläuft sich auf  $380 \text{ €/m}^2_{\text{kond.NGF}}$  und entspricht der Hälfte aller Kosten. Die Baunebenkosten der Kostengruppe 700 nach DIN 276 (vgl. [63] S.10 ff.) betragen im Mittel  $90 \text{ €/m}^2_{\text{kond.NGF}}$  (12 %).

### Energie

Rund 70 % der energetisch relevanten Kosten dienen der Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes. Ziel dieser Maßnahmen ist die Reduzierung des Heizwärmeverbrauchs durch die Verringerung der Transmissions- und Lüftungswärmeverluste aufgrund von Infiltration. Die evaluierten Konzepte, die sich auf diese Maßnahmen beschränken, erzielen eine Verringerung des Endenergieverbrauchs ( $Q_{h,t}$ ) von bis zu  $100 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Das entspricht einer Verbrauchreduzierung von maximal 60 % gegenüber dem unsanierten Zustand.

Eine Maßnahme zur weiteren Reduzierung des Heizwärmebedarfs wird in acht der 17 Bildungsstätten durch die Installation raumlufttechnischer Anlagen mit wärmerückgewinnenden Systemen ( $\eta_{\text{WRG}} = 0,75 [-]$ ) umgesetzt. Der Betrieb der Anlagen erzielt dabei eine Verringerung der Lüftungswärmeverluste von durchschnittlich  $40 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ , die einem Strombedarf von rund  $10 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$  gegenüberstehen. Diese zusätzliche Einbindung der Anlagen in Kombination mit den Maßnahmen zur Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes führt zu einer Reduzierung des Endenergieverbrauchs ( $Q_{h,t}$ ) auf minimal 20 %. Gegenüber den evaluierten Konzepten, die sich allein auf die Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes fokussieren, stellen sich diese Strategien innerhalb der Bilanzgrenze der Wärmeversorgung als energetisch effizienter dar.

Die Einbindung von wärmeerzeugenden Anlagen auf Basis erneuerbarer Energien kommt lediglich in vier der 17 Schulsanierungen zur Anwendung. Die Wärmebereitstellung geschieht in diesen Gebäuden über Holzpelletkessel. Der Austausch der Wärmeerzeugungsanlagen in Kombination mit einem verbesserten baulichen Wärmeschutz erzielt eine Reduzierung des Primärenergieverbrauchs um bis zu 80 %.

Durch den Austausch effizienterer Beleuchtungsanlagen verringert sich der Strombedarf um  $1 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Die Hälfte der evaluierten Sanierungen weist jedoch einen Mehrverbrauch um bis zu  $9 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$  auf, was einer Erhöhung um bis zu 50 % entspricht. Eine Kompensation des Mehrverbrauchs durch den Austausch von Beleuchtungsanlagen findet nicht statt. Der erhöhte Verbrauch resultiert aus der Installation und dem Betrieb raumlufttechnischer Anlagen. Die Ausstattung der Klassenräume mit nutzungsspezifischen Geräten, wie Smartboards und Beamern, führt zu einem zusätzlichen Stromverbrauch. Eine Integration von stromproduzierenden Anlagen, wie z.B. Photovoltaikanlagen mit Eigenstromnutzung, findet nicht statt.

Es wird vermutet, dass die Einbindung von Photovoltaikanlagen in die Versorgungskonzepte sowie die Umsetzung der Eigenstromnutzung zu einer weiteren Reduzierung des Netzbezugs sowie zu ökonomischen Vorteilen geführt hätte.

### **Ökonomie**

Bei lediglich zwei der untersuchten Schulen resultiert aus den durchgeführten Maßnahmen eine Verringerung der Jahresgesamtkosten nach VDI 2067 (vgl. [11] S. 7 ff.; VDI 6025 [61] S. 38 ff.). Die Kosten an den restlichen 15 Schulsanierungen erhöhen sich um bis zu  $25 \text{ €/}(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Der reduzierte Energieverbrauch kann die Kapitalkosten dieser Maßnahmen nicht decken. Die Werterhaltung des Gebäudes durch die Instandhaltung findet innerhalb dieser Betrachtung keine Berücksichtigung.

Die Veränderung des Stromverbrauchs bestimmt in diesem Zusammenhang den ökonomischen Erfolg einer Sanierungsmaßnahme. Der Erfolg definiert sich über die Veränderung der Jahresgesamtkosten. Die Konzepte, die eine Verringerung des Stromverbrauchs erzielen, weisen einen Vorteil und geringere Gesamtkosten nach der Umsetzung auf. Die Reduzierung des Wärmeverbrauchs durch die Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes sowie der Einsatz von raumlufttechnischen Anlagen mit wärmerückgewinnenden Systemen nimmt nur sekundär auf den ökonomischen Erfolg Einfluss.

Die Methode des Preis-Leistungs-Verhältnisses definiert eine sinnvolle Reihenfolge der umzusetzenden Einzelmaßnahmen an der Gebäudehülle und den technischen Anlagen aus ökonomischer Sicht. Tabelle 35 zeigt die Reihenfolge der Einzelmaßnahmen auf und stellt die energetischen Einsparpotenziale gegenüber.

**Tabelle 35** Sinnvolle Reihenfolge umzusetzender Einzelmaßnahmen

Maßnahme	Dämmung der Kellerdecken	Dämmung der Außenwände	Dämmung der Dächer	Installation einer RLT-Anlage	Fensteraus- tausch	Austausch der Beleuch- tungsanlage
Äquivalenter Energiepreis [ct/kWh] Ø	6 (Wärme)	16 (Wärme)	20 (Wärme)	36 (Wärme)	56 (Wärme)	200 (Strom)

### Innenraumkomfort

In den sanierten Schulen liegt eine Störung des thermischen Komforts im Winter vor. Die messtechnische Untersuchung deckt eine höhere Anzahl an Unterkühlungs- als Überhitzungsstunden in den Klassenräumen auf. Im Gegensatz wird eine Abhängigkeit zwischen baulichem Wärmeschutz und dem Nutzervotum zur Raumtemperatur im Sommer festgestellt. In den hochwärmegeprägten Gebäuden ( $H_T < 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ) wird der thermische Komfort durch den Nutzer als „warm“ empfunden, anders als in den geringer gedämmten Gebäuden.

Die  $\text{CO}_2$ -Konzentration in den natürlich belüfteten Klassenräumen liegt messtechnisch nachgewiesen bei über 3.000 ppm und damit deutlich über dem Grenzwert von 1.000 ppm nach Pettenkofer [72]. Der integrale Gedanke zur Lerneffizienz in Bezug auf den Innenraumkomfort zeigt sich durch die Installation raumluftechnischer Anlagen. Diese Anlagen verhindern eine Überschreitung der durchschnittlichen  $\text{CO}_2$ -Konzentration während einer Schulstunde von 1.000 ppm. Die Luftqualität der mechanisch belüfteten Klassenräume entspricht nach VDI 6040 (vgl. [12] S. 4) der Kategorie A. Die Verbesserung der Luftqualität durch den Einsatz raumluftechnischer Anlagen lässt auf eine Steigerung der Leistungsfähigkeit von Schülern und Lehrern nach Wargocki et al. (vgl. [13] 4 ff.) um über 5 % schließen. Diese Erkenntnisse decken sich mit den Ergebnissen nach König (vgl. [14] S. 154 ff.). Der Einsatz raumluftechnischer Anlagen erweist sich in Schulen demnach als unerlässlich.

Der Einsatz von raumluftechnischen Anlagen deckt zudem eine Verschlechterung des hygrischen Komforts im Winter auf. Die mechanische Belüftung der Klassenräume bewirkt eine messtechnisch nachgewiesene Austrocknung der Raumluft auf  $< 15 \%$  Raumluftfeuchtigkeit. Eine aktive Befeuchtung der Zuluft bzw. eine Feuchterückgewinnung der Abluft empfiehlt sich zur Steigerung des hygrischen Komforts in der kalten Jahreszeit.

## 6 ENTWICKLUNG DER KOSTENOPTIMIERTEN SANIERUNGSMAßNAHMEN

Es erfolgt eine Ableitung kostenoptimierter Maßnahmen. Die Untersuchung wendet die vorhergegangenen Methoden zur Evaluation der umgesetzten Sanierungsmaßnahmen an und nutzt die erarbeiteten Ergebnisse. Das ausgewogene Verhältnis aus Investitionskosten und Energieeinsparung stellt sich in diesen Zusammenhang als kostenoptimal dar.

### 6.1 Technische Gebäudeausrüstung

Die Versorgung der Gebäude mit Strom und Wärme sowie das Zusammenwirken der anlagentechnischen Systeme gewährleisten neben dem optimierten baulichen Wärmeschutz einen energieeffizienten Gebäudebetrieb. Die Integration von wärme- und stromproduzierenden Anlagen auf Basis regenerativer Energien minimiert den Verbrauch vorgelagerter Energien (Primärenergien) und die Emission von Kohlendioxid durch den Gebäudebetrieb. Ziel ist die Senkung der Jahresgesamtkosten. Die Untersuchung leitet zudem einen optimierten Betrieb raumluftechnischer Anlagen zur Sicherstellung eines guten Innenraumkomforts ab.

#### 6.1.1 Raumluftechnische Anlagen

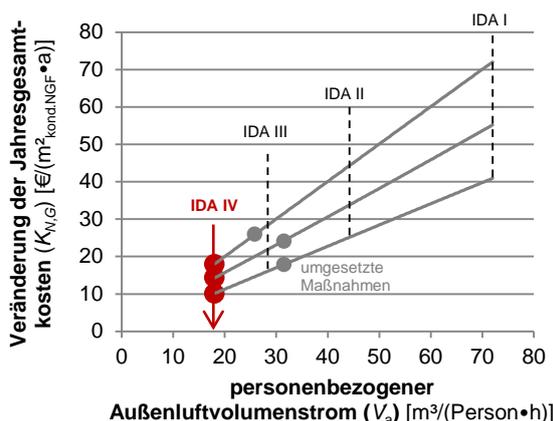
##### 6.1.1.1 Methode

Die energetische und ökonomische Bewertung des Betriebs raumluftechnischer Anlagen berücksichtigt die Anforderungen an die Raumlufqualität (IDA-Kategorie I–IV) nach DIN EN 13779 (vgl. [73] S. 59). Neben der Einhaltung des personenbezogenen Außenluftvolumenstroms ( $\dot{V}_A$ ) findet eine Untersuchung zum Betrieb der Anlagen anhand der  $\text{CO}_2$ -Konzentration ( $C_{\text{CO}_2}$ ) in der Innenraumluf statt. Die ökonomische Bewertung stellt die Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) den reduzierten Lüftungswärmeverlusten ( $Q_V$ ) und dem Betriebsstrombedarf ( $Q_{\text{Strom},f}$ ) der Anlagen zur Luftförderung gegenüber. Die Bewertung der Anlagendimensionierung erfolgt anhand der Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ).

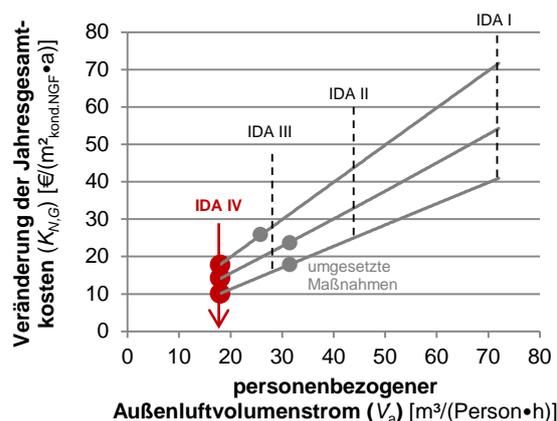
##### 6.1.1.2 Ergebnisse

Die mechanische Belüftung der Klassenräume erzielt eine Erhöhung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ). Die geringste Erhöhung dieser Kosten resultiert aus der Dimensionierung der Anlagen, die die Luftqualität der Kategorie IDA IV ( $\dot{V}_A = 18,8 \text{ m}^3/(\text{Person}\cdot\text{h})$ ) nach DIN EN 13779 (vgl. [73] S. 59) einhält.

Unterschiedliche Energiepreissteigerungen ( $r$ ) von 3,5 %/a und 5,5 %/a weisen aufgrund der hohen Bauwerkskosten ein identisches Ergebnis auf und leiten somit den kostenreduzierten Betrieb der Anlagen ab (Abbildung 119 und Abbildung 120).



**Abbildung 119** Ermittlung des kostenreduzierten Betriebs raumluftechnischer Anlagen ( $r = 3,5\%/a$ )



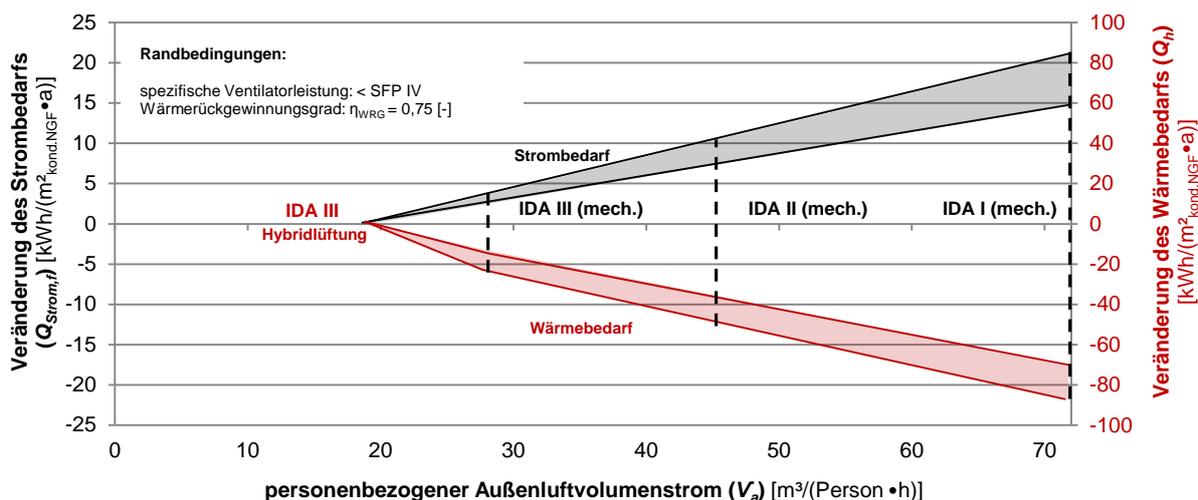
**Abbildung 120** Ermittlung des kostenreduzierten Betriebs raumluftechnischer Anlagen ( $r = 5,5\%/a$ )

Die kostenreduzierte Auslegung der Anlagen verzeichnet gegenüber dem Betrieb der installierten Anlagen eine Verringerung der Bauwerkskosten um bis zu 42 % innerhalb des Gewerks.

Eine zusätzliche natürliche Belüftung der Räume von  $11,2 \text{ m}^3/(\text{Person} \cdot \text{h})$  ist beim kostenreduzierten Betrieb erforderlich, um den nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 10) geforderten Mindestaußenluftvolumenstrom  $(\dot{V}_A)$  von  $30 \text{ m}^3/(\text{Person} \cdot \text{h})$  einzuhalten. Aus der zusätzlichen Fensterlüftung ist eine Erhöhung der Lüftungswärmeverluste zu erwarten. Die vorhergegangene Betrachtung der Jahresgesamtkosten berücksichtigt diesen erhöhten Wärmebedarf.

Die Hybridlüftung, die die Kombination aus der mechanischen Grundlüftung und der natürlichen Stoßlüftung bezeichnet, stellt sich als Empfehlung zum kostenreduzierten Betrieb raumluftechnischer Anlagen mit wärmerückgewinnenden Systemen heraus. In den evaluierten Schulen fand diese Art der Belüftung keine Anwendung.

Die reduzierten Bauwerkskosten kompensieren die erhöhten Lüftungswärmeverluste  $(Q_V)$  von 14 bis  $22 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Zudem erzielt die Hybridlüftung eine Reduzierung des Strombedarfs um 3,6 bis  $5,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Die Varianz der Lüftungswärmeverluste  $(Q_V)$  begründet sich durch die gemessenen außenklimatischen Bedingungen  $(\theta_a)$  sowie die unterschiedlichen Innenraumtemperaturen  $(\theta_i)$  in den untersuchten Klassenräumen. Die Abweichungen des Strombedarfs resultieren aus den unterschiedlichen Nennleistungen  $(P_{SFP})$  der in den Anlagen eingesetzten Ventilatoren (vgl. Kap. 5.1.2.1). Zur Sicherstellung des geforderten Mindestaußenluftvolumenstroms  $(\dot{V}_{A,\text{min}})$  erweist sich dieses Lüftungskonzept gegenüber der rein mechanischen Belüftung als ökonomisch vorteilhaft (Abbildung 121).



**Abbildung 121** Veränderung des Wärme- ( $Q_h$ ) und Strombedarfs ( $Q_{Strom,t}$ ) in Abhängigkeit von der Auslegung des maximal zu fördernden Luftvolumenstroms ( $\dot{V}_A$ ) raumluftechnischer Anlagen (kostenreduzierter Sanierungsstandard = 0)

### 6.1.1.3 Einfluss der Luftqualität auf die Leistungsfähigkeit von Schülern

Die vorhergegangene Analyse der Sanierungsmaßnahmen deckt in den natürlich belüfteten Klassenräumen einen personenbezogenen Außenluftvolumenstrom ( $\dot{V}_A$ ) von maximal 15 m<sup>3</sup>/(Person•h) auf. Die normierte Leistungsfähigkeit ( $P$ ) der Personen in Innenräumen beläuft sich nach Wargocki (vgl. [13] S. 4 ff.) dementsprechend auf 96 %.

Die Installation raumluftechnischer Anlagen stellt einen personenbezogenen Außenluftvolumenstrom von 30 m<sup>3</sup>/(Person•h) während der gesamten Unterrichtszeit in den untersuchten Schulen sicher. Die Luftqualität entspricht mit einer CO<sub>2</sub>-Konzentration ( $C_{CO_2}$ ) unter 1.200 ppm nach DIN EN 13779 (vgl. [73] S. 59) der IDA-III-Kategorie. Die Leistungsfähigkeit ( $P$ ) der Nutzer beträgt 103 %.

Der kostenreduzierte Betrieb (Hybridlüftung) führt im Vergleich zur natürlichen Fensterlüftung ebenfalls zu einer Erhöhung der Leistungsfähigkeit um > 5 % (Abbildung 122). Das Lüftungskonzept weist jedoch bei gleichbleibender Luftqualität eine Reduzierung der Bauwerkskosten von 42 % gegenüber der vollständigen mechanischen Belüftung auf.

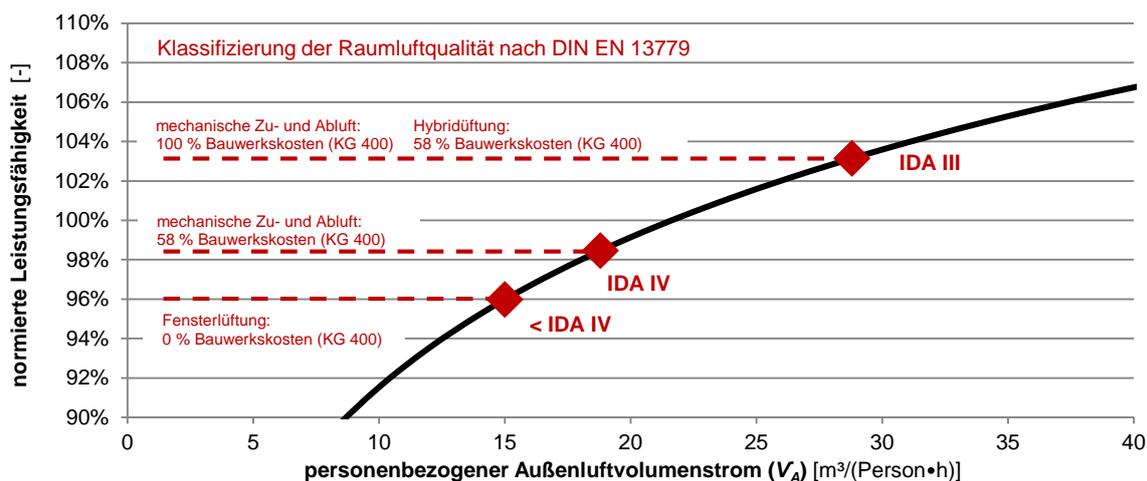


Abbildung 122 Verbesserung der Leistungsfähigkeit ( $P$ ) nach Wargocki et al [13]

Zur Umsetzung der Hybridlüftung sind neben der mechanischen Grundluftzufuhr zudem ausreichende Öffnungsflächen in der Fassade zur natürlichen Belüftung der Räume vorzusehen. Gugerli et al. (vgl. [96] S. 8 f.) stellt Anforderungen an die Größe von Öffnungsflächen in Fassaden bei der Umsetzung einer Hybridlüftung (mechanische Grundlüftung  $< 25 \text{ m}^3/(\text{Person}\cdot\text{h})$ ). Die Studie zeigt zudem die Abhängigkeit der Öffnungsfläche zur Außenlufttemperatur ( $\theta_{e,ar}$ ) auf, um die Anforderungen zu gewährleisten. Für die Umsetzung zukünftiger Schulsanierungen ist die Dimensionierung dieser Flächen bei Umsetzung einer Hybridlüftung zu berücksichtigen.

Eine gezielte Anleitung der Nutzer zum Lüftungsverhalten (Stoßlüftung) nach König (vgl. [14] S. 154 ff) ist zudem notwendig, um den Mindestaußenluftvolumenstrom sicherzustellen.

## 6.1.2 Beleuchtungsanlagen

### 6.1.2.1 Methode

Die Untersuchung von acht unterschiedlichen Beleuchtungskonzepten leitet kostenoptimierte Sanierungsmaßnahmen zur Beleuchtung von Schulen ab. Die Untersuchung differenziert den Wartungswert ( $\bar{E}_m$ ) nutzungsspezifisch nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 4) für Hauptnutzflächen (HNF) mit 300 lx und für Nebenflächen (NF) mit 100 lx. Tabelle 36 zeigt die untersuchten Beleuchtungskonzepte.

Tabelle 36 Untersuchte Beleuchtungskonzepte

Bestand	stabförmige Leuchtstofflampen				LED-Leuchten			
	BEL I	BEL II	BEL III	BEL IV	BEL V	BEL VI	BEL VII	BEL VIII
KVG	HNF: EVG NF: EVG	HNF: EVG/TL NF: EVG	HNF: EVG/PM NF: EVG	HNF: EVG/PM/TL NF: EVG/PM	HNF: LED NF: LED	HNF: LED/TL NF: LED	HNF: LED/PM NF: LED	HNF: LED/PM/TL NF: LED PM

EVG: elektronisches Vorschaltgerät (Leuchtstoffröhren); TL: Tageslichtsensor; PM: Präsenzmelder; HNF: Hauptnutzfläche; NF: Nebenfläche

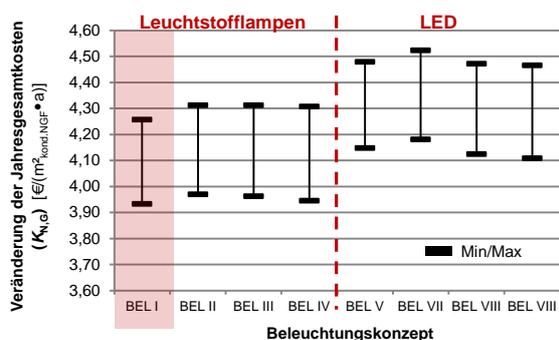
Die in den Referenzräumen installierten Beleuchtungsleistungen sowie die nach LEE definierten Anteil an Betriebsstunden von Beleuchtungsanlagen fließen als Grundlage in die Bewertung ein (vgl. [95] S. 65). Die in Kapitel 5.2.3.3 ermittelten Einsparpotenziale der betrachteten Beleuchtungsarten<sup>22</sup> sowie die Regelung der Anlagen mit z.B. tageslichtabhängigen Sensoren dienen zusätzlich der Berechnung des Strombedarfs ( $Q_{Strom,t}$ ).

Die unterschiedliche Nutzungsdauer ( $T_N$ ) der Leuchtmittel (Annahme: LED: 50 a; Leuchtstofflampen: 20 a) sowie der gegenüber den LED erhöhte Wartungsaufwand der Leuchtstofflampen finden in der Betrachtung Berücksichtigung.

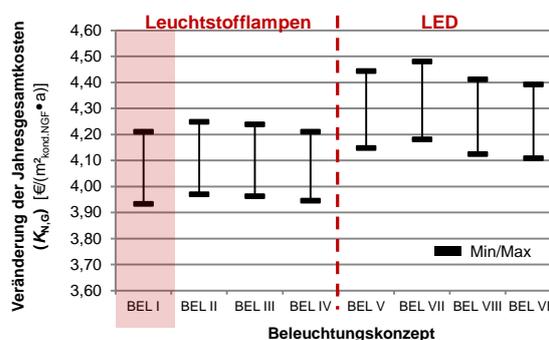
### 6.1.2.2 Ergebnis

Alle Beleuchtungskonzepte weisen eine Erhöhung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) auf. Aus dem Einsatz von LED resultiert im Vergleich zu den stabförmigen Leuchtstofflampen mit EVG eine höhere Reduzierung des Strombedarfs. Jedoch bewirkt der Einbau von stabförmigen Leuchtstofflampen mit EVG (BEL I) die geringsten Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) und erweist sich somit als Kostenoptimum für Beleuchtungsanlagen in Schulen.

Der Ansatz unterschiedlicher Energiepreissteigerungen ( $r$ ) erzielt beim Austausch von Beleuchtungsanlagen ein identisches Ergebnis. Aufgrund geringer täglicher Betriebszeiten sind über einen Austausch der Beleuchtungssysteme nur geringe Energieeinsparungen gegenüber anderen Sanierungsmaßnahmen zu erzielen. Abbildung 123 und Abbildung 124 zeigen die Veränderungen der Jahresgesamtkosten durch die Umsetzung der unterschiedlichen Beleuchtungsszenarien.



**Abbildung 123** Gegenüberstellung der Beleuchtungskonzepte ( $r = 3,5 \%/a$ )



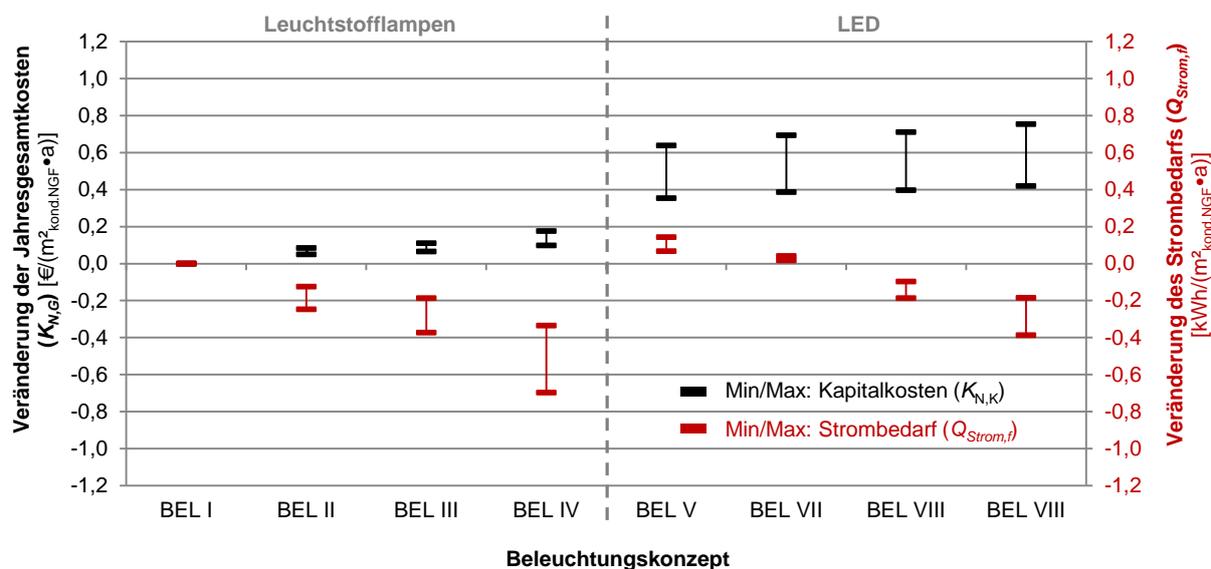
**Abbildung 124** Gegenüberstellung der Beleuchtungskonzepte ( $r = 5,5 \%/a$ )

Aus dem Einbau von Leuchtstofflampen mit EVG resultieren die geringsten Erhöhungen der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ). Trotz einer kürzeren Nutzungsdauer ( $T_N$ ) sowie einem erhöhten

<sup>22</sup> Unter den Beleuchtungsarten ist die Einbausituation (direkte, indirekt-direkte oder indirekte Beleuchtung) gemeint. Zur Berechnung der energetischen Einsparungen werden stabförmige Leuchtstofflampen bzw. LED als Leuchtmittel verwendet.

Wartungsaufwand resultieren durch den Einsatz von Leuchtstofflampen gegenüber dem Einbau von LED geringere Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ).

Die Integration von Präsenzmeldern und tageslichtabhängigen Sensoren bewirkt eine weitere Reduzierung des Strombedarfs ( $Q_{Strom,t}$ ), der jedoch die höheren Bauwerkskosten nicht deckt. Abbildung 125 vergleicht die Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) und die Veränderung des Strombedarfs ( $Q_{Strom,t}$ ) nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 4) durch die Maßnahmen.



**Abbildung 125** Veränderung des Strombedarfs ( $Q_{Strom,t}$ ) sowie der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) in Abhängigkeit der unterschiedlichen Beleuchtungskonzepte (kostenreduziertes Beleuchtungskonzept (BEL I = 0))

## 6.1.3 Photovoltaikanlagen

### 6.1.3.1 Methode

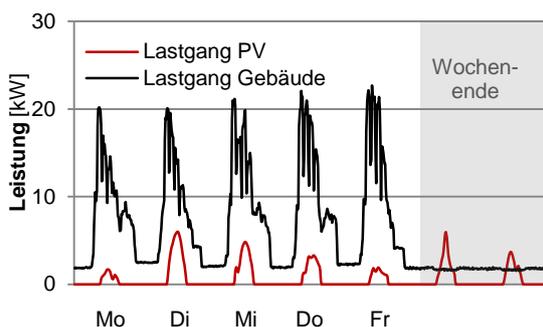
Eine Anrechnung des regenerativ erzeugten und anrechenbaren Stroms auf den End- ( $Q_t$ ) und Primärenergiebedarf ( $Q_p$ ) ist nach Energieeinsparungsverordnung 2014 (vgl. [8] § 5) konform, wenn dieser „in unmittelbarem räumlichen Zusammenhang zu dem Gebäude erzeugt und vorrangig in dem Gebäude unmittelbar nach Erzeugung oder nach vorübergehender Speicherung selbst genutzt und nur die überschüssige Energiemenge in ein öffentliches Netz eingespeist wird“.

Die Untersuchung zum Betrieb von Photovoltaikanlagen ermittelt das Potenzial der Direktstromnutzung (DSN) und der Eigenstromdeckung (ESD) in den Referenzgebäuden sowie die Substitution des Stromnetzbezugs. Die Direktstromnutzung (DSN) beschreibt das Verhältnis des nutzbaren und anrechenbaren PV-Stroms zum Gesamtertrag der Photovoltaikanlage innerhalb eines Jahres. Der direkt genutzte Strom steht im Verhältnis zum gesamten Jahresstromverbrauch ( $Q_{Strom,t}$ ) des Gebäudes und bildet die Eigenstromdeckung (ESD). Die Verwendung von erfassten Stromlastgängen der Schulen in einer viertelstündlichen Auflösung

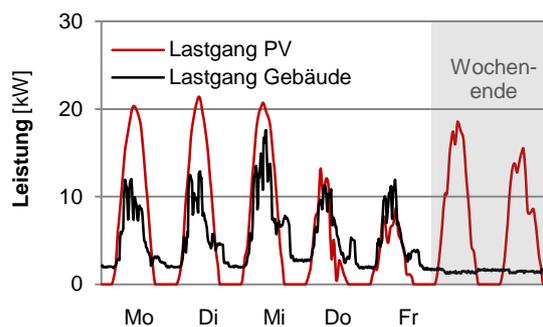
dient zur Ermittlung der DSN und ESD anhand der Gegenüberstellung mit den generierten Stromlastgängen von PV-Anlagen.

Diese Methode ermöglicht eine detaillierte Betrachtung und exaktere Ergebnisse bei der ökonomischen und ökologischen Bewertung. Jahreszeitliche Unterschiede finden innerhalb der Bewertung Berücksichtigung. Die geringen solarelektrischen Erträge im Winter stehen der erhöhten Stromlast des Gebäudebetriebs, aufgrund des vermehrten Betriebs von z.B. Beleuchtungsanlagen, gegenüber. Abbildung 126 zeigt beispielhaft die Stromlastgänge eines Schulgebäudes und der Photovoltaikanlage im Zeitraum einer Woche im Januar. Ein hoher Anteil des Strombezugs aus dem öffentlichen Netz sowie eine geringe ESD liegen in dieser Jahreszeit vor.

Im Sommer verzeichnet der Betrieb von PV-Anlagen hohe solare Erträge im Vergleich zur geringeren Stromlast durch den Gebäudebetrieb. Ein hohes Potenzial der DSN und die Einspeisung des überschüssigen PV-Stroms in das öffentliche Netz sind zu erwarten. Abbildung 127 zeigt beispielhaft den Stromlastgang des Schulgebäudes und der Photovoltaikanlage im Zeitraum einer Woche im Juli.



**Abbildung 126** Stromlastgänge des Schulgebäudes und der Photovoltaikanlage im Zeitraum einer Woche im Januar



**Abbildung 127** Stromlastgänge des Schulgebäudes und der Photovoltaikanlage im Zeitraum einer Woche im Juli

### 6.1.3.2 Ergebnis

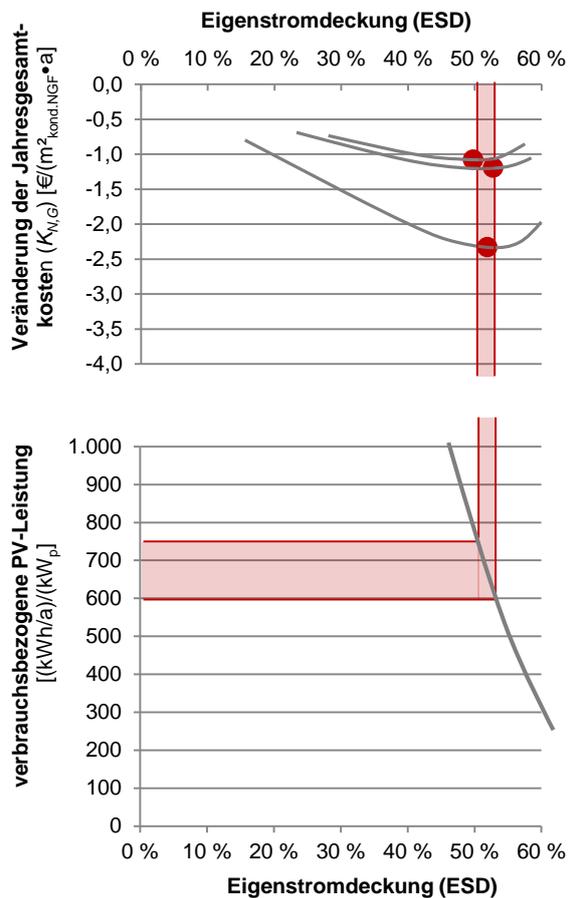
Zur Reduzierung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) wird für Schulgebäude die Installation und der Betrieb von solarelektrischen Anlagen sowie die Eigennutzung des regenerativ erzeugten Stroms als sinnvoll erachtet. Der Stromgestehungspreis beträgt 8 bis 15 ct/kWh und stellt sich gegenüber dem angesetzten Strombezugspreis von 19,7 ct/kWh als vorteilhaft dar.

Mit erhöhter ESD sind kürzere Amortisationszeiten bei der Installation von PV-Anlagen festzustellen. Während bei einer ESD < 30 % die Amortisationszeit länger als die Nutzungszeit ( $T_N$ ) der PV-Anlagen ist, sind bei einer ESD > 40 % Amortisationszeiten innerhalb des Nutzungszeitraums ( $T_N$ ) zu erwarten. Zudem resultiert aus einer Erhöhung der ESD die Verringerung

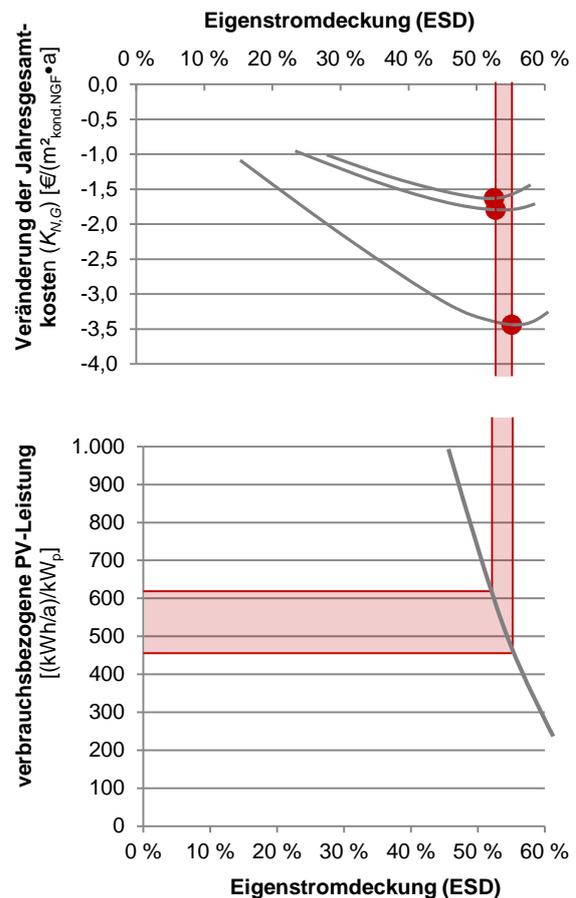
des äquivalenten Preises zur Reduzierung des Primärenergiebedarfs und Kohlendioxidemission durch den sanierten Gebäudebetrieb.

Die kostenoptimierte Integration von Photovoltaikanlagen in das energetische Gesamtversorgungskonzept von Schulgebäuden steht in Abhängigkeit von ESD zu den Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ). Die Installation einer verbrauchsunabhängigen PV-Leistung von durchschnittlich 1 kW<sub>p</sub> pro 650 kWh/a Stromverbrauch stellt sich bei einer Energiepreissteigerung ( $r$ ) von 3,5 %/a als kostenoptimal dar und erzielt eine prognostizierte ESD von 49 bis 53 %. Die Abweichungen der ESD ergeben sich u.a. durch unterschiedliche Stromlastgänge in den Gebäuden.

Eine Erhöhung der Energiepreissteigerung ( $r$ ) auf 5,5 %/a verringert die kostenoptimierte PV-Leistung auf durchschnittlich 1 kW<sub>p</sub> pro 520 kWh/a Stromverbrauch und prognostiziert eine ESD von 52 bis 55 % (Abbildung 128 und Abbildung 129). Die Schulen weisen jedoch nicht genügend Installationsflächen für die PV-Anlagen auf, um eine kostenoptimierte Auslegung zu realisieren.



**Abbildung 128** Ermittlung der kostenoptimierten Integration von Photovoltaikanlagen in Abhängigkeit der ESD zu den Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) ( $r = 3,5 \%/a$ )



**Abbildung 129** Ermittlung der kostenoptimierten Integration von Photovoltaikanlagen in Abhängigkeit der ESD zu den Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) ( $r = 5,5 \%/a$ )

## 6.1.4 Wärmeerzeugungsanlagen

### 6.1.4.1 Methode

Die Untersuchung der Wärmeversorgungskonzepte bewertet den Einsatz dieser Anlagen an den Referenzgebäuden ökonomisch und ökologisch. Da sich die Datengrundlage zu Investitionskosten und Energieeinsparungen beim Austausch von Wärmeerzeugungsanlagen aus den evaluierten Schulsanierungen als zu gering darstellt, werden die Systemkomponenten anhand der ermittelten Norm-Heizlast ( $\Phi_{HL,i}$ ) der Gebäude (Kap. 5.1.2.3) und aus aktuellen Preislisten ermittelt.

Da in den Sommermonaten keine Wärmeabnahme in den Schulen vorliegt, scheidet die Betrachtung von Blockkraftheizwerken (BHKW) als Wärmeerzeuger aus energetischer und ökonomischer Sicht aus. Eine solarthermische Unterstützung der Trinkwarmwasserbereitung wird aufgrund des geringen Warmwasserbedarfs ( $Q_{TWW,e}$ ) ausgeschlossen.

Die Untersuchung vergleicht den Einsatz von gasbefeuerten Brennwertkesseln mit dem Betrieb elektrischer Sole/Wasser- sowie Luft/Wasser-Wärmepumpen. Der Betriebsstrom ( $Q_{h,f}$ ) der Wärmepumpen wird aus dem öffentlichen Netz bezogen. Der Variantenvergleich basiert auf einheitlichen Energiepreisen. Die Primärenergiefaktoren ( $f_p$ ) (vgl. [23] Teil 1) sowie der CO<sub>2</sub>-Äquivalente (vgl. [55] Vers. 4.5) zeigen den ökologischen Einfluss des Anlagenbetriebs auf.

Die Analyse vergleicht die Verwendung fossiler Energieträger mit dem Einsatz regenerativer Ressourcen. Die Betrachtung erweitert den Variantenvergleich mit der Beschickung von Brennwertkesseln durch Biogas sowie die Befuerung von Feststoffkesseln mit Holzpellets. Eine bilanziell vollständige regenerative Wärmeversorgung stellt der Betrieb von Wärmepumpen in Kombination mit Photovoltaikanlagen dar. Die Auslegung der Photovoltaikanlagen erfolgt mit dem Ziel der bilanziellen Deckung des jährlichen Strombedarfs ( $Q_{h,f}$ ) der Wärmepumpe durch die zu erwartenden solarelektrischen Erträge.

Die ermittelte ESD der Varianten resultiert aus Stromlastgängen von Wärmepumpen in Schulen, des Gebäudebetriebs sowie den Lastgängen der Photovoltaikanlagen in viertelstündlicher Auflösung. Die Ergebnisse fließen in die ökonomische und ökologische Bewertung ein.

Tabelle 37 zeigt die Parameter zur Bewertung der unterschiedlichen Wärmeversorgungskonzepte.

**Tabelle 37** Parameter zur Bewertung der unterschiedlichen Wärmeerzeugungskonzepte

Konzept	1	2	3	4a	4b	5a	5b
System	Brennwertkessel	Brennwertkessel	Feststoffkessel Pelletlager	Wärmepumpe Pufferspeicher Erdsondenfeld	Wärmepumpe Photovoltaik Pufferspeicher Erdsondenfeld	Wärmepumpe Pufferspeicher Wärmetauscher	Wärmepumpe Photovoltaik Pufferspeicher Wärmetauscher
Wirkungsgrad/ Jahresarbeitszahl (JAZ)	0,85	0,85	0,75	4 (JAZ)	4 (JAZ)	3 (JAZ)	3 (JAZ)
Systemtemperatur (VL/RL) [°C]	70/55	70/55	70/55	50/40	50/40	50/40	50/40
Wärmeübergabe	Radiatoren (Bestand)	Radiatoren (Bestand)	Radiatoren (Bestand)	Radiatoren (Bestand)	Radiatoren (Bestand)	Radiatoren (Bestand)	Radiatoren (Bestand)
Energieträger/-quelle	Erdgas	Biogas	Holz	Erdreich	Erdreich/PV	Luft	Luft/PV
Energiepreis [€/kWh]	0,07	0,09	0,05	0,20	0,20	0,20	0,20

Die ökonomische Bewertung der Wärmeversorgungskonzepte berücksichtigt die Bauwerkskosten der Heizungsanlagen sowie die Kosten zur Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes an den jeweiligen Gebäuden und der daraus folgenden Reduzierung des Endenergiebedarfs (Heizen) ( $Q_{h,f}$ ).

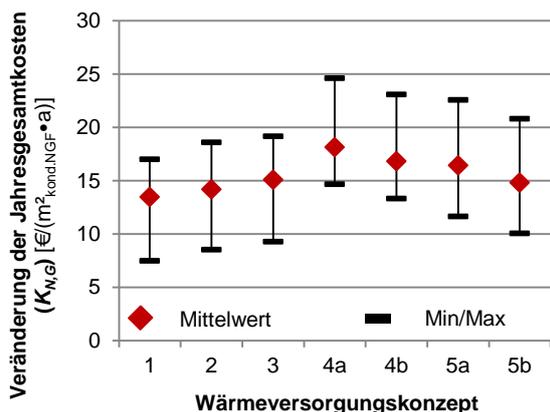
Die ökologische Bewertung betrachtet den reduzierten Primärenergiebedarf ( $Q_p$ ) sowie die CO<sub>2</sub>-Emission durch den sanierten Gebäudebetrieb.

Die Kombination aus ökonomischer und ökologischer Bewertung der Wärmeversorgungskonzepte erfolgt anhand des äquivalenten Preises zur Reduzierung von Primärenergien und CO<sub>2</sub>-Emissionen. Der äquivalente Preis stellt die Reduzierung des Primärenergiebedarfs ( $Q_p$ ) sowie der CO<sub>2</sub>-Emission den Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) gegenüber (vgl. Kap.2.8.2.2).

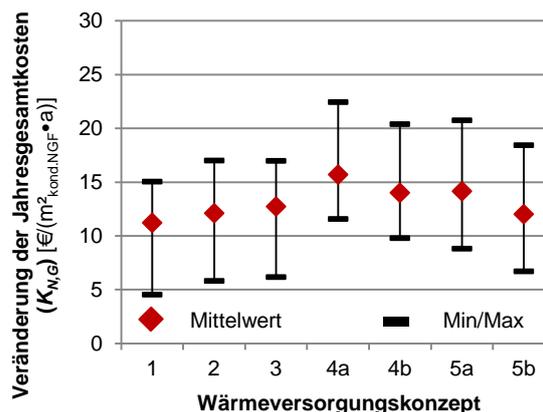
#### 6.1.4.2 Ergebnis

Aus allen analysierten Wärmeversorgungskonzepten sind Erhöhungen der Jahresgesamtkosten von 4 bis 23 €/m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a festzustellen. Der Betrieb von Sole/Wasser-Wärmepumpen ohne Kombination mit Photovoltaikanlagen (5a) weist die größte Erhöhung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) aller betrachteten Konzepte auf. Die Integration von Photovoltaikanlagen in die Konzepte der Wärmepumpen bewirkt trotz erhöhter Bauwerkskosten eine Verringerung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) im Vergleich zum Wärmepumpenbetrieb ohne PV-Integration. Der Einsatz von Brennwert- sowie Feststoffkesseln (1 und 3) erzielt die geringste Erhöhung der und ist somit am ökonomisch sinnvollsten zu bewerten.

Durch die Befuerung der Brennwertkessel mit Biogas (2) entstehen gegenüber erdgasbetriebener Brennwertkessel höhere Energiekosten und folglich eine Erhöhung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ). Die Berücksichtigung unterschiedlicher Energiepreissteigerungen ( $r$ ) erzielt ein identisches Ergebnis (Abbildung 130 und Abbildung 131).

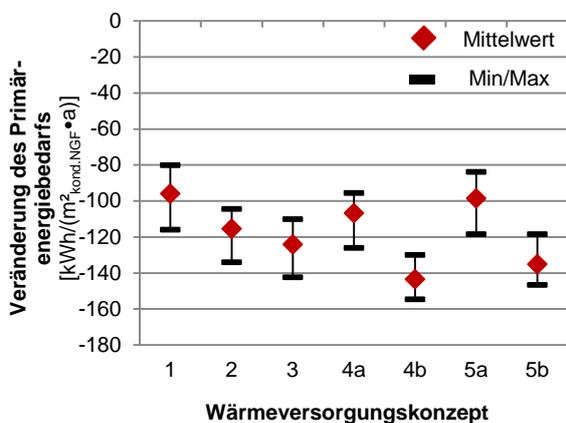


**Abbildung 130** Veränderung der Jahresgesamtkosten aufgrund der Umsetzung unterschiedlicher Wärmeerzeugungskonzepte inklusive der Investitionskosten (IK) zur Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes ( $r = 3,5 \%/a$ )

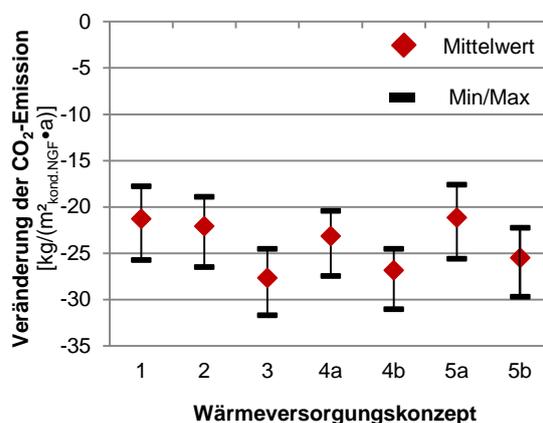


**Abbildung 131** Veränderung der Jahresgesamtkosten aufgrund der Umsetzung unterschiedlicher Wärmeerzeugungskonzepte inklusive der Investitionskosten (IK) zur Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes ( $r = 5,5 \%/a$ )

Der Betrieb von Holzpelletkesseln (3) und der elektrisch betriebenen Wärmepumpen in Kombination mit Photovoltaikanlagen (4b und 5b) erzielen die höchste Reduzierung des Primärenergiebedarfs ( $Q_p$ ) sowie der Emission von Kohlendioxid. Der Betrieb elektrisch betriebener Wärmepumpen ohne Einbindung von Photovoltaikanlagen (4a und 5a) weist, neben dem Betrieb von Brennwertkesseln, die geringsten Reduzierungen auf (Abbildung 132 und Abbildung 133).



**Abbildung 132** Veränderung des Primärenergiebedarfs aufgrund der Umsetzung unterschiedlicher Wärmeerzeugungskonzepte sowie der Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes



**Abbildung 133** Veränderung der CO<sub>2</sub>-Emission aufgrund der Umsetzung unterschiedlicher Wärmeerzeugungskonzepte sowie der Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes

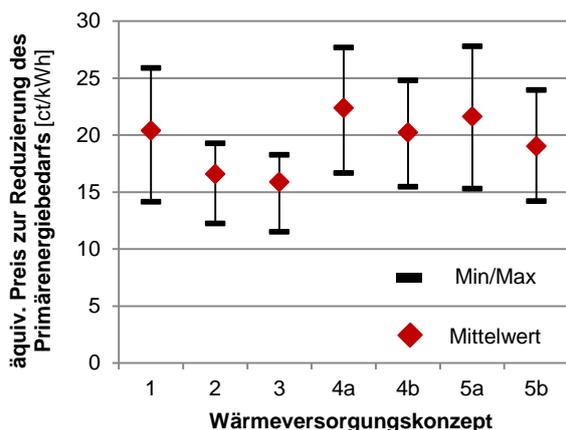
Aufgrund hoher Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) der Sole/Wasser- sowie Luft/Wasser-Wärmepumpen weisen diese gegenüber den anderen Konzepten die höchsten äquivalenten Preise zur Reduzie-

rung von Primärenergien und CO<sub>2</sub>-Emission auf. Während der Betrieb von Sole/Wasser-Wärmepumpen ohne PV-Integration einen äquivalenten Primärenergiepreis von durchschnittlich 22 ct/kWh<sub>PE</sub> aufweist, beträgt der Preis beim Betrieb von Holzpelletkesseln 16 ct/kWh<sub>PE</sub>.

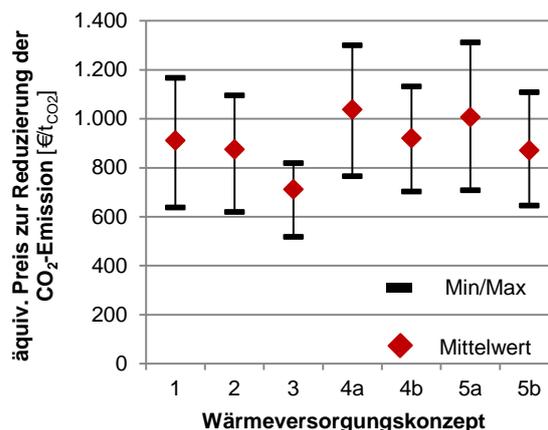
Proportional zu den äquivalenten Preisen zur Primärenergiereduzierung stellen sich die Kosten zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emission auf. Während die eingesparte Menge an Kohlendioxid durch den Betrieb von Sole/Wasser-Wärmepumpen ohne Integration von Photovoltaikanlagen einen äquivalenten Preis von rund 1.100 €/t<sub>CO2</sub> aufweist, ist eine Reduzierung der Kosten beim Einsatz von Gasbrennwertkesseln auf weniger als 800 €/t<sub>CO2</sub> zu erkennen.

Aus dem Einsatz von Holzpelletkesseln resultiert, aufgrund geringerer Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ), die höchste Reduzierung des Primärenergieverbrauchs ( $Q_p$ ) sowie der CO<sub>2</sub>-Emission. Aufgrund hoher Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) weist der Einsatz von Sole/Wasser-Wärmepumpen, die nicht in Kombination mit PV-Anlagen betrieben werden, gegenüber dem Betrieb von Holzpelletkesseln einen ökonomischen Nachteil auf. Die Integration von Photovoltaikanlagen in das Wärmeversorgungskonzept sowie die Eigenstromnutzung erzielen höhere primärenergetische Einsparungen sowie CO<sub>2</sub>-Emissionsreduzierungen.

Folglich stellt sich in Gebäuden, die einen hohen Jahresstromverbrauch ( $Q_{Strom,t}$ ) > 25 kWh/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a) aufweisen, der Einsatz von Luft/Wasser-Wärmepumpen in Kombination mit Photovoltaikanlagen effizienter dar. Diese Gebäude weisen ein höheres Potenzial der DSN auf. Eine Erhöhung der DSN bewirkt eine Reduzierung des Stromnetzbezugs, was zu ökonomischen Vorteilen führt. Das Konzept erweist sich gegenüber dem Betrieb von Feststoffkesseln in Gebäuden mit einem Jahresstromverbrauch ( $Q_{Strom,t}$ ) > 25 kWh/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a) als Alternative. Abbildung 134 und Abbildung 135 zeigen die äquivalenten Preise zur Reduzierung von Primärenergie und CO<sub>2</sub>-Emissionen.



**Abbildung 134** Bewertung der unterschiedlichen Wärmeversorgungskonzepte anhand der äquivalenten Preise zur Reduzierung von Primärenergie



**Abbildung 135** Bewertung der unterschiedlichen Wärmeversorgungskonzepte anhand der äquivalenten Preise zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emission

## 6.2 Gebäudehülle

### 6.2.1 Methode

Als energetische Qualität werden die Bauteilanforderungen des EnEV 2014-Referenzgebäudes (vgl. [8] Anl. 2), die bauteilbezogenen Höchstwerte beim Austausch nach EnEV 2014 (vgl. [8] Anl. 3) sowie die Empfehlungen des Passivhausstandards (vgl. [51] S. 5 ff.) herangezogen und den tatsächlich umgesetzten Sanierungsmaßnahmen gegenübergestellt.

Die äquivalente Dämmstärke definiert die nach jeweiligem Energiestandard einzuhaltenden Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile. Es wird eine einheitliche Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ) der Dämmstoffe von 0,035 W/(m•K) angenommen, um einen bauteil- bzw. gebäudespezifischen Vergleich zu erhalten. Die sanierte Bauteilfläche spezifiziert die Bauwerkskosten bei der Anwendung der Maßnahmen und zeigt eine Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) auf. Die Spezifikation ermöglicht zudem die Gegenüberstellung von Gebäuden unterschiedlicher Baualtersklasse und Kubatur. Die Betrachtung unterschiedlicher Dämmstandards und deren Abhängigkeit zu den Jahresgesamtkosten führen zur Ableitung des Kostenoptimums. Die Maßnahme, die die geringsten Jahresgesamtkosten in Abhängigkeit von unterschiedlichen Energiepreissteigerungen verursacht, stellt sich als kostenoptimierte Sanierungsmaßnahme dar (vgl. Kap. 2.8.2.3). Diese Maßnahme empfiehlt sich als Baustein für die Umsetzung des ganzheitlichen Sanierungskonzepts. Die angewendete Methode zeigt ein mögliches Potenzial zur Verringerung der Bauwerkskosten und des Wärmebedarfs ( $Q_{h,t}$ ) auf.

## 6.2.2 Ergebnisse

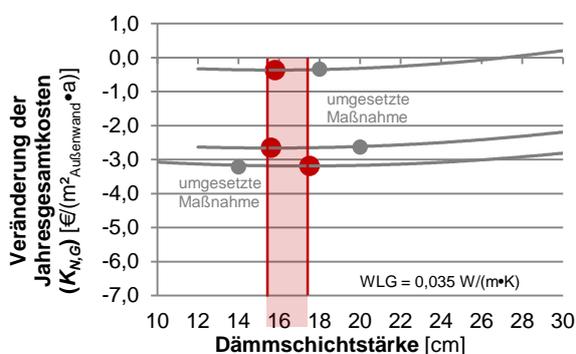
Da die energetische Bilanzierung nach EnEV [8] die Anlagentechnik berücksichtigt, beeinflusst die Wahl des Wärmeversorgungssystems die Qualität des kostenoptimierten Wärmeschutzes. Der Betrieb von Feststoffkesseln (Holz,  $\eta = 0,85$  [-]) und der Einsatz von Wärmepumpen in Kombination mit Photovoltaik ( $JAZ = 3$  [-]) stellt sich in vorhergehenden Schritten als kostenoptimales Wärmeversorgungskonzept dar. Die Betrachtung dieser Konzepte führt zur Ableitung der optimierten Maßnahmen an thermischen Gebäudehüllen.

### 6.2.2.1 Dämmung der Außenwände

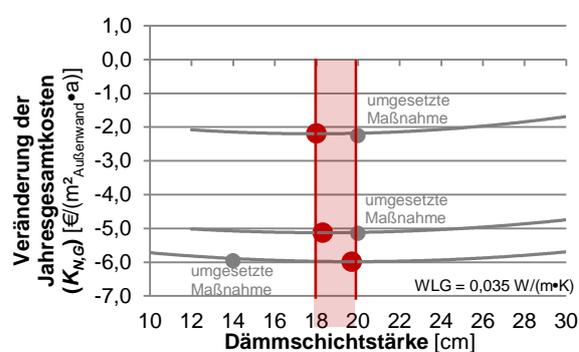
#### Beim Betrieb von Feststoffkesseln

Die energetische Sanierung der Wände erzielt durch die Dämmmaßnahmen eine Reduzierung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ). Während an zwei Gebäuden die Qualität der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme durch eine Verringerung der Dämmstärke erzielt wird, ist am dritten Gebäude eine Erhöhung erforderlich.

Bei einer jährlichen Energiepreissteigerung ( $r$ ) von 3,5 %/a beträgt die optimale Dämmstärke 16 bis 18 cm und erzielt eine Reduzierung der Jahresgesamtkosten von 0,4 bis 3,2 €/( $m^2_{\text{Außenwand}} \cdot a$ ). Eine Energiepreissteigerung ( $r$ ) von 5,5 %/a erwirkt einen Anstieg der Dämmstärke auf 18 bis 20 cm und eine Reduzierung der Jahresgesamtkosten von 2,2 bis 6,0 €/( $m^2_{\text{Außenwand}} \cdot a$ ). Abbildung 136 und Abbildung 137 zeigen die Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme für Außenwände beim Betrieb von Feststoffkesseln.



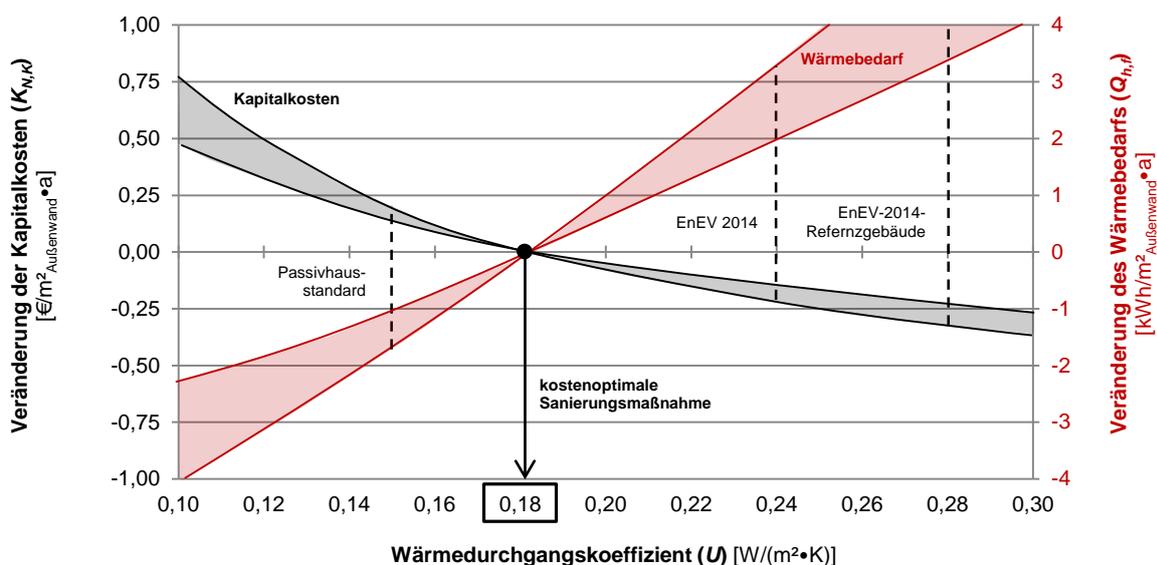
**Abbildung 136** Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme von Außenwänden gegen Außenluft ( $r = 3,5$  %/a)



**Abbildung 137** Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme von Außenwänden gegen Außenluft ( $r = 5,5$  %/a)

Die aufzubringende Dämmstärke beträgt durchschnittlich 18 cm. Der Wärmedurchgangskoeffizient ( $U$ ) weist einen Wert von 0,18 W/( $m^2 \cdot K$ ) auf. Das energetische Optimum liegt unterhalb der Anforderungen des Passivhauses (vgl. [51] S. 5 ff.) und über den Bauteilanforderungen der EnEV 2014 (vgl. [8] Anl. 3).

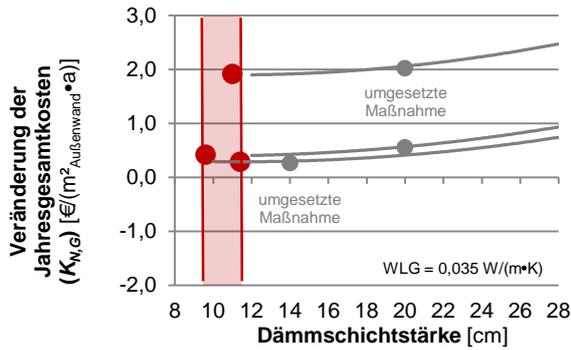
Im Vergleich zu den Anforderungen des Passivhauses (vgl. [51] S. 5 ff.) sind bei der Anwendung der Sanierungsmaßnahme geringere Kapitalkosten von 18 bis 20 ct/(m<sup>2</sup><sub>Außenwand</sub>•a) und ein erhöhter Wärmebedarf ( $Q_{h,t}$ ) von 1,0 bis 1,8 kWh/(m<sup>2</sup><sub>Außenwand</sub>•a) festzustellen. Entgegen den Anforderungen der EnEV 2014 (vgl. [8] Anl. 3) stellt sich durch die Anwendung der Maßnahme ein geringerer Wärmebedarf ( $Q_{h,t}$ ) und erhöhte Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) ein (Abbildung 138).



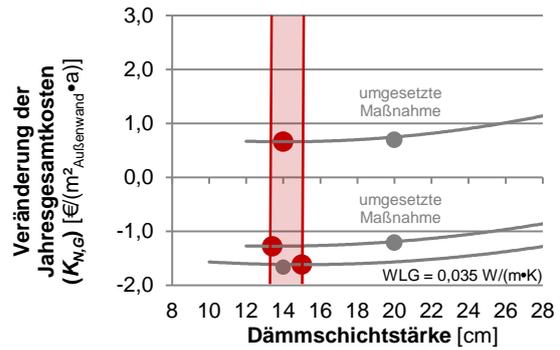
**Abbildung 138** Veränderung der Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) und des Wärmebedarfs ( $Q_{h,t}$ ) von Außenwänden gegen Außenluft (kostenoptimale Sanierungsmaßnahme = 0)

### Beim Betrieb von Wärmepumpen

Die Dämmung der Außenwände erzielt eine Erhöhung der Jahresgesamtkosten von 0,3 bis 2,0 €/m<sup>2</sup><sub>Außenwand</sub>•a). Die kostenoptimale Dämmstärke beträgt bei einer jährlichen Energiepreissteigerung ( $r$ ) von 3,5 %/a 10 bis 12 cm. An allen drei Gebäuden wird das Kostenoptimum durch die Verringerung der Dämmstärke erreicht. Eine Energiepreissteigerung ( $r$ ) von 5,5 %/a führt zu einem Anstieg der Dämmstärke auf 13 bis 15 cm und einer Reduzierung der Jahresgesamtkosten von maximal 1,6 €/m<sup>2</sup><sub>Außenwand</sub>•a). Abbildung 139 und Abbildung 140 zeigen die Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme für Außenwände beim Betrieb von Wärmepumpen.

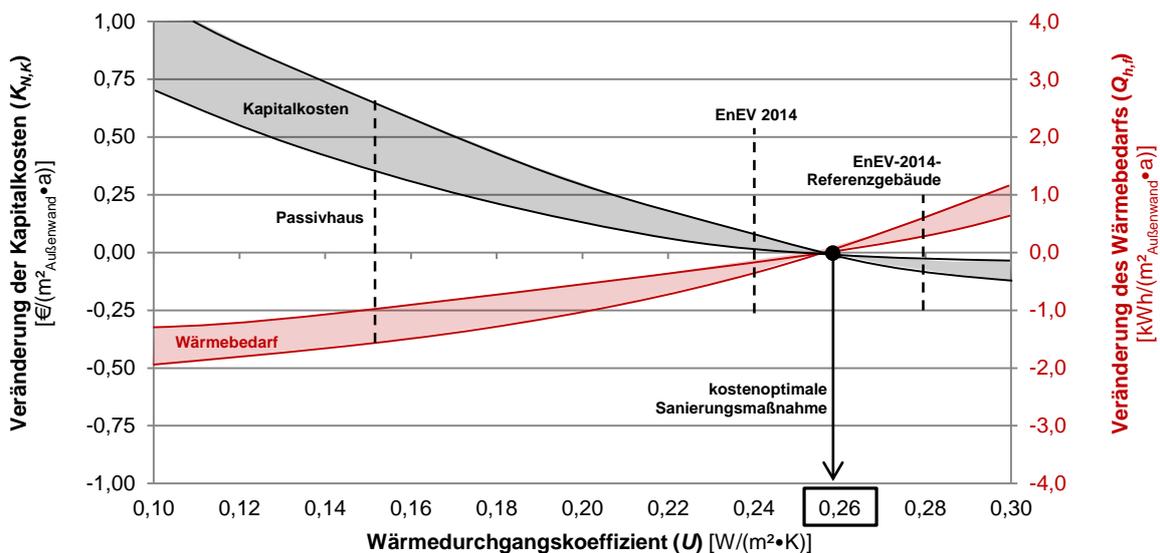


**Abbildung 139** Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme von Außenwänden gegen Außenluft ( $r = 3,5 \text{ %/a}$ )



**Abbildung 140** Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme von Außenwänden gegen Außenluft ( $r = 5,5 \text{ %/a}$ )

Die Dämmstärke der Sanierungsmaßnahme beträgt unter Berücksichtigung der angesetzten Energiepreissteigerungen durchschnittlich 12 cm und bildet einen Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) von  $0,26 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Die Qualität des Wärmeschutzes ist gegenüber den Anforderungen des Passivhauses (vgl. [51] S. 5 ff.) und der EnEV 2014 (vgl. [8] Anl. 3) reduziert. Entsprechend den Anforderungen des Passivhauses sind bei der Anwendung der Maßnahmen geringere Kapitalkosten von  $0,4$  bis  $0,6 \text{ €/}(\text{m}^2_{\text{Außenwand}} \cdot \text{a})$  und ein erhöhter Wärmebedarf ( $Q_{h,t}$ ) von  $1,0$  bis  $1,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Außenwand}} \cdot \text{a})$  festzustellen. Im Vergleich zu den Anforderungen der EnEV 2014 (vgl. [8] Anl. 3) stellen sich durch die Anwendung ein höherer Wärmebedarf ( $Q_{h,t}$ ) und geringere Kapitalkosten ein. Abbildung 141 zeigt die Veränderung der Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) und des Wärmebedarfs ( $Q_{h,t}$ ) in Abhängigkeit von der Qualität des baulichen Wärmeschutzes von Außenwänden gegen Außenluft.



**Abbildung 141** Veränderung der Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) und des Wärmebedarfs ( $Q_{h,t}$ ) von Außenwänden gegen Außenluft (kostenoptimale Sanierungsmaßnahme = 0)

## Dämmung von beheizten Kellerwänden gegen Erdreich

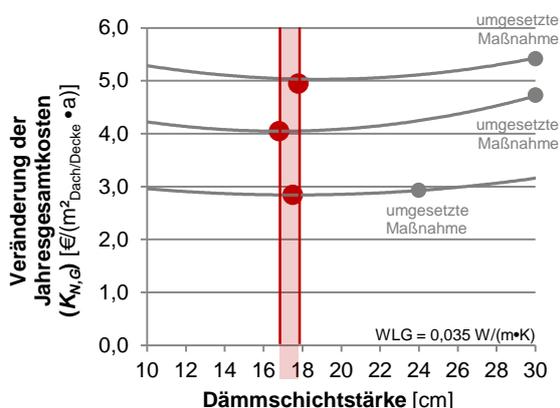
Die kostenoptimierten Sanierungsmaßnahmen von Außenwänden, die an Erdreich grenzen, stellen geringere Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz. Bei der Ermittlung der Transmissionswärmeverluste über die erdberührten Außenwände wird ein Temperaturfaktor  $f_x$  von 0,5 [-] angesetzt. Ein geringerer Wärmestrom ( $\dot{Q}$ ) über die Bauteile sowie ein folglich geringeres Potenzial zur Energieeinsparung sind zu erwarten. Die zur Anwendung der Sanierungsmaßnahme aufzubringende Dämmstärke beträgt 8 cm und weist einen Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) von 0,35 W/(m<sup>2</sup>•K) auf. Die Maßnahme hält die Anforderungen der EnEV 2014 (vgl. [8] Anl. 3) ein. Unterschiedliche Wärmeversorgungskonzepte haben keinen signifikanten Einfluss auf die Qualität des kostenoptimierten Wärmeschutzes von Außenwänden gegen Erdreich.

### 6.2.2.2 Dämmung der Dächer und obersten Geschossdecken

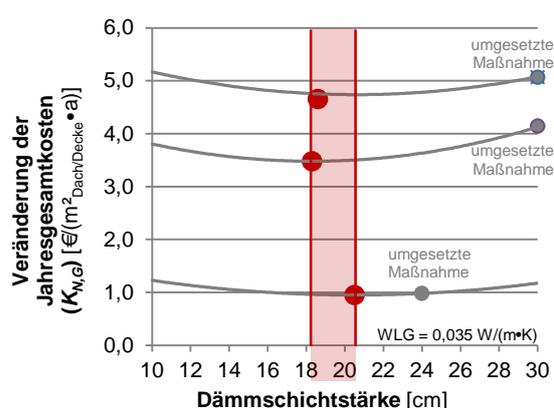
#### Beim Betrieb von Feststoffkesseln

Die energetische Sanierung der Dächer und obersten Geschossdecken bewirkt eine Erhöhung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ). Bei einer jährlichen Energiepreissteigerung ( $r$ ) von 3,5 %/a beträgt die optimierte Dämmstärke an Dächern und Geschossdecken 17 bis 18 cm. Aus einer Energiepreissteigerung ( $r$ ) von 5,5 %/a resultiert eine Erhöhung der Dämmstärke auf 18 bis 21 cm. An den drei Gebäuden ist gegenüber der entwickelten Sanierungsmaßnahme eine höhere Qualität des baulichen Wärmeschutzes umgesetzt. Überhöhte Investitionskosten sind in diesem Zusammenhang ersichtlich.

Abbildung 142 und Abbildung 143 zeigen die Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahmen für Dächer und oberste Geschossdecken beim Betrieb von Feststoffkesseln und in Abhängigkeit von unterschiedlichen Energiepreissteigerungen ( $r$ ).



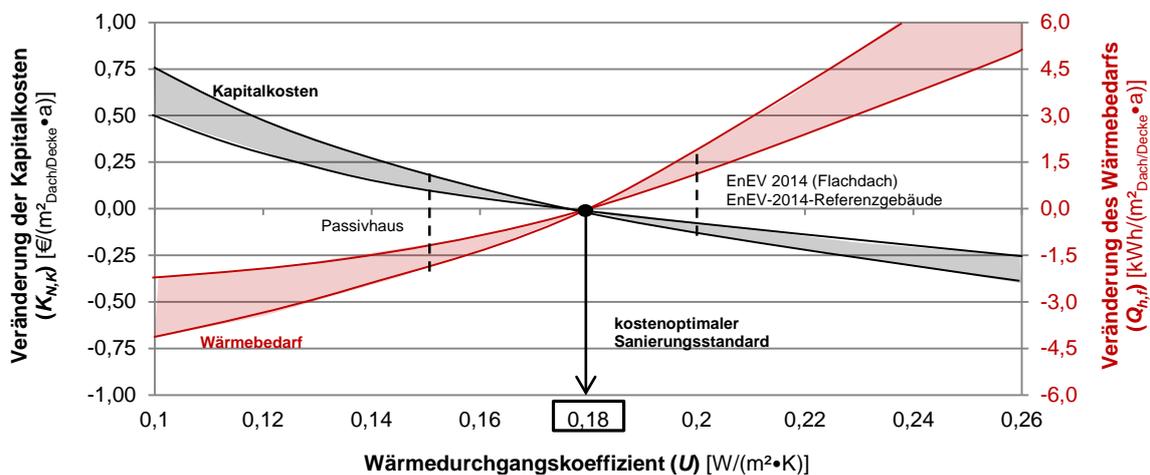
**Abbildung 142** Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme an Dächern und obersten Geschossdecken ( $r = 3,5 \text{ %/a}$ )



**Abbildung 143** Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme an Dächern und obersten Geschossdecken ( $r = 5,5 \text{ %/a}$ )

Die aufzubringende Dämmstärke der optimierten Sanierungsmaßnahmen von Dächern und Geschossdecken beträgt unter Berücksichtigung unterschiedlicher Energiepreissteigerungen 18 cm und bildet einen Wärmedurchgangskoeffizienten von  $0,18 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

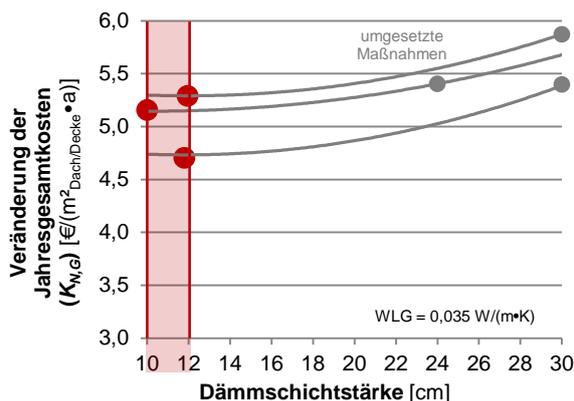
Die Qualität des Wärmeschutzes stellt sich gegenüber den Anforderungen an das Passivhaus (vgl. [51] S. 5 ff.) als abgeschwächt und gegenüber der EnEV 2014 (vgl. [8] Anl. 3) als erhöht dar. Entsprechend den Anforderungen des Passivhauses sind bei der Anwendung der optimierten Maßnahme geringere Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) von  $0,1$  bis  $0,2 \text{ €/}(\text{m}^2_{\text{Dach/Decke}} \cdot \text{a})$  und ein erhöhter Wärmebedarf ( $Q_{h,f}$ ) von  $1,2$  bis  $1,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Dach/Decke}} \cdot \text{a})$  festzustellen. Entgegen den Anforderungen der EnEV 2014 stellen sich ein geringerer Wärmebedarf ( $Q_{h,f}$ ) und erhöhte kapitalgebundene Kosten ( $K_{N,K}$ ) ein (Abbildung 144).



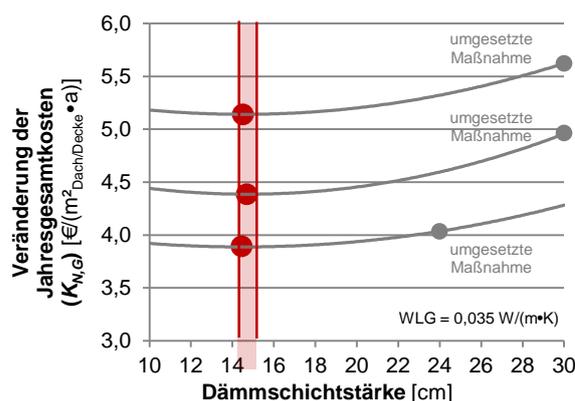
**Abbildung 144** Veränderung der Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) und des Wärmebedarfs ( $Q_{h,f}$ ) in Abhängigkeit von der Qualität des baulichen Wärmeschutzes von Dächern und obersten Geschossdecken (kostenoptimale Sanierungsmaßnahme = 0)

### Beim Betrieb von Wärmepumpen

An allen drei Gebäuden wird das Kostenoptimum durch eine Verringerung der Dämmstärke erzielt. Bei einer jährlichen Energiepreissteigerung ( $r$ ) von  $3,5 \text{ %/a}$  beträgt die optimale Dämmstärke 10 bis 12 cm. Die Anhebung der Energiepreissteigerung ( $r$ ) auf  $5,5 \text{ %/a}$  hat eine Erhöhung der Dämmstärke auf 14 bis 15 cm zur Folge. Abbildung 145 und Abbildung 146 zeigen die Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahmen für Dächer und obersten Geschossdecken beim Betrieb von Wärmepumpen und in Abhängigkeit von unterschiedlichen Energiepreissteigerungen ( $r$ ).

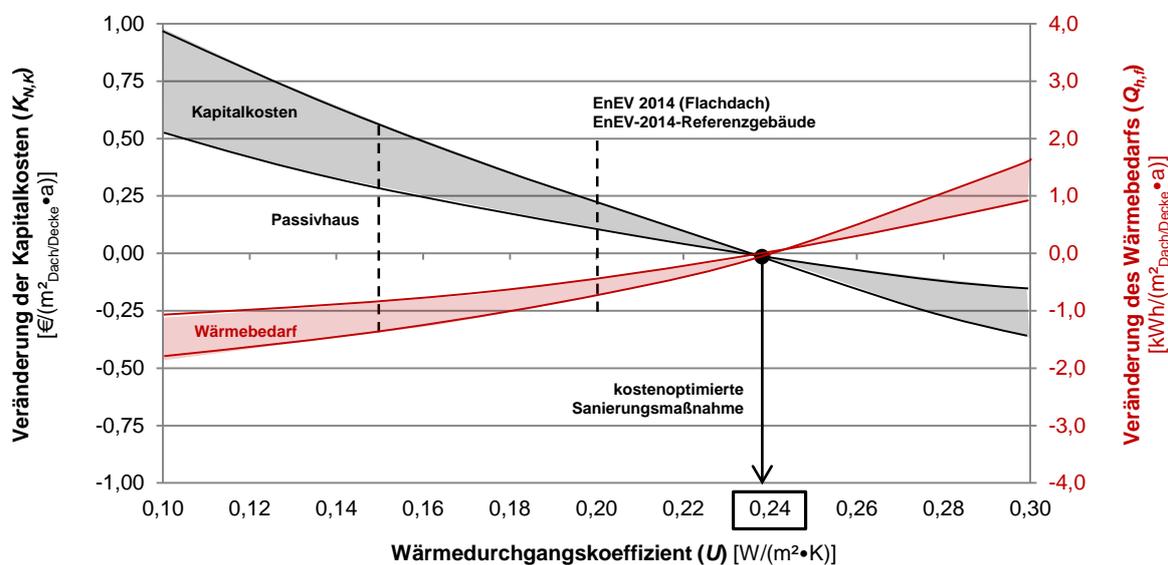


**Abbildung 145** Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme an Dächern und obersten Geschossdecken ( $r = 3,5\%/a$ )



**Abbildung 146** Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme an Dächern und obersten Geschossdecken ( $r = 5,5\%/a$ )

Die kostenoptimale Dämmstärke beträgt unter Berücksichtigung unterschiedlicher Energiepreissteigerungen 13 cm und bildet einen Wärmedurchgangskoeffizienten von  $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Gegenüber den Anforderungen des Passivhauses sind bei der Anwendung der optimierten Sanierungsmaßnahmen geringere Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) von  $0,3$  bis  $0,6 \text{ €/}(\text{m}^2_{\text{Dach/Decke}} \cdot \text{a})$  und ein erhöhter Wärmebedarf ( $Q_{h,t}$ ) von  $0,9$  bis  $1,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Dach/Decke}} \cdot \text{a})$  festzustellen. Im Vergleich zu den Anforderungen der EnEV 2014 (vgl. [8] Anl. 3) stellt sich ebenfalls ein höherer Wärmebedarf ( $Q_{h,t}$ ) und reduzierte kapitalgebundene Kosten ( $K_{N,K}$ ) ein (Abbildung 147).



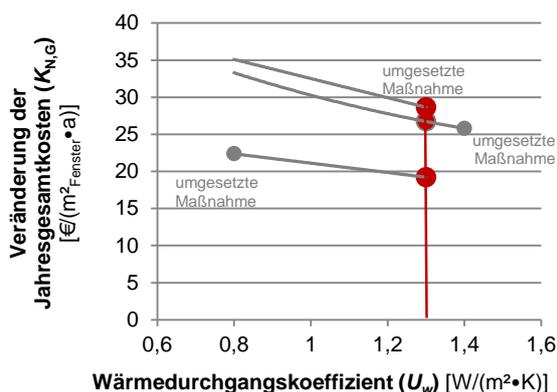
**Abbildung 147** Veränderung der Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) und des Wärmebedarfs ( $Q_{h,t}$ ) in Abhängigkeit der Qualität des baulichen Wärmeschutzes von Dächern und obersten Geschossdecken (kostenoptimale Sanierungsmaßnahme = 0)

### 6.2.2.3 Austausch der Fenster

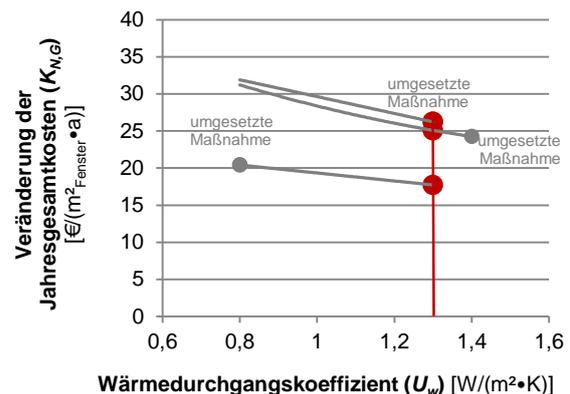
#### Beim Betrieb von Feststoffkesseln

Der Fensteraustausch führt an allen untersuchten Referenzgebäuden zu einer Erhöhung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ). Aus dem Austausch der Fenster mit einer 2-fach WSV ( $U_w = 1,3$  W/(m<sup>2</sup>•K);  $g = 0,55$  [-]) resultieren entgegen dem Einbau von Fenstern mit 3-fach WSV ( $U_w = 0,8$  W/(m<sup>2</sup>•K);  $g = 0,40$  [-]) geringere Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ). Unterschiedliche Energiepreissteigerungen ( $r$ ) beeinflussen die Qualität des Kostenoptimums nicht.

In einem Gebäude werden Fenster nach Anforderungen der EnEV 2007 (vgl. [6] Anl. 3) ( $U_w = 1,7$  W/(m<sup>2</sup>•K) verbaut. Die transparenten Bauteile des untersuchten Gebäudes weisen gegenüber den Mindestanforderungen der EnEV 2014 (vgl. [8] Anl. 3) geringere Jahresgesamtkosten ( $K_{N,K}$ ) auf, erfüllen aber aufgrund eines zu hohen Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U_w$ ) die aktuellen Anforderungen (Höchstwerte nach Anlage 3, EnEV 2014) nicht. Abbildung 148 und Abbildung 149 zeigen die Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahmen für Fenster beim Betrieb von Feststoffkesseln und in Abhängigkeit von unterschiedlichen Energiepreissteigerungen ( $r$ ).

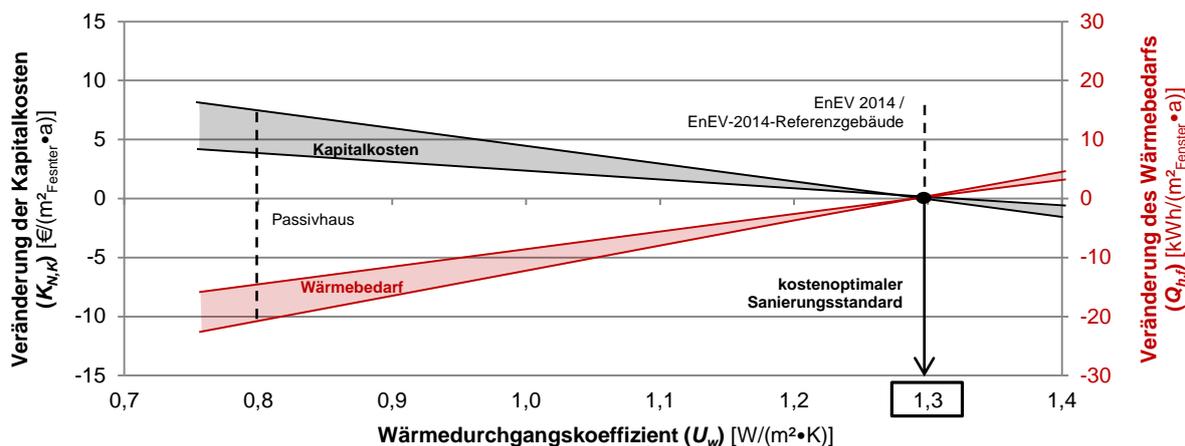


**Abbildung 148** Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme beim Fensteraustausch ( $r = 3,5$  %/a)



**Abbildung 149** Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme beim Fensteraustausch ( $r = 5,5$  %/a)

Der bauliche Wärmeschutz der Sanierungsmaßnahme stellt sich, im Vergleich zu den Anforderungen des Passivhausstandards (vgl. [51] S. 5 ff.) als abgeschwächt dar und bewirkt eine Erhöhung des Wärmebedarfs ( $Q_{h,f}$ ) von 15 bis 21 kWh/(m<sup>2</sup>Fenster•a). Die Verringerung der Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) um 4,2 bis 8,0 €/m<sup>2</sup>Fenster•a decken den erhöhten Bedarf ( $Q_{h,f}$ ) (Abbildung 150).



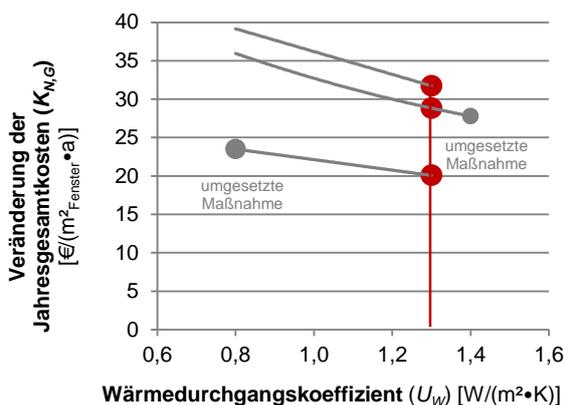
**Abbildung 150** Veränderung der Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) und des Wärmebedarfs ( $Q_{h,r}$ ) in Abhängigkeit der Qualität des baulichen Wärmeschutzes von Fenstern (kostenoptimale Sanierungsmaßnahme = 0)

### Beim Betrieb von Wärmepumpen

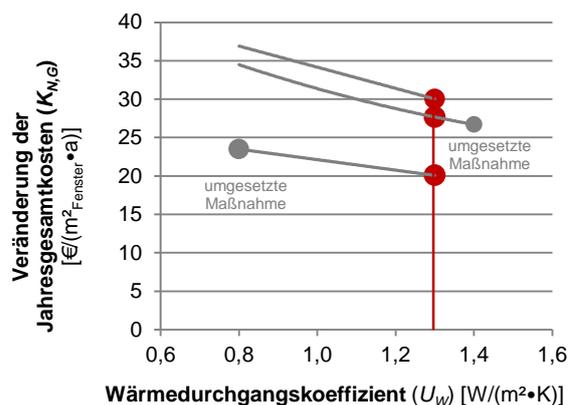
Der Fensteraustausch bewirkt beim Betrieb von Wärmepumpen ebenfalls an allen untersuchten Gebäuden eine Erhöhung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) und somit ein identisches Ergebnis zum Betrieb von Feststoffkesseln.

Aus dem Fensteraustausch mit einer Zweischiebenverglasung ( $U_w = 1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ;  $g = 0,55$ ) resultieren gegenüber dem Einbau von Dreischiebenverglasungen ( $U_w = 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ;  $g = 0,40$ ) an allen Gebäuden niedrigere Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ).

Abbildung 151 und Abbildung 152 zeigen die Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme des Fensteraustauschs beim Betrieb von Wärmepumpen und unter Berücksichtigung der Energiepreissteigerungen ( $r$ ) von 3,5 %/a und 5,5 %/a.



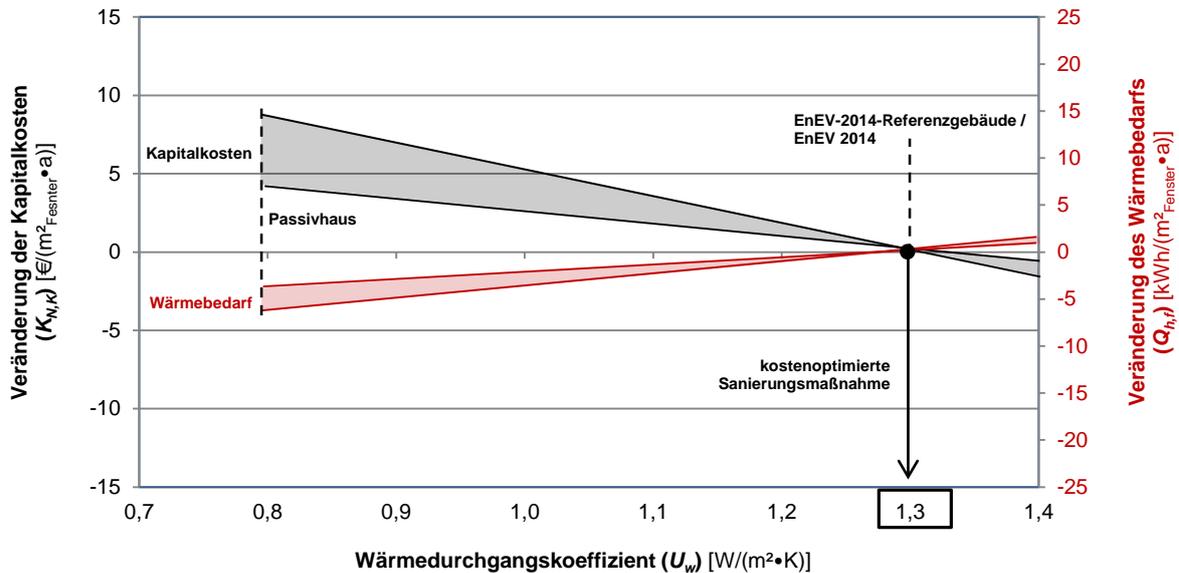
**Abbildung 151** Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme beim Fensteraustausch ( $r = 3,5 \text{ %/a}$ )



**Abbildung 152** Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme beim Fensteraustausch ( $r = 5,5 \text{ %/a}$ )

Die Anwendung der optimierten Sanierungsmaßnahme bewirkt entgegen den untersuchten Umsetzung nach Anforderungen des Passivhauses (vgl. [51] S. 5 ff.) eine Erhöhung des

Wärmebedarf ( $Q_{h,t}$ ) von 3,0 bis 5,4 kWh/(m<sup>2</sup><sub>Fenster</sub>•a) und eine Verringerung der Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) um 4,5 bis 8,0 €/m<sup>2</sup><sub>Fenster</sub>•a (Abbildung 153).



**Abbildung 153** Veränderung der Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) und des Wärmebedarfs ( $Q_{h,t}$ ) in Abhängigkeit der Qualität des baulichen Wärmeschutzes von Fenstern (kostenoptimale Sanierungsmaßnahme = 0)

#### 6.2.2.4 Überprüfung des thermischen Komforts im Zuge des Fensteraustausches

##### Methode

Das Simulationsprogramm TRNSYSlite (Version 5.1.69) ermöglicht die Überprüfung der sommerlichen Überhitzung nach DIN 4108-2 (vgl. [48] Abs. 8). Das Simulationsverfahren berücksichtigt interne ( $Q_i$ ) und passiv-solare Gewinne ( $Q_s$ ) sowie den natürlichen Luftaustausch aufgrund von Infiltration ( $Q_{inf,v}$ ) und der Sicherstellung des personenbezogenen Mindestaußenluftwechsels ( $\dot{V}_A$ ) nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 10).

Die Bewertung des thermischen Komforts erfolgt anhand der Bestimmung der jährlichen Übertemperaturgradstunden nach DIN 4108-2 (vgl. [48] Abs. 8). Nutzungsbedingt wird der Grenzwert der Übertemperaturgradstunden entsprechend der Anpassung an die Unterrichtszeiten (Mo.–Fr. 8 bis 15 Uhr) auf 254 Kh reduziert (Kapitel 5.5.1.1). Die Ergebnisse der Simulation basieren auf dem Referenzklima des Standorts Potsdam. Die Flächen- und Volumenverhältnisse des Raummodells entsprechen dem Durchschnitt der 507 aufgenommenen Klassenräume. Das  $A_{FE}/A_{NGF}$ -Verhältnis beträgt 30,5 % für Band- und Skelettfassaden. Die NGF weist einen Wert von 65,2 m<sup>2</sup> auf und der NRI beläuft sich auf 192,8 m<sup>3</sup> (vgl. Kap.4.1). Die Bewertung des thermischen Komforts im Referenzklassenraum geschieht differenziert nach Fassadenausrichtung.

## Ergebnis

Durch den Einbau von Fenstern mit einer 2-fach Wärmeschutzverglasung (WSV) besteht eine höhere Gefahr der sommerlichen Überhitzung. Der erhöhte Energiedurchlassgrad (g-Wert: 0,55 [-]) der 2-fach WSV bedingt, gegenüber einer Sonnenschutzverglasung (SSV) (g-Wert:  $\leq 0,40$  [-]), höhere passiv-solare Erträge ( $Q_s$ ) in den Raum.

In Klassenräumen, die ohne außenliegende Sonnenschutzsysteme ausgestattet sind, treten Überhitzungsgradstunden auf. Die Anforderungen der DIN 4108-2 (vgl. [48] Abs. 8) an den thermischen Komfort werden in Räumen mit einer 2-fach WSV in Kombination mit Blendschutzsystemen z.T. nicht erfüllt. Der Einbau von einer 2-fach SSV in Kombination mit Blendschutzsystemen führt zu einer Verringerung der Übertemperaturgradstunden und zur Verbesserung des thermischen Komforts. Aus der Verwendung einer 3-fach WSV in Kombination mit Blendschutzsystemen resultiert, wie der Einbau einer 2-fach SSV, eine Reduzierung der Übertemperaturgradstunden. Ein thermisch unbehaglicher Komfort aufgrund von temporärer Überhitzung ist trotz der geringeren solaren Erträge festzustellen. Bei einer möglichen Fehlsteuerung oder defektem Sonnenschutzsystem tragen diese Verglasungarten dennoch zur Verbesserung des thermischen Komforts im Sommer bei.

Außenliegende Sonnenschutzsysteme in Kombination mit 2-fach oder 3-fach WSV ( $f_c$ -Wert: 0,25) auf den Ost-, Süd- und Westfassaden gewährleisten einen guten thermischen Komfort und minimieren die Gefahr der sommerlichen Überhitzung. Der Einbau von Fenstern mit einer 2-fach WSV bewirkt im Vergleich zu einer 3-fach WSV, jeweils in Kombination mit außenliegenden Sonnenschutzsystemen, keine signifikanten Nachteile auf den thermischen Innenraumkomfort. Diese Erkenntnis stärkt die Empfehlung des Einbaus von 2-fach WSV als kostenoptimale Sanierungsmaßnahme an Fenstern (Abbildung 154).

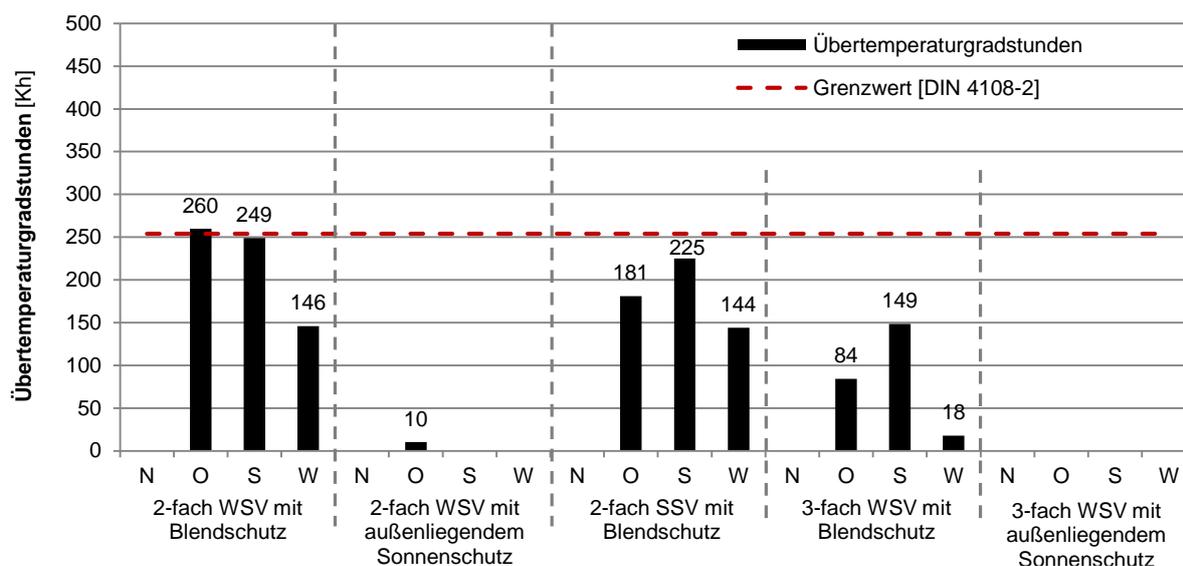


Abbildung 154 Bewertung des thermischen Komforts anhand der Übertemperaturstunden nach DIN 4108-2 [48]

### 6.2.2.5 Einfluss des thermischen Komforts auf die Leistungsfähigkeit von Schülern

#### Methode

Seppänen et al. (vgl. [38] S. 6ff.) weisen die Abhängigkeit zwischen der Raumlufttemperatur ( $\theta_{i,ar}$ ) und der Leistungsfähigkeit ( $P$ ) der sich im Raum befindenden Personen nach. Der Einbau unterschiedlicher Verglasungsarten sowie die Installation außenliegender Sonnenschutzsysteme wirken sich auf den thermischen Komfort und folglich auf die Leistungsfähigkeit ( $P$ ) der Gebäudenutzer aus.

Aufgrund der thermischen Eigenschaften der eingesetzten Verglasungen treten unterschiedliche Oberflächentemperaturen auf den raumseitigen Glasoberflächen auf. Die in den Innenraum abstrahlenden Oberflächentemperaturen ( $\theta_r$ ) bilden zusammen mit der Raumlufttemperatur ( $\theta_{ar}$ ) die operative Temperatur ( $\theta_o$ ). Diese stellt sich als „gefühlte Temperatur“ dar und hat einen Einfluss auf das Wohlbefinden der Nutzer. Die DIN EN ISO 7730 [69] beschreibt das Verfahren zur Ermittlung des vorausgesagten prozentualen Anteils an Unzufriedenen (PPD) durch die operative Temperatur in Innenräumen.

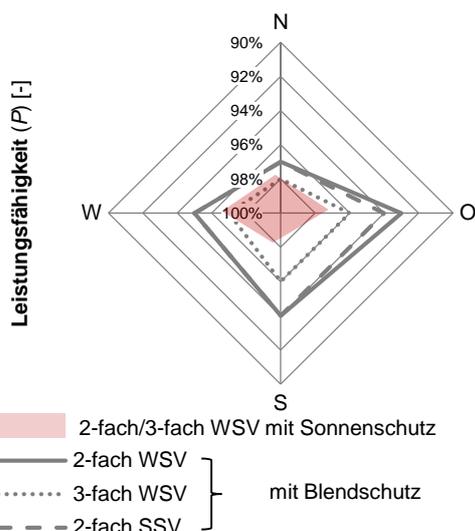
#### Ergebnis

Der Einbau einer 2-fach WSV ohne außenliegenden Sonnenschutz verringert die Leistungsfähigkeit ( $P$ ) der Personen gegenüber dem Optimum in den ost- und südorientierten Räumen um 6 bis 7 %. Die Wahl einer 3-fach WSV erhöht die Leistungsfähigkeit ( $P$ ) entgegen dem Einsatz einer 2-fach WSV um 3 %. Die Installation außenliegender Sonnenschutzsysteme prognostiziert eine Erhöhung auf bis zu 98 %.

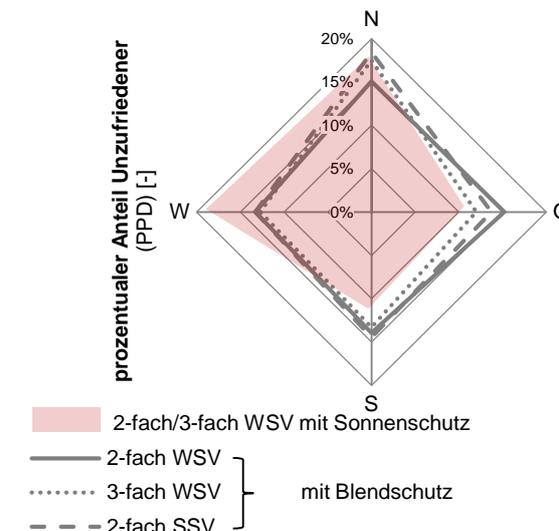
Der aktuelle Betrachtungszeitraum von 8 bis 15 Uhr lässt eine Bewertung des thermischen Komforts in den westorientierten Räumen zur Zeit der direkten Sonneneinstrahlung nicht vollständig zu. Aufgrund der Umstrukturierung auf Modelle von Ganztagschulen und der Verlängerung der täglichen Nutzungszeit in die abendlichen Stunden empfiehlt sich die Installation von Sonnenschutzsysteme auch auf den westorientierten Fassaden. Abbildung 155 zeigt die Leistungsfähigkeit ( $P$ ) der Nutzer in Abhängigkeit unterschiedlicher Verglasungsarten in Kombination mit außenliegenden Sonnenschutzsystemen.

Die simulativen Ergebnisse zeigen durch den Einsatz außenliegender Sonnenschutzsysteme in den ost- und südorientierten Klassenräumen den geringsten Anteil an Unzufriedenen auf. Der Einsatz eines außenliegenden Sonnenschutzes bewirkt in den west- und nordorientierten Räumen das genaue Gegenteil, da eine Erhöhung des Anteils Unzufriedener auftritt. Der erhöhte Anteil ist allerdings auf eine temporäre Unterkühlung aufgrund geringerer passiv-solarer Wärmegevinne ( $Q_s$ ) über die transparenten Bauteile bei geschlossenem Sonnenschutz zurückzuführen. Zeitlich ist dieses thermische Verhalten der Übergangsphase

zwischen Heiz- und Nicht-Heizperiode während des Nachmittags zuzuordnen (Abbildung 156).



**Abbildung 155** Leistungsfähigkeit ( $P$ ) der Nutzer in Abhängigkeit von unterschiedlichen Verglasungsarten in Kombination mit außenliegenden Sonnenschutzsystemen



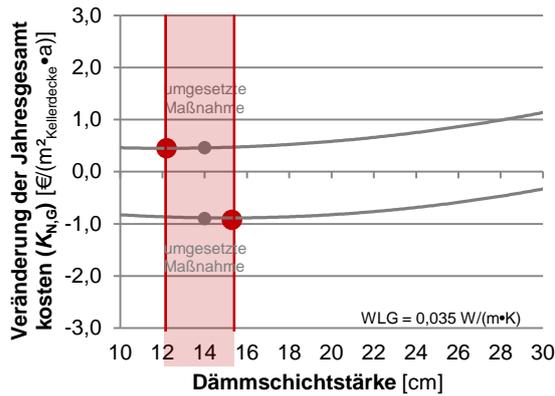
**Abbildung 156** Prozentualer Anteil Unzufriedener (PPD) in Abhängigkeit von unterschiedlichen Verglasungsarten in Kombination mit außenliegenden Sonnenschutzsystemen

### 6.2.2.6 Dämmung von Kellerdecken

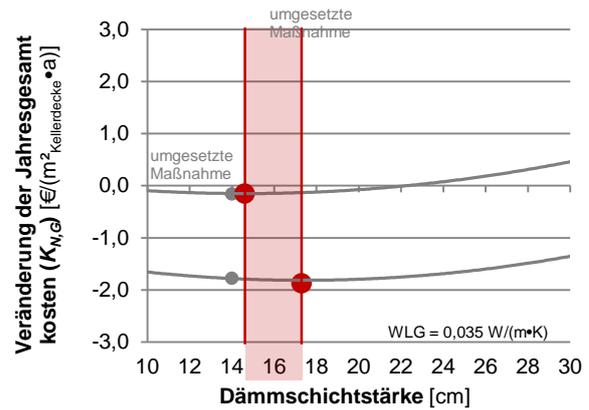
#### Beim Betrieb von Feststoffkesseln

Die Dämmung von Kellerdecken bewirkt die geringsten Veränderungen der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,K}$ ). Die optimale Dämmstärke an Kellerdecken, die an unbeheizte Kellerräume grenzen, beträgt bei einer Energiepreissteigerung ( $r$ ) von 3,5 %/a 12 bis 15 cm.

Die Erhöhung der Energiepreissteigerung ( $r$ ) auf 5,5 %/a führt zu einer Erhöhung der Dämmstärke auf 15 bis 17 cm. Die umgesetzten Maßnahmen aus der Feldstudie weichen nur gering von der entwickelten Sanierungsmaßnahme ab. Abbildung 157 und Abbildung 158 zeigen die Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme für Geschosdecken beim Betrieb von Feststoffkesseln und in Abhängigkeit von unterschiedlichen Energiepreissteigerungen ( $r$ ).



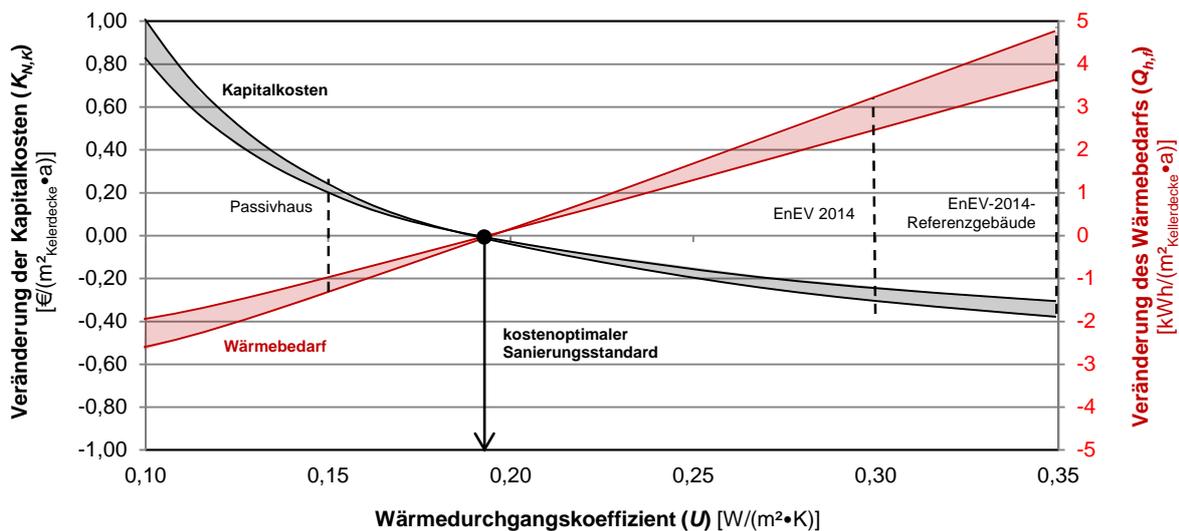
**Abbildung 157** Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme an Kellerdecken ( $r = 3,5 \%/a$ )



**Abbildung 158** Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme an Kellerdecken ( $r = 5,5 \%/a$ )

Die aufzubringende Dämmstärke der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahmen an Kellerdecken beträgt unter Berücksichtigung der Energiepreissteigerungen von 3,5 %/a und 5,5 %/a 16 cm und bewirkt eine Verbesserung des Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) auf 0,19  $W/(m^2 \cdot K)$ .

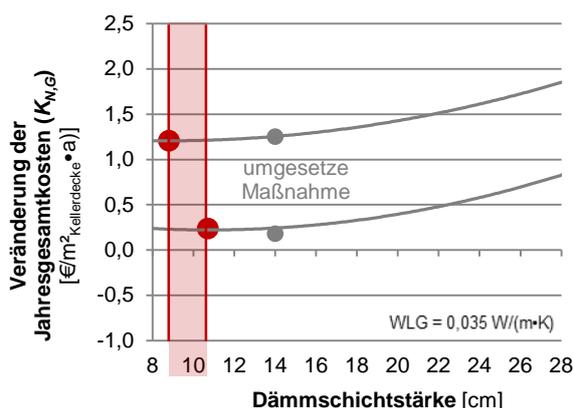
Die Anwendung der Maßnahme führt zu einer Reduzierung der Kapitalkosten um 20 bis 22  $ct/(m^2_{Kellerdecke} \cdot a)$  und erhöht den Wärmebedarf ( $Q_{h,f}$ ) um 1,0 bis 1,3  $kWh/(m^2_{Kellerdecke} \cdot a)$  gegenüber dem Passivhausstandard (vgl. [51] S. 5 ff.). Entgegen den Anforderungen der EnEV 2014 (vgl. [8] Anl. 3) ist eine Verringerung des Wärmebedarfs ( $Q_{h,f}$ ) sowie eine Erhöhung der Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) festzustellen (Abbildung 159).



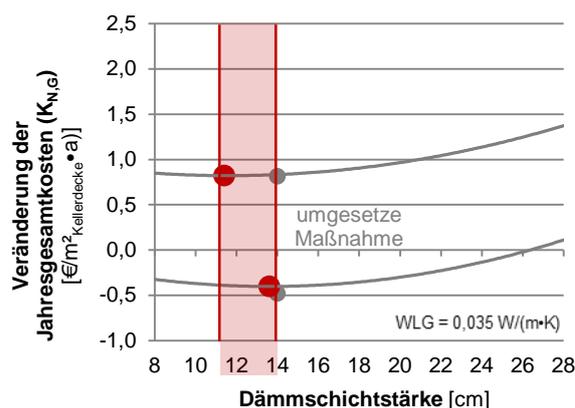
**Abbildung 159** Veränderung der Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) und des Wärmebedarfs ( $Q_{h,f}$ ) in Abhängigkeit der Qualität des baulichen Wärmeschutzes von Kellerdecken (kostenoptimale Sanierungsmaßnahme = 0)

### Beim Betrieb von Wärmepumpen

Die Dämmstärke der umgesetzten Maßnahmen weisen nur geringe Abweichungen zum Kostenoptimum auf. Die optimale Dämmstärke an Kellerdecken, die an unbeheizte Kellerräume grenzen, beträgt bei einer Energiepreissteigerung ( $r$ ) von 3,5 %/a 9 bis 11 cm. Eine Energiepreissteigerung ( $r$ ) von 5,5 %/a weist eine Erhöhung der Dämmstärke von 11 bis 14 cm auf. Abbildung 160 und Abbildung 161 zeigen die Ermittlungen der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme für Geschossdecken beim Betrieb von Wärmepumpen und in Abhängigkeit von unterschiedlichen Energiepreissteigerungen ( $r$ ).



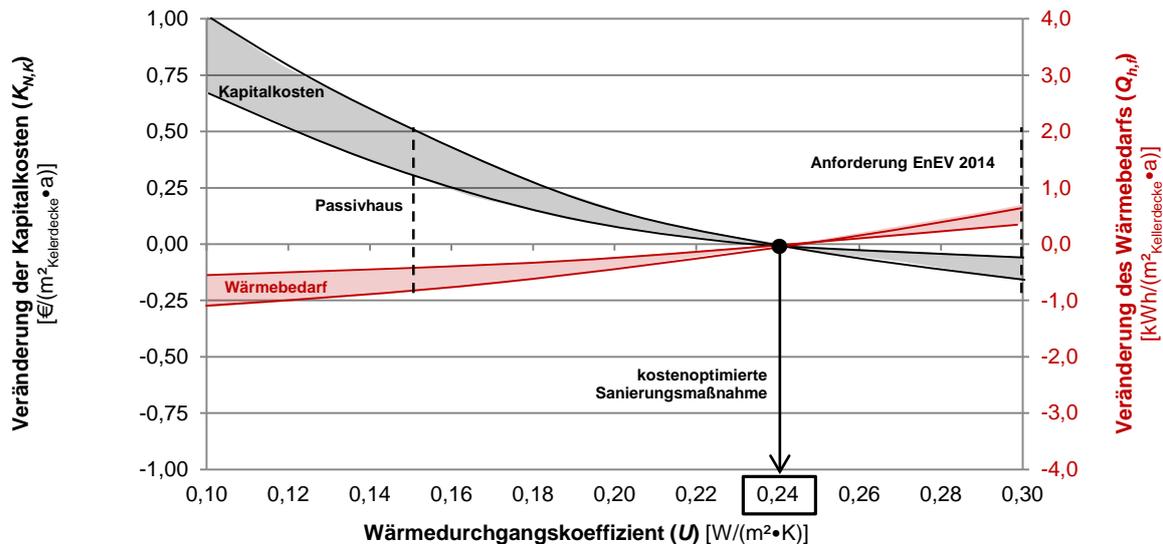
**Abbildung 160** Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme der Kellerdeckendämmung ( $r = 3,5 \text{ %/a}$ )



**Abbildung 161** Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme der Kellerdeckendämmung ( $r = 5,5 \text{ %/a}$ )

Die aufzubringende Dämmstärke beträgt unter Berücksichtigung der Energiepreissteigerungen 12 cm. Der Wärmedurchgangskoeffizient ( $U$ ) der sanierten Kellerdecken weist einen Wert von  $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  auf.

Vergleichend zum Passivhausstandard (vgl. [51] S. 5 ff.) entstehen bei der Anwendung der optimierten Maßnahme geringere Kapitalkosten von  $0,3$  bis  $0,5 \text{ €/}(\text{m}^2_{\text{Kellerdecke}} \cdot \text{a})$  und ein erhöhter Wärmebedarf ( $Q_{h,r}$ ) von  $0,4$  bis  $0,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Kellerdecke}} \cdot \text{a})$ . Gegenüber den Anforderungen der EnEV 2014 (vgl. [8] Anl. 3) stellen sich durch die Anwendung der Sanierungsmaßnahme ein geringerer Wärmebedarf ( $Q_{h,r}$ ) und erhöhte Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) ein (Abbildung 162).



**Abbildung 162** Veränderung der Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) und des Wärmebedarfs ( $Q_{h,r}$ ) in Abhängigkeit der Qualität des baulichen Wärmeschutzes von Kellerdecken (kostenoptimale Sanierungsmaßnahme = 0)

## 6.3 Erkenntnisse aus der Entwicklung kostenoptimierter Sanierungsmaßnahmen

### 6.3.1 Entwicklung übertragbarer Sanierungsmaßnahmen an technischen Anlagen

#### Raumluftechnische Anlagen

Die Auslegung und der Betrieb raumluftechnischer Anlagen mit wärmerückgewinnenden Systemen weist ein hohes Potenzial zur Reduzierung der Bauwerkskosten und zur Verringerung der Jahresgesamtkosten auf. Die Dimensionierung der Anlagen mit einem Außenluftvolumenstrom ( $\dot{V}_A$ ) von  $18,8 \text{ m}^3/(\text{Person}\cdot\text{h})$  führt zur Einhaltung der Kategorie IDA IV nach DIN EN 13779 (vgl. [73] S. 59). Diese Maßnahme erweist sich im Vergleich zu den umgesetzten Anlagen mit einem Volumenstrom von  $30 \text{ m}^3/(\text{Person}\cdot\text{h})$  als ökonomisch vorteilhaft. Eine Verringerung des Strombedarfs um 3 bis 5  $\text{kWh}/(\text{m}^2_{\text{Kond.NGF}}\cdot\text{a})$  und eine Reduzierung der Jahresgesamtkosten von 8 bis 10  $\text{€}/(\text{m}^2_{\text{Kond.NGF}}\cdot\text{a})$  stellen sich ein. Aus ökonomischer Sicht ist die Umsetzung dezentraler Lüftungsstrategien aufgrund geringerer Anforderungen an den Brandschutz, die Kanalführung und den Platzbedarf zu empfehlen.

Um den geforderten Mindestaußenluftvolumenstrom von  $30 \text{ m}^3/(\text{Person}\cdot\text{h})$  nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 10) einzuhalten und eine Verschlechterung der Luftqualität in den Klassenräumen zu vermeiden, empfiehlt sich eine mechanische Belüftung in Kombination mit einer zusätzlichen Fensterlüftung (Stoßlüftung; Außenluftvolumenstrom ( $\dot{V}_A$ ) von  $11,2 \text{ m}^3/(\text{Person}\cdot\text{h})$ ). Die Umsetzung dieser Lüftungsstrategie, die als Hybridlüftung beschrieben wird, bildet trotz

erhöhter Lüftungswärmeverluste das Optimum zur Belüftung von Klassenräumen. Ausreichende Öffnungsflächen sind in der Fassade zur natürlichen Belüftung vorzusehen (vgl. [96] S. 8 f.) und eine Nutzeranleitung nach König (vgl. [14] S. 154 ff.) durchzuführen. Zur Sicherstellung einer guten Luftqualität sind diese Maßnahmen zukünftig in Schulen unumgänglich.

### **Beleuchtungsanlagen**

Zur optimalen Beleuchtung der Räume empfiehlt sich der Einsatz von stabförmigen Leuchtstofflampen mit elektronischen Vorschaltgeräten (EVG). Zur Verringerung der Anschlussleistung erfolgt die Beleuchtung der Klassenräume direkt. Aufgrund geringer Nutzungszeiten der Schulgebäude (1.400 h/a) sowie des überwiegend tagsüber stattfindenden Unterrichts ergeben sich geringe Betriebsstunden. Die Installation effizienterer Beleuchtungsanlagen erzielt gegenüber den evaluierten Maßnahmen geringe Energieeinsparungen von durchschnittlich  $1 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Trotz eines erhöhten Wartungs- und Instandhaltungsaufwands sowie eines kürzeren Nutzungszeitraums stellt sich der Einbau und Betrieb dieses Beleuchtungssystems aufgrund der geringeren Bauwerkskosten (KG 400) gegenüber der LED-Beleuchtung ökonomisch vorteilhaft dar.

LED weisen zwar eine höhere Energieeffizienz auf, dennoch decken die zusätzlichen Energieeinsparungen in den Bildungsstätten nicht die höheren Bauwerkskosten. Bei der fortlaufenden Effizienzsteigerung und einer voraussehbaren Reduzierung der Herstellungskosten ist der Einsatz von LED in Schulen zukünftig abzuwägen.

Die zusätzliche Integration von Tageslichtsensoren oder Präsenzmeldern zur Reduzierung von Betriebsstunden führt zu einer weiteren Verringerung des Strombedarfs um  $1,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ , die die zusätzlichen Kosten ebenfalls nicht decken.

### **Photovoltaikanlagen**

Ein Potenzial zur Reduzierung des Stromnetzbezugs bietet die Integration von Photovoltaikanlagen. Die Arbeit bewertet die Installation von solarelektrischen Anlagen aus energetischer, ökonomischer und ökologischer Sicht als sinnvoll. Die reduzierten Energiekosten decken die Kapitalkosten und verringern die Jahresgesamtkosten um bis zu  $3,5 \text{ €/}(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Stromgestehungskosten von 8 bis 15 ct/kWh erweisen sich im Hinblick auf die aktuellen Strompreise von  $> 25 \text{ ct/kWh}$  als wirtschaftlich. Der direkt nutzbare Strom weist einen äquivalenten Energiepreis von 17 ct/kWh auf.

Die Gegenüberstellung der Stromlastgänge von Schulgebäuden mit den Lastgängen der PV-Anlagen leitet Benchmarks für die Dimensionierung ab. Die kostenoptimale Dimensionierung hängt in diesem Zusammenhang vom Stromverbrauch des Gebäudes und den festgelegten Randbedingungen ab (Tabelle 13 und Tabelle 14). Die Benchmarks sind in Abhängigkeit zu

klimatischen Bedingungen (solare Einstrahlung) ermittelt, sodass eine Übertragbarkeit auf andere Standorte gegeben ist. Tabelle 38 zeigt die Benchmarks zur kostenoptimierten Installation und zum Betrieb von PV-Anlagen getrennt nach Energiepreissteigerung auf.

**Tabelle 38** Benchmarks zur Installation von PV-Anlagen

Jährliche Energiepreissteigerung (q)	3,5 % p.a.	5,5 % p.a.
Dimensionierung [(kWh/a)/kWp]	600–740	480–610
Prognostizierte ESD [-]	52	55

Die kostenoptimale Dimensionierung der Anlagen stellt sich bei einer Eigenstromdeckungsrate von rund 50 % ein. Schuldächer weisen in der Regel nicht genügend Aufstellfläche auf, sodass eine ESD von rund 40 % erreicht werden kann.

### Wärmeversorgungskonzepte

Die Ableitung der kostenoptimalen Wärmeversorgung berücksichtigt die evaluierten Bauwerkskosten, aus denen eine Reduzierung des Wärmebedarfs durch die Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes hervorgeht.

#### Ökonomie

Aus dem Betrieb von Gasbrennwertkesseln resultiert die geringste Erhöhung der Jahresgesamtkosten von 11 bis 14 €/( $m^2_{\text{kond.NGF}} \cdot a$ ); er stellt sich am ökonomisch sinnvollsten dar. Die Einbindung von Holzpelletkesseln bewirken einen Anstieg der Kosten auf 13 bis 15 €/( $m^2_{\text{kond.NGF}} \cdot a$ ).

Der Einsatz elektrisch betriebener Sole/Wasser-Wärmepumpen verursacht eine Erhöhung der Jahresgesamtkosten auf 17 bis 19 €/( $m^2_{\text{kond.NGF}} \cdot a$ ). Im Vergleich weist der Betrieb von Luft/Wasser-Wärmepumpen verringerte Kosten um 3 €/( $m^2_{\text{kond.NGF}} \cdot a$ ) auf. Die Kostenreduzierung ist durch den Wegfall der Erdsonden begründet. Gegenüber den mit Erd- und Biogas befeuerten Brennwertkesseln erzielt der Einsatz von Wärmepumpen keine ökonomischen Vorteile.

Mit der Einbindung von PV-Anlagen<sup>23</sup> in die Versorgungskonzepte erfolgt eine Erhöhung der Kapitalkosten von bis zu 2,0 €/( $m^2_{\text{kond.NGF}} \cdot a$ ). Aus der Integration der Anlagen resultiert unter Berücksichtigung des Nutzerstroms eine Eigenstromdeckung von bis zu 41 % im Gebäudebetrieb. Durch den erhöhten Betriebsstrombedarf der Wärmepumpen ( $JAZ \geq 3$  [-]) verringert sich die prognostizierte Eigenstromdeckung um 4 %.

<sup>23</sup> Auslegung der Photovoltaikanlagen: bilanziell, vollständige Deckung des jährlichen Strombedarfs der Wärmepumpe ( $Q_{h,t}$ ) durch die zu erwartenden solarelektrischen Erträge der Anlage

Die Reduzierung des Stromnetzbezugs durch die Eigenstromnutzung führt zu einer Verringerung der Energiekosten. Trotz erhöhter Bauwerkskosten ergibt sich bei der Integration von Photovoltaikanlagen eine Reduzierung der Jahresgesamtkosten um bis zu  $3 \text{ €}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ .

### Ökologie

Unter ökologischen Aspekten weist der Einsatz von Gasbrennwertkesseln inklusive der Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes die geringste Reduzierung des Primärenergiebedarfs von maximal 60 % gegenüber dem unsanierten Zustand auf. Die Befeuerung der Anlagen mit Biogas bewirkt eine Verringerung des Bedarfs um weitere 9 %, zeigt aber keinen ökonomischen Vorteil auf.

Der Einsatz von Wärmepumpen in Kombination mit Photovoltaikanlagen stellt sich aufgrund der höheren Reduzierung des Primärenergiebedarfs sowie der  $\text{CO}_2$ -Emissionen als effizienter heraus. Die höchste Reduzierung des Primärenergiebedarfs um 75 % erzielt jedoch der Betrieb von Holzpelletkesseln.

### Kombinierte Betrachtung

Die Gegenüberstellung von Kapitalkosten und Primärenergieeinsparung zeigt beim Einsatz der Holzpelletkessel die geringsten Kosten zur Reduzierung von Primärenergien von durchschnittlich  $16 \text{ ct}/(\text{kWh}_{\text{PE}} \cdot \text{a})$  auf. Vergleichend entstehen bei der Integration von Sole/Wasser-Wärmepumpen in Kombination mit Photovoltaik Kosten von  $> 20 \text{ ct}/(\text{kWh}_{\text{PE}} \cdot \text{a})$ .

Der Betrieb von Holzpelletkesseln stellt sich somit als optimale Sanierungsmaßnahme für Schulgebäude heraus. Vor allem in Gebäuden mit einem geringen Stromverbrauch von  $< 25 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ , wie z.B. in allgemeinbildenden Schulen, ist dieses Konzept zu empfehlen.

Als Alternative zum Einsatz von Holzpelletkesseln erweist sich der Betrieb von Luft/Wasser-Wärmepumpen in Kombination mit Photovoltaikanlagen in Gebäuden mit einem hohen Jahresstromverbrauch von  $> 25 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$  als sinnvoll. In diesen Gebäuden liegt ein höheres Potenzial der Direktstromnutzung und Verringerung des Stromnetzbezugs vor. Die PV-Anlagen können effizienter genutzt werden und erzielen einen ökonomischen und ökologischen Vorteil. Vor allem in Berufsschulen oder in Förderschulen mit dem Lehrschwerpunkt „geistige Entwicklung“ sind erhöhte Stromverbräuche festzustellen und ist dieses Wärmeversorgungskonzept geeignet.

## Tabellarische Zusammenfassung:

Tabelle 39 fasst die übertragbaren Sanierungsmaßnahmen an technischen Anlagen zusammen.

**Tabelle 39** Beschreibung der Sanierungsmaßnahmen an technischen Anlagen

	Sanierungsmaßnahme	Bemerkungen
6	Installation <b>raumluftechnischer Anlagen mit WRG</b> zur Sicherstellung des hygienischen Innenraumkomforts (dezentral)	Volumenstrom $\dot{V} = 18,8 \text{ m}^3/(\text{Person}\cdot\text{h})$ ; WRG: $\eta = 0,75$ [-]
7	<b>Fensterlüftung</b> zur Sicherstellung der Anforderungen an den Mindestaußenluftvolumenstrom nach DIN V 18599 [23]	Volumenstrom $\dot{V} = 11,2 \text{ m}^3/(\text{Person}\cdot\text{h})$ ; Dimensionierung der Öffnungsflächen nach Gugerli et al. [96]
8	Austausch von <b>Beleuchtungsanlagen</b> : stabförmige Leuchtstofflampen mit EVG; Präsenzmelder und Tageslichtregelung optional	Einsatz von LED-Technik aufgrund der Effizienzsteigerung in Zukunft abzuwägen
9	Einbindung von <b>Photovoltaikanlagen</b> mit dem Ziel der Eigenstromnutzung	Prognostizierte ESD $\approx 40$ %
10	Installation elektrisch betriebener <b>Wärmepumpen in Kombination mit Photovoltaikanlagen</b> in Gebäuden mit einem Jahresstromverbrauch $> 25 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}}\cdot\text{a})$ (alternativ zu 11)	Annahme: JAZ $\geq 3$ [-]; Wärmeübergabesystem: Heizkörper; VL/RL: 50/40 °C
11	Installation von <b>Feststoffkesseln (z.B. Holzpellets)</b> in Gebäuden mit einem Jahresstromverbrauch $< 25 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}}\cdot\text{a})$ (alternativ zu 10)	Annahme: $\eta = 0,85$ [-]; Wärmeübergabesystem: Heizkörper; VL/RL: 70/55 °C

### 6.3.2 Entwicklung kostenoptimaler Sanierungsmaßnahmen an Gebäudehüllen

Aus den untersuchten Sanierungen an der Gebäudehülle leiten sich kostenoptimierte Maßnahmen für einzelne Bauteile ab. Als kostenoptimal stellt sich die Qualität des baulichen Wärmeschutzes heraus, die das Gleichgewicht aus eingesparten Wärmemengen durch Sanierung und den kapitalgebundenen Kosten bildet. Eine zu geringe Qualität des Wärmeschutzes führt zu erhöhtem Wärmebedarf. Ein zu hoher Wärmeschutz stellt sich aufgrund überhöhter Bauwerkskosten als unwirtschaftlich dar.

Da die energetische Bilanzierung nach EnEV [8] die Anlagentechnik berücksichtigt, beeinflusst die Wahl des Wärmeversorgungssystems das Optimum des Wärmeschutzes. Die Ableitung berücksichtigt die Betrachtung von unterschiedlichen Wärmeversorgungskonzepten. Die Integration von Feststoffkesseln (z.B. Holzpellets, Annahme:  $\eta_{\text{therm.}} = 0,85$  [-]) sowie der Einsatz von Wärmepumpen (JAZ  $\geq 3$  [-]) in Kombination mit Photovoltaik stellen sich für zukünftige Schulsanierungen im Bezug von Kapitalkosten zur Reduzierung des Primärenergiebedarfs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen als optimal dar. Die Wahl dieser Wärmeversorgungskonzepte führt zur differenzierten Ableitung der optimierten Maßnahmen an Gebäudehüllen.

Die kostenoptimierten Maßnahmen unterliegen gegenüber den Anforderungen von Bauteilen beim erstmaligen Einbau oder bei Ersatz (vgl. [8] Anl. 3) größtenteils einer höheren energetischen Qualität. Die Empfehlungen des Passivhauses (vgl. [51] S. 5 ff.) mit einem maximalen Wärmedurchgangskoeffizienten der opaken Bauteile von  $U < 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  sind aus wirtschaftlicher Sicht für Schulsanierungen nicht erforderlich. Die Dämmung von Außenwänden gegen Erdreich verlangt gegenüber der EnEV 2014 eine geringere energetische Qualität. Der Einbau von Fenstern mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten  $U_w < 1,30 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  ist nicht wirtschaftlich. Gegenüber dem Einsatz von Feststoffkesseln ist beim Betrieb von Wärmepumpen ein geringerer baulicher Wärmeschutz erforderlich.

Tabelle 40 stellt die Maßnahmen getrennt nach Wärmeversorgungskonzept dar.

**Tabelle 40** Beschreibung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahmen an Gebäudehüllen

	Bauteil	Wärmeerzeuger		Höchstwerte nach Anl. 3 EnEV 2014 [8]
		Feststoffkessel	Wärmepumpen	
		U-Wert [ $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ]	U-Wert [ $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ]	U-Wert [ $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ]
<b>1</b>	Außenwand gegen Außenluft	0,18	0,26	0,24
<b>2</b>	Außenwand gegen Erdreich	0,35	0,35	0,30
<b>3a</b>	(Flach-)Dach gegen Außenluft	0,18	0,24	0,20
<b>3b</b>	Oberste Geschossdecke	0,18	0,24	0,24
<b>4</b>	Fenster und Fenstertüren	1,30	1,30	1,30
<b>5</b>	Kellerdecke gegen unbeheizten Raum	0,19	0,24	0,30

Im Bilanzierungsverfahren nach DIN V 18599 [23] ist die Einhaltung der Höchstwerte nach Anlage 3 (EnEV 2014 [8]) nicht erforderlich. Die Verordnung stellt Anforderungen an Höchstwerte der maximalen mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten ( $\bar{U}$ ) getrennt für opake und transparente Bauteile. Die 40-prozentige Reduzierung der Anforderungen (Sanierung) verringert die einzuhaltende Qualität des baulichen Wärmeschutzes. Die Umsetzung der abgeleiteten, kostenoptimalen Maßnahmen führt zur Einhaltung der beschriebenen EnEV-Anforderungen.

Die Ableitung der kostenoptimalen Maßnahmen deckt eine zu hohe Qualität des baulichen Wärmeschutzes an 53 % aller evaluierten Einzelmaßnahmen auf. Die zusätzliche Reduzierung des Wärmebedarfs deckt die erhöhten Bauwerkskosten in diesem Fall nicht.

Die kostenoptimierte Umsetzung transparenter Bauteile weist das höchste Potenzial auf, überhöhte Bauwerkskosten zu vermeiden. Der Austausch von Fenstern mit 2-fach Wärmeschutzverglasung (WSV) verzeichnet gegenüber einer 3-fach WSV in Bildungsstätten eine Reduzierung der Jahresgesamtkosten um 4 bis 6 €/m<sup>2</sup><sub>Fenster</sub>•a).

Zur Sicherstellung eines guten thermischen und visuellen Komforts im Sommer empfiehlt sich die Installation von außenliegenden Sonnenschutzsystemen. Aus der Komfortverbesserung resultiert eine Leistungssteigerung der Schüler und Lehrer um bis zu 4 % nach Seppänen et al. (vgl. [38] S. 6ff.).

Die Umsetzung eines kostenoptimierten Wärmeschutzes an den opaken Bauteilen zeigt geringere Einsparpotenziale auf. Die Dämmung der Bauteile erzielt eine Verringerung der Jahresgesamtkosten von weniger als 1 €/m<sup>2</sup><sub>Kellerdercke</sub>•a) auf. Die flächenmäßige Gewichtung der Bauteile ist bei der Ableitung dieser Einsparpotenziale zu beachten.

Insgesamt zeigen sich investive Einsparpotenziale an der thermische Gebäudehülle gegenüber den evaluierten Sanierungen von bis zu 60 €/m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>. Dieses Potenzial entspricht einer Reduzierung von 14 %. Demgegenüber entsteht in den mit Gas oder Holz beheizten Schulen ein endenergetischer Mehrbedarf (Wärme) von 16 kWh/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a). In den über Wärmepumpen versorgten Gebäuden ist ein elektrischer Mehrbedarf von 5 kWh/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a) zu verzeichnen. Die reduzierten Bauwerkskosten kompensieren in diesem Fall die erhöhten Energiekosten.

## 7 ANWENDUNG DER KOSTENOPTIMIERTEN SANIERUNGSMÄßNAHMEN

Beispielhaft werden an einem Schulgebäude aus der Feldstudie die abgeleiteten kostenoptimierten Maßnahmen an zwei aufeinander aufbauenden Sanierungskonzepten (2+3) angewendet und dem unsanierten Gebäudezustand sowie dem umgesetzten Sanierungskonzept (1) gegenübergestellt.

Das kostenreduzierte Sanierungskonzept (2) ersetzt die Maßnahmen der umgesetzten Sanierung (1) durch die kostenoptimierten Sanierungsmaßnahmen. Die Anwendung dieser Variante weist gegenüber dem umgesetzten Sanierungskonzept (1) geringere Sanierungskosten auf.

Bei der Aufstellung des kostenreduzierten Sanierungskonzepts (2) entstehen investive Einsparungen, die für die Installation anlagentechnischer Systeme zur Wärme- und Strombereitstellung auf Basis erneuerbarer Energien zur Verfügung stehen.

Eine Steigerung der Gesamteffizienz stellt sich als Ziel des Konzepts (3) dar. Die Bauwerkskosten des umgesetzten Sanierungskonzepts (1) deckeln den Kostenrahmen des Sanierungskonzepts zur Effizienzsteigerung (3). Abbildung 163 stellt die Maßnahmen der Sanierungskonzepte plakativ gegenüber.

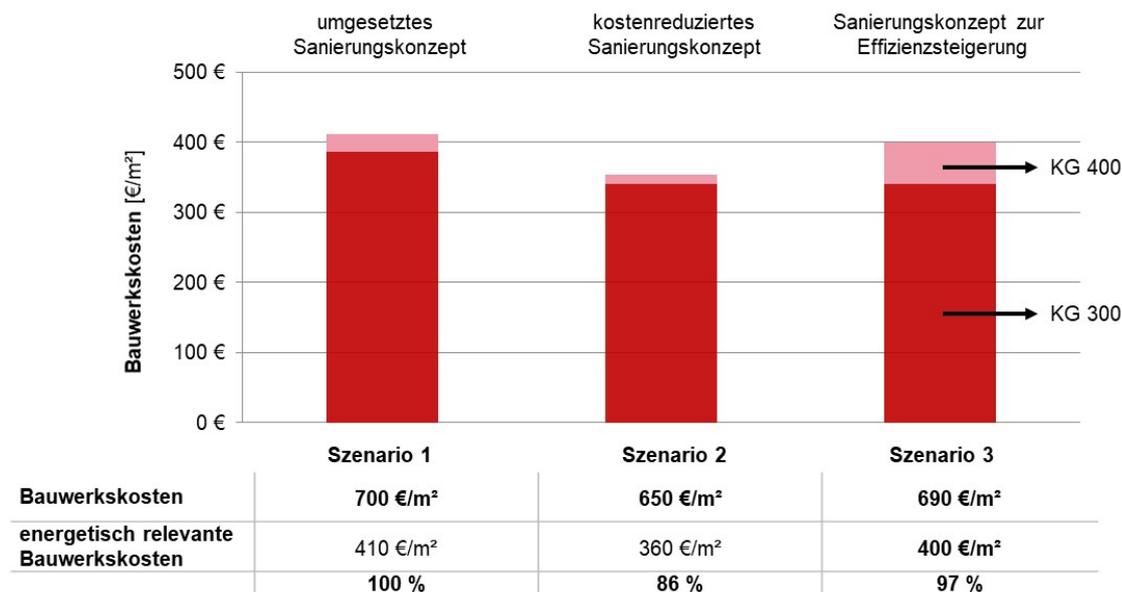


Abbildung 163 Gegenüberstellung der Sanierungskonzepte

Die Sanierungskonzepte fassen folgende Einzelmaßnahmen an der Gebäudehülle und Anlagentechnik zusammen:

**Maßnahme 1:** Dachdämmung; **Maßnahme 2:** Außenwanddämmung; **Maßnahme 3:** Fensteraustausch; **Maßnahme 4:** Austausch der Oberlichter; **Maßnahme 5:** Installation raumluftechnischer Anlagen; **Maßnahme 6:** Austausch der Wärmeerzeugungsanlage; **Maßnahme 7:** Installation einer Photovoltaikanlage mit ESD

Da ein Stromverbrauch des Gebäudes nach der Sanierung von  $< 25 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$  prognostiziert wird, erweist sich die Beheizung des Gebäudes mit einem Holzpelletkessel als sinnvoll.

## 7.1 Gebäudehülle

Die Aufstellung der Sanierungskonzepte (2) und (3) fasst die in Kapitel 6.2 entwickelten Kostenoptima der opaken und transparenten Bauteile zusammen und stellt sie dem umgesetzten Sanierungskonzept (1) sowie dem unsanierten Gebäudezustand gegenüber.

Die Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) der Außenwände und Dächer weisen einen Wert von  $0,18 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  auf. Die unterseitige Dämmung der Kellerdecken strebt einen  $U$ -Wert von  $0,19 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  an. Die kostenoptimierte Qualität der Fenster erfordert einen  $U_w$ -Wert von  $1,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  sowie einen Gesamtenergiedurchlassgrad ( $g$ -Wert) von  $0,55 [-]$ . Alle Bauteile der thermischen Gebäudehülle erfüllen die Bauteilanforderungen der EnEV 2014 Anlage 3 Tabelle 1 (vgl. [8] Anl. 3) (Tabelle 41).

**Tabelle 41** Qualität des baulichen Wärmeschutzes der Sanierungskonzepte

Bauteil	umgesetztes Sanierungskonzept (1)	kostenreduziertes Sanierungskonzept (2)	Sanierungskonzept zur Effizienzsteigerung (3)
Dächer, oberste Geschossdecken	$0,10\text{--}0,14 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$0,18 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$0,18 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Außenwände	$0,19 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$0,18 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$0,18 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Fenster	$0,80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$1,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$1,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Oberlichter	$1,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$1,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$1,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Kellerdecke	(keine Umsetzung)	$0,19 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$0,19 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

## 7.2 Anlagentechnik

Einerseits führt die Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes zu einer Reduzierung des Wärmebedarfs ( $Q_f$ ), zum anderen trägt das Zusammenwirken einzelner anlagentechnischer Systeme zur Energieeffizienzsteigerung der Gebäude bei. Aus dem Einsatz von wärme- und stromproduzierenden Anlagen auf Basis erneuerbarer Energien resultiert eine Verringerung des Primärenergiebedarfs ( $Q_p$ ) sowie der  $\text{CO}_2$ -Emissionen durch den Gebäudebetrieb. Der Betrieb raumluftechnischer Anlagen schafft eine gute Luftqualität und folglich gute Lern- und Lehrbedingungen in den Klassenräumen.

Innerhalb des umgesetzten Sanierungskonzepts (1) stellen die Installation und der Betrieb raumluftechnischer Anlagen mit einem ausgelegten personenbezogenen Außenluftvolumenstrom ( $\dot{V}_A$ ) von  $33,3 \text{ m}^3/(\text{Person} \cdot \text{h})$  eine gute hygienische Luftqualität der IDA-III-Kategorie

nach DIN EN 13779 (vgl. [73] S. 59) in den Klassenräumen sicher. Die kostenreduzierte Maßnahme zur Belüftung der Innenräume sieht eine Hybridlüftung vor, die sich aus einer mechanischen Grundlüftung mit WRG und einem Außenluftvolumenstrom ( $\dot{V}_A$ ) von  $18,8 \text{ m}^3/(\text{Person}\cdot\text{h})$  sowie einer natürlichen Stoßlüftung zusammensetzt (vgl. Kap. 6.1.1).

Das kostenreduzierte Sanierungskonzept (2) sowie das Sanierungskonzept zur Effizienzsteigerung (3) integrieren diese Maßnahme zur Sicherstellung des nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 10) geforderten Mindestluftvolumenstroms ( $\dot{V}_{A,soll}$ ) von  $30 \text{ m}^3/(\text{Person}\cdot\text{h})$ .

Die Umsetzung des Kostenoptimums an der Gebäudehülle sowie die geringere Auslegung des personenbezogenen Außenluftvolumenstroms ( $\dot{V}_A$ ) der raumluftechnischen Anlagen ermöglichen die Investition in weitere technische Anlagen zur Umsetzung des Sanierungskonzepts zur Effizienzsteigerung (3). Die Bauwerkskosten des umgesetzten Sanierungskonzepts (1) stellen dabei den Kostendeckel dar. Tabelle 42 führt die Einzelmaßnahmen der technischen Anlagen in den Sanierungskonzepten auf. Da die Prognose für das beispielhafte Gebäude einen Jahresstromverbrauch von  $< 25 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}}\cdot\text{a})$  nach der Sanierung vorher sagt, stellt sich der Einsatz eines Holzpelletkessels gegenüber einer Luft/Wasser-Wärmepumpe als ökologisch und ökonomisch vorteilhaft dar (vgl. Kap. 6.1.4). Die Installation einer PV-Anlage (vgl. Kap. 6.1.3) in das Versorgungskonzept des Gebäudes sowie die Eigennutzung des regenerativ erzeugten Stroms bewirken die Reduzierung des Stromnetzbezugs.

**Tabelle 42** Integration anlagentechnischer Systeme in das Sanierungskonzept

anlagentechnisches System	umgesetztes Sanierungskonzept (1)	kostenreduziertes Sanierungskonzept (2)	Sanierungskonzept zur Effizienzsteigerung (3)
Lüftungsanlage ( $\eta_{WRG} = 0,75$ )	$\dot{V}_A = 33,3 \text{ m}^3/(\text{Person}\cdot\text{h})$	$\dot{V}_A = 18,8 \text{ m}^3/(\text{Person}\cdot\text{h})$	$\dot{V}_A = 18,8 \text{ m}^3/(\text{Person}\cdot\text{h})$
Wärmeerzeugungsanlage [ $\eta$ ] Energieträger	Brennwertkessel; $\eta: 0,85 [-]$ Gas	Brennwertkessel; $\eta: 0,85 [-]$ Gas	Feststoffkessel; $\eta: 0,75 [-]$ Holz
Photovoltaikanlage [ $\text{kW}_p$ - ESD]	---	---	32,9–39,5

### 7.3 Gegenüberstellung der Bauwerkskosten

Aus der Aufstellung des kostenreduzierten Konzepts (2) resultiert eine Reduzierung der energetisch relevanten Kosten auf 86,2 %. Die eingesparten Bauwerkskosten dienen zur Aufstellung des Sanierungskonzepts zur Effizienzsteigerung (3) und ermöglichen die Umlagerung der Kosten zur Installation technischer Anlagen für die regenerative Strom- und Wärmeproduktion. Die Bauwerkskosten des Sanierungskonzepts zur Effizienzsteigerung (3) betragen gegenüber dem umgesetzten Sanierungskonzept (1) 97,2 % und überschreiten die zur Verfügung stehende Investitionssumme nicht (Abbildung 164).

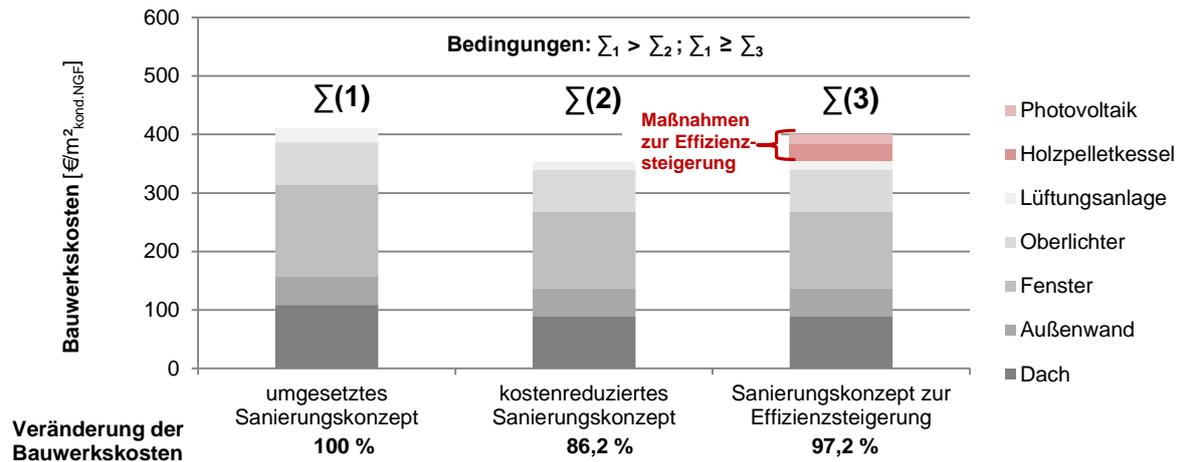


Abbildung 164 Gegenüberstellung der Bauwerkskosten zur Umsetzung der Konzepte (brutto)

Tabelle 43 zeigt die spezifischen Bauwerkskosten und energetisch relevanten Kosten der Sanierungskonzepte.

Tabelle 43 Gegenüberstellung und Aufteilung der Bauwerkskosten (brutto)

	umgesetztes Sanierungskonzept (1)	kostenreduziertes Sanierungskonzept (2)	Sanierungskonzept zur Effizienzsteigerung (3)
Bauwerkskosten	703 €/m² kond.NGF	647 €/m² kond.NGF	692 €/m² kond.NGF
energetisch relevante Bauwerkskosten	411 €/m² kond.NGF	357 €/m² kond.NGF	400 €/m² kond.NGF

## 7.4 Energieeffizienz

Die DIN V 18599 [23] bewertet die entwickelten Sanierungskonzepte anhand der in Kapitel 5.2.1 beschriebenen Methode aus energetischer Sicht.

### 7.4.1 Reduzierung des Endenergiebedarfs (Wärme)

Vor den energetischen Sanierungsmaßnahmen wies das Schulgebäude einen witterungsbeinigten Wärmeverbrauch ( $Q_{h,t}$ ) von 115,7 kWh/(m² kond.NGF•a) auf. Der Wärmeverbrauch ist mit dem EnEV-2009-Vergleichskennwert (vgl. [57] S. 22 ff.) von 80 - 105 kWh/(m² kond.BGF•a) für ABS zu vergleichen. Das umgesetzte Sanierungskonzept (1) erzielt eine Reduzierung des Verbrauchs auf 45,1 kWh/(m² kond.NGF•a). Die Reduzierung des Wärmeverbrauchs beträgt gegenüber dem unsanierten Zustand 61,1 %.

Aufgrund des kostenreduzierten Sanierungskonzepts (2) stellt sich ein prognostizierter Mehrverbrauch ( $Q_{h,t}$ ) von 9,3 kWh/(m² kond.NGF•a) gegenüber dem umgesetzten Sanierungskonzept (1) ein. Der erhöhte Verbrauch begründet sich mit der verringerten Qualität des baulichen

Wärmeschutzes. Zudem treten höhere Lüftungswärmeverluste ( $Q_{min,v}$ ) durch die Anwendung der Hybridlüftung auf.

Ein prognostizierter Wärmeverbrauch von  $61,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$  stellt sich beim zusätzlichen Austausch der bestehenden Wärmeerzeugungsanlage durch einen Holzpelletkessel beim Sanierungskonzept zur Effizienzsteigerung (3) ein. Dieses Konzept weist gegenüber den anderen Sanierungskonzepten den höchsten prognostizierten Wärmeverbrauch ( $Q_{h,f}$ ) auf (Abbildung 165).

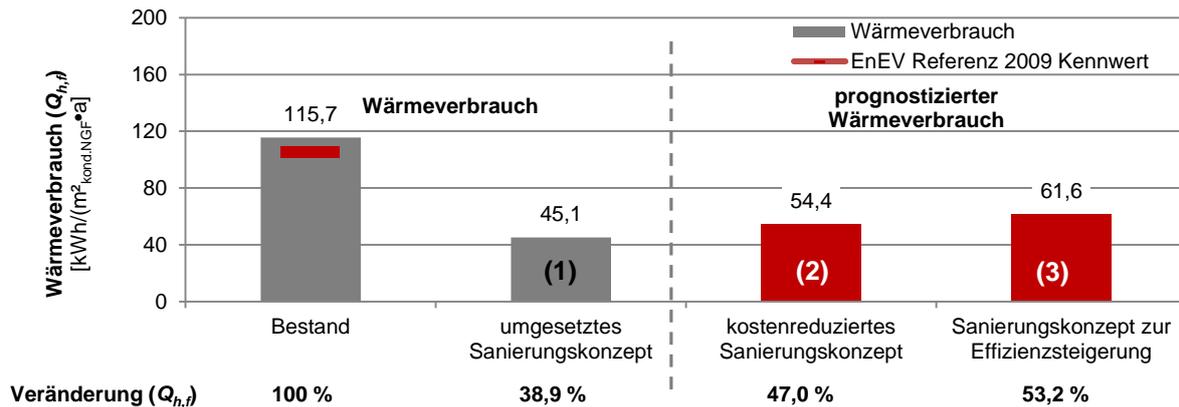


Abbildung 165 Gegenüberstellung: Wärmeverbrauch ( $Q_{h,f}$ ) der Sanierungskonzepte

#### 7.4.2 Reduzierung des Endenergiebedarfs (Strom)

Der Stromnetzbezug ( $Q_{Strom,f}$ ) des Schulgebäudes beträgt vor der Sanierung  $12,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$  und ist mit dem EnEV-2009-Vergleichswert (vgl. [57] S. 22 ff.) von  $10 - 20 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.BGF}} \cdot \text{a})$  zu vergleichen. Der Betrieb der raumluftechnischen Anlagen erhöht den prognostizierten Stromverbrauch ( $Q_{Strom,f}$ ) nach der Umsetzung des Sanierungskonzepts (1) auf  $14,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Die Verringerung des geförderten Außenluftvolumenstroms ( $\dot{V}_A$ ) der raumluftechnischen Anlagen beim kostenreduzierten Sanierungskonzept (2) verringert den prognostizierten Netzbezug ( $Q_{Strom,f}$ ) um  $1,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Die Umsetzung des Sanierungskonzepts zur Effizienzsteigerung (3) integriert eine Photovoltaikanlage ( $32,9 \text{ kW}_p$ ) in das Versorgungskonzept des Gebäudes und ermöglicht die prognostizierte Eigenstromdeckung von  $39,5 \%$ , die eine Reduzierung des Netzbezugs ( $Q_{Strom,f}$ ) auf  $8,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$  bewirkt (Abbildung 166).

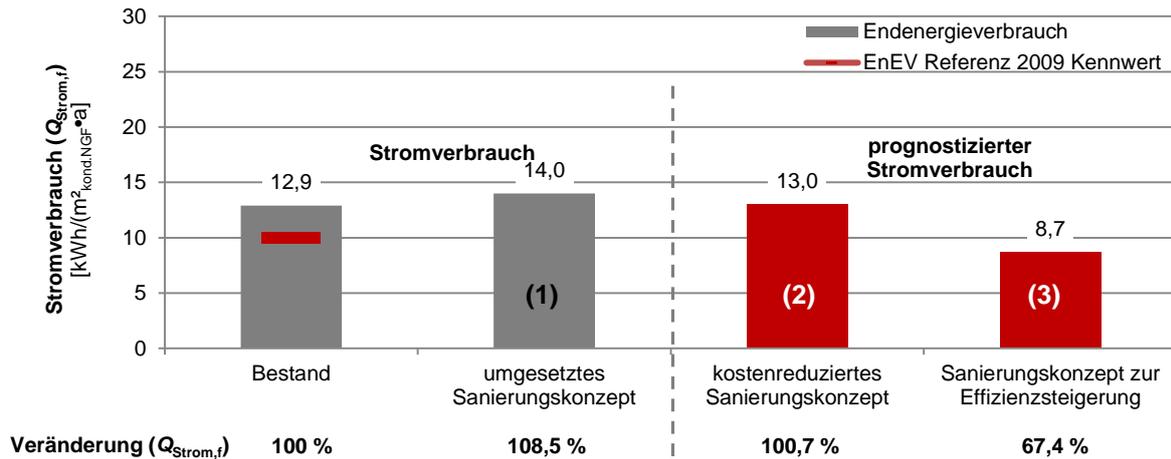


Abbildung 166 Gegenüberstellung: Stromverbrauch ( $Q_{Strom,t}$ ) der Sanierungskonzepte

### 7.4.3 Reduzierung des Primärenergiebedarfs

Der Primärenergieverbrauch des Schulgebäudes beträgt vor der Sanierung 160,7 kWh/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a). Durch die Reduzierung des Wärmeverbrauchs ( $Q_{h,t}$ ) und den erhöhten Stromverbrauch ( $Q_{Strom,t}$ ) stellt sich insgesamt eine Reduzierung des Primärenergieverbrauchs ( $Q_P$ ) auf 86,0 kWh/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a) ein. Die Reduzierung des Primärenergieverbrauchs ( $Q_P$ ) durch die Sanierung beträgt 46,5 %.

Das kostenreduzierte Sanierungskonzept (2) weist aufgrund des verringerten baulichen Wärmeschutzes einen Mehrverbrauch von 7,7 kWh/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a) auf. Der Austausch der Wärmeerzeugungsanlage (Holzpellets:  $f_p = 0,2$  [-]), die Einbindung der Photovoltaikanlage in das Versorgungskonzept sowie die Eigenstromnutzung bewirken eine Reduzierung des Primärenergieverbrauchs auf 34,9 kWh/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a) beim Sanierungskonzept zur Effizienzsteigerung (3). Die Reduzierung des prognostizierten Primärenergieverbrauchs beträgt 78,3 % gegenüber dem unsanierten Zustand (Abbildung 167).

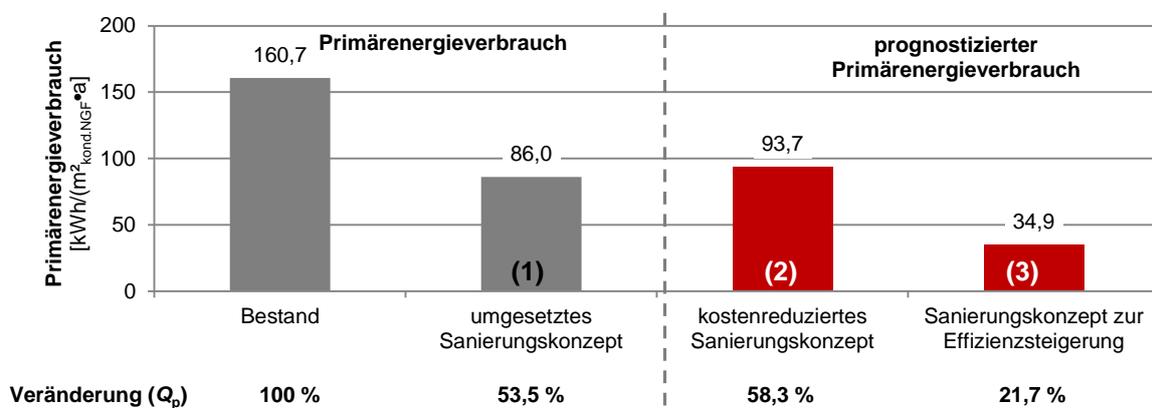


Abbildung 167 Gegenüberstellung: Primärenergieverbrauch ( $Q_p$ ) der Sanierungskonzepte

#### 7.4.4 Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emission

Ein identisches Ergebnis stellt sich bei der Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emission ein. Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß im unsanierten Gebäudebetrieb beträgt 36,4 kg<sub>CO<sub>2</sub></sub>/(m<sup>2</sup><sub>Kond.NGF</sub>·a). Die Umsetzung des Sanierungskonzepts (1) verringert die Emission gegenüber dem unsanierten Zustand um 48,5 %. Das Sanierungskonzept zur Effizienzsteigerung (3) weist eine prognostizierte CO<sub>2</sub>-Reduzierung von 78,0 % gegenüber dem Gebäudebestand auf (Abbildung 168).

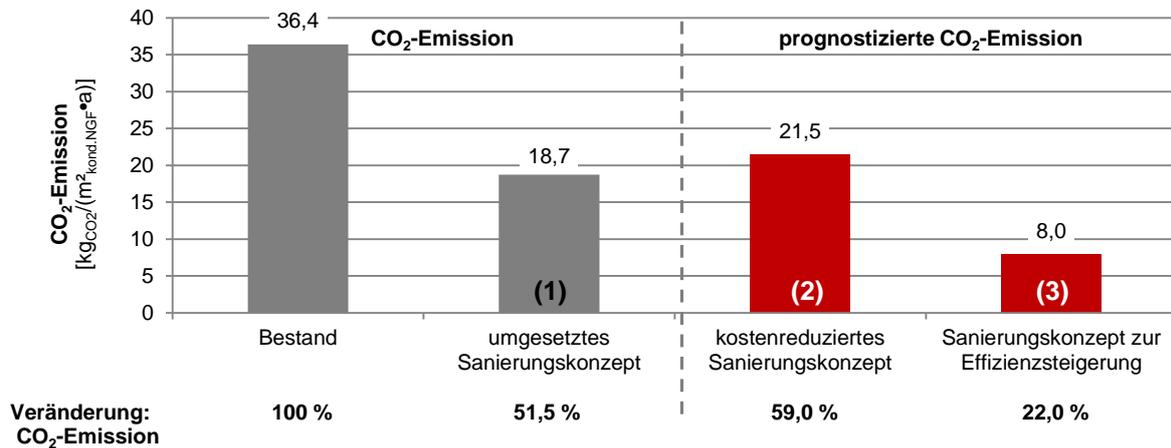


Abbildung 168 Gegenüberstellung: CO<sub>2</sub>-Emission der Sanierungskonzepte

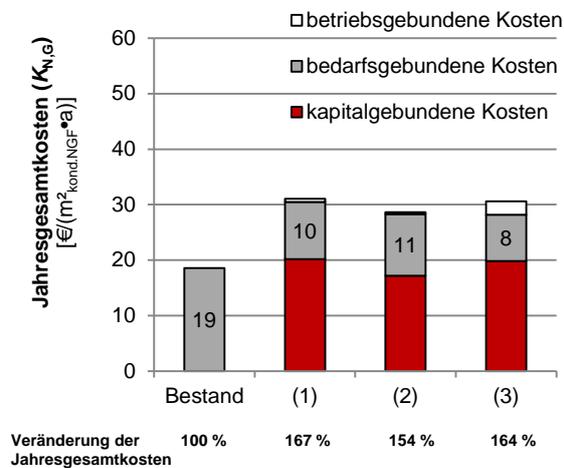
#### 7.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die ökonomische Bewertung der Varianten erfolgt anhand der Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) gegenüber dem unsanierten Zustand. Die Sanierungsmaßnahmen weisen kapitalgebundene Kosten ( $K_{N,K}$ ) sowie eine Veränderung der bedarfsgebundenen Kosten ( $K_{N,V}$ ) auf. Die Gegenüberstellung hinterfragt, anhand der äquivalenten Energiepreise (Wärme/Strom) sowie der äquivalenten Kosten zur Reduzierung des Primärenergieverbrauchs und CO<sub>2</sub>-Emission, die Sinnhaftigkeit der aufgestellten Konzepte gegenüber der umgesetzten Sanierung (1).

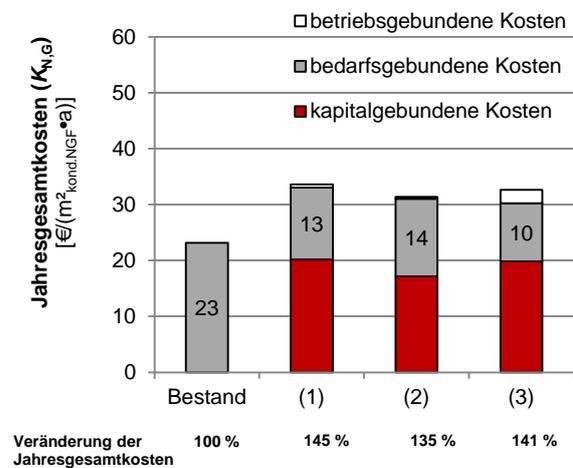
Aus allen Sanierungsvarianten resultiert eine Erhöhung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ). Die Reduzierung der Energiekosten ( $K_{N,V}$ ) erweist sich, gegenüber den kapitalgebundenen Kosten ( $K_{N,K}$ ), bei allen Sanierungskonzepten als zu gering, um eine Reduzierung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) zu erzielen. Alle Konzepte stellen sich aus ökonomischer Sicht als unwirtschaftlich dar.

Die Umsetzung des kostenreduzierten Sanierungskonzepts (2) und des Sanierungskonzepts zur Effizienzsteigerung (3) erzielen gegenüber der umgesetzten Sanierung (1) eine Verringerung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) und somit einen wirtschaftlichen Vorteil. Der Betrieb der

raumluftechnischen Anlagen und des Holzpelletkessels beim Sanierungskonzept zur Effizienzsteigerung (3) verzeichnen erhöhte betriebsgebundene Kosten (Abbildung 169 und Abbildung 170).



**Abbildung 169** Gegenüberstellung der Jahresgesamt-kosten ( $r = 3,5 \text{ %/a}$ ;  $T = 20 \text{ a}$ )



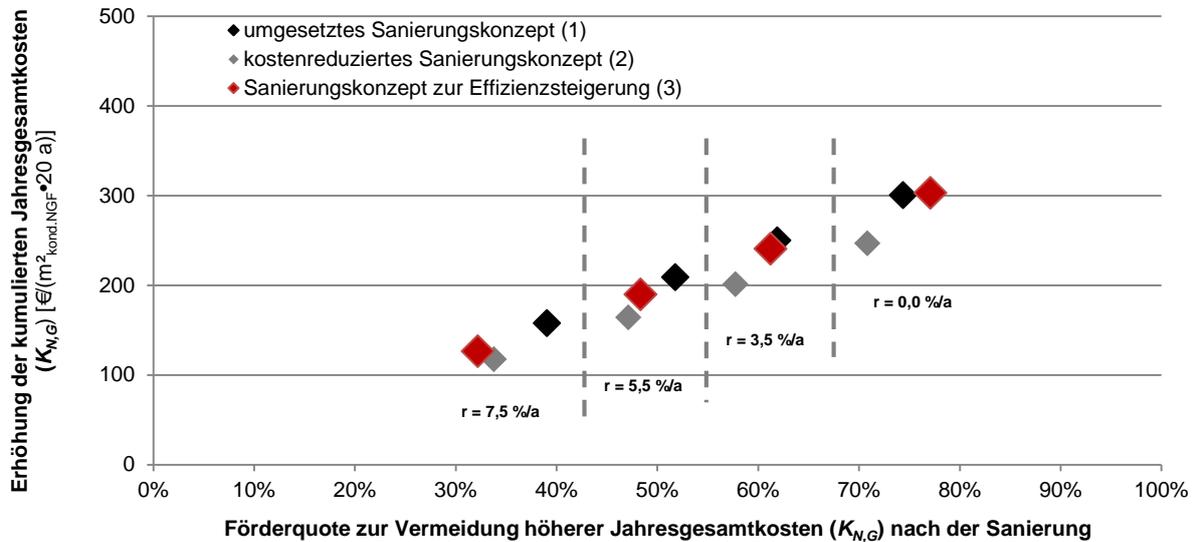
**Abbildung 170** Gegenüberstellung der Jahresgesamt-kosten ( $r = 5,5 \text{ %/a}$ ;  $T = 20 \text{ a}$ )

Eine mögliche, finanzielle Förderung der Sanierung führt zur Kompensation der erhöhten Jahresgesamt-kosten ( $K_{N,G}$ ) und zur Kostenneutralität der Maßnahmen. Die Gegenüberstellung der, auf den Betrachtungszeitraum ( $T = 20 \text{ a}$ ) kumulierten, Jahresgesamt-kosten mit den Bauwerkskosten dient zur Ermittlung der notwendigen Förderquote. Die Gegenüberstellung berücksichtigt dabei vier Energiepreissteigerungen ( $r$ ).

Mit Erhöhung der Energiepreissteigerung ( $r$ ) ist eine Reduzierung der notwendigen Quote zur finanziellen Förderung der energetischen Sanierungsmaßnahmen festzustellen. Während ein konstanter Energiepreis ohne jährliche Preissteigerung ( $r$ ) (also von 0 %) eine Förderquote zur Umsetzung der Konzepte von 70 bis 76 % verlangt, führt eine Energiepreissteigerung ( $r$ ) von 5,5 %/a zur Verringerung dieser Quote auf 46 bis 51 %.

Die Differenz zwischen den notwendigen Förderquoten des umgesetzten Sanierungskonzepts (1) und des kostenreduzierten Sanierungskonzepts (2) beträgt bei allen angesetzten Energiepreissteigerungen ( $r$ ) 4 %. Die notwendige Quote zur Vermeidung höherer Jahresgesamt-kosten ( $K_{N,G}$ ) beim Sanierungskonzept zur Effizienzsteigerung (3) verringert sich gegenüber den anderen Sanierungskonzepten bei steigender jährlicher Energiepreissteigerung ( $r$ ) schneller. Bei einer Energiepreissteigerung ( $r$ ) von 7,5 %/a ergeben sich beim Sanierungskonzept zur Effizienzsteigerung (3) die geringste notwendige Förderquote sowie die geringste Erhöhung der kumulierten Jahresgesamt-kosten. Dieses Sanierungskonzept stellt sich somit gegenüber hoher Energiepreissteigerung ( $r$ ) als ökonomisch stabiler dar. Ab einer Energiepreissteigerung ( $r > 3,5 \text{ %/a}$ ) weist das umgesetzte Sanierungskonzept (1) gegenüber den anderen Konzepten

die höchste, notwendige Förderquote sowie die höchsten Jahresgesamtkosten auf (Abbildung 171).

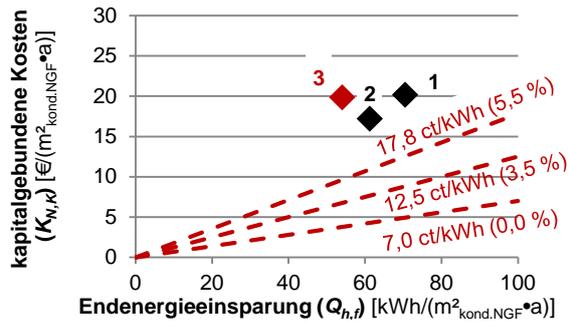


**Abbildung 171** Veränderung der notwendigen Förderquote in Abhängigkeit zu den kumulierten Jahresgesamtkosten ( $T = 20a$ ) und der Energiepreissteigerung ( $r$ )

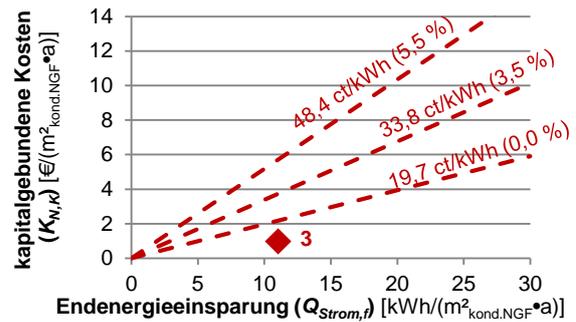
Der äquivalente Energiepreis beschreibt den investiven Aufwand der kapitalgebundenen Kosten ( $K_{N,K}$ ) zur Reduzierung des Wärme- ( $Q_{h,t}$ ), Strom- ( $Q_{Strom,t}$ ) und Primärenergieverbrauchs ( $Q_p$ ) sowie der  $CO_2$ -Emissionen.

Das umgesetzte Sanierungskonzept (1) und das kostenreduzierte Konzept (2) weisen vergleichbare äquivalente Energiepreise zur Reduzierung des Wärmeverbrauchs ( $Q_{h,t}$ ) von 28 bzw. 29 ct/kWh<sub>Wärme</sub> auf. Der äquivalente Energiepreis des Sanierungskonzepts zur Effizienzsteigerung (3) beträgt 36 ct/kWh<sub>Wärme</sub>. Alle Gesamtsanierungsmaßnahmen sind nach der Methode des „äquivalenten Energiepreises“ als unwirtschaftlich zu bewerten (Abbildung 172).

Aus der umgesetzten Sanierung (1) sowie dem kostenreduzierten Sanierungskonzept (2) resultiert eine Erhöhung des Stromverbrauchs ( $Q_{Strom,t}$ ). Die Ermittlung des äquivalenten Energiepreises ist nicht möglich, da keine energetischen Einsparungen vorliegen. Die Installation der PV-Anlage und die Umsetzung der Eigenstromnutzung führen zur Reduzierung des Stromnetzbezugs beim Sanierungskonzept zur Effizienzsteigerung (3). Der äquivalente Energiepreis beträgt 10 ct/kWh<sub>Strom</sub> und ist als wirtschaftlich zu bewerten (Abbildung 173).



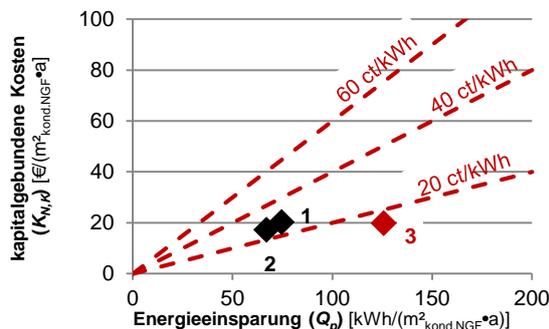
**Abbildung 172** Ermittlung der äquivalenten Wärmepreise der Sanierungskonzepte



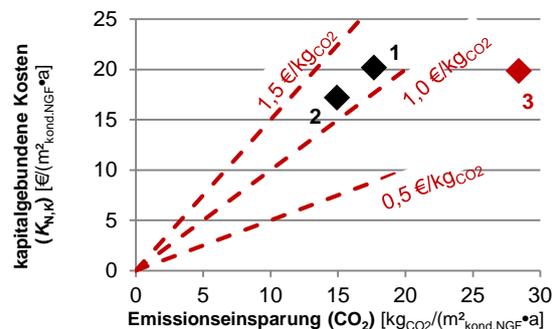
**Abbildung 173** Ermittlung der äquivalenten Strompreise der Sanierungskonzepte

Die reduzierte Primärenergieemenge weist beim umgesetzten (1) und kostenreduzierten Sanierungskonzept (2) einen äquivalenten Preis von 27 bzw. 26 ct/kWh<sub>PE</sub> auf. Beim Sanierungskonzept zur Effizienzsteigerung (3) beträgt der äquivalente Primärenergiepreis 16 ct/kWh<sub>PE</sub> und stellt sich als ökologisch vorteilhafter dar (Abbildung 174).

Deckungsgleich zum äquivalenten Primärenergiepreis leiten sich die Kosten zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ab. Aus der reduzierten Menge an Kohlendioxid beim umgesetzten (1) sowie kostenreduzierten Sanierungskonzept (2) resultiert ein äquivalenter Preis von 1.140 bzw. 1.150 €/t<sub>CO2</sub>. Das Sanierungskonzept zur Effizienzsteigerung (3) erzeugt einen geringeren Preis von 690 €/t<sub>CO2</sub> (Abbildung 175).



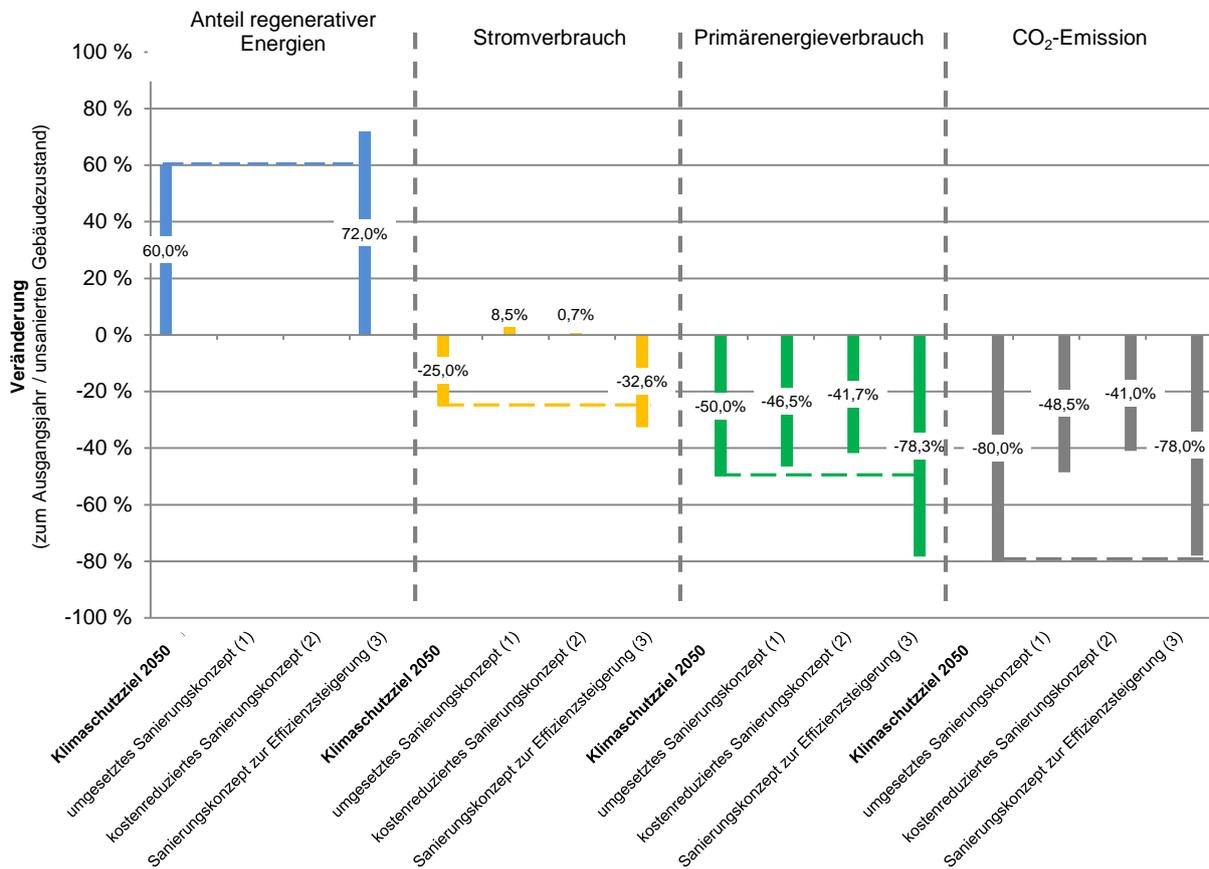
**Abbildung 174** Ermittlung des äquivalenten Primärenergiepreises der Sanierungskonzepte



**Abbildung 175** Ermittlung des äquivalenten Preises zur CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparung der Sanierungskonzepte

Die Klimaschutzziele der Bundesregierung bis 2050 [1], [2], [3] verfolgen die Reduzierung des Primärenergie- und Stromverbrauchs, die Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes sowie die anteilige Einbindung regenerativer Energien in die Wärme-, Kälte- und Stromproduktion. Bei der Gegenüberstellung dieser Ziele mit den prognostizierten Einsparungen der Sanierungskonzepte innerhalb der Bilanzgrenze des Gebäudes stellt sich das Sanierungskonzept zur Effizienzsteigerung (3) als effektivstes Sanierungskonzept für Schulgebäude heraus. Zwar weist diese Variante den höchsten prognostizierten Wärmeverbrauch ( $Q_{h,i}$ ) aller betrachteten Konzepte auf, jedoch stellen die Klimaschutzziele in diesem Zusammenhang keine Anforderung.

Das entwickelte Konzept weist das höchste Potenzial auf, einen Beitrag für die Klimaschutzziele zu leisten und übererfüllt drei der vier Ziele innerhalb der Bilanzgrenze des Gebäudes bereits heute. Die Sanierung hält lediglich die bis 2050 geforderte Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emission nicht ein. Das umgesetzte (1) sowie kostenreduzierte Sanierungskonzept (2) erfüllt keines der gesetzten Klimaschutzziele (Abbildung 176).



**Abbildung 176** Gegenüberstellung der erreichten Effizienz der Sanierungskonzepte und der Klimaschutzziele bis 2050 [1], [2], [3]

## 8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der Fokus der 17 evaluierten Sanierungsmaßnahmen lag auf der Reduzierung des Wärmeverbrauchs der Schulen. Bei der Hälfte aller sanierten Bauteile stellte sich die Umsetzung eines qualitativ zu hohen baulichen Wärmeschutzes heraus. Diese erhöhte Qualität war aus Sicht der wirtschaftlichen Energieeinsparung nicht zu rechtfertigen. Der integrale Gedanke zu Lerneffizienz und Innenraumkomfort wurde unzureichend verfolgt, zudem blieb die Nutzung erneuerbarer Energien zur anteiligen Deckung des Energiebedarfs unberücksichtigt. Die evaluierten Sanierungskonzepte zeigten in diesem Zusammenhang einen Optimierungsbedarf auf.

Aus der Analyse der umgesetzten Sanierungen wurden kostenoptimierte Maßnahmen an technischen Anlagen und der Gebäudehülle abgeleitet und zu einem ganzheitlichen Sanierungskonzept zusammengestellt. Das ausgewogene Verhältnis aus Sanierungskosten und Energieeinsparung stellte sich in diesen Zusammenhang als kostenoptimal dar.

Die Übertragung des entwickelten, ganzheitlichen Konzepts auf ein beispielhaftes Referenzgebäude zeigte die kosteneffizientere Umsetzung von Sanierungen gegenüber den evaluierten Gebäuden auf. Das Konzept erwies sich als auf zukünftige Sanierungen übertragbar.

Durch die Reduzierung der Energiekosten können zukünftige Sanierungen positive Effekte für die kommunalen Haushaltskassen bewirken. Die gezielte Nutzung erneuerbarer Energien reduziert den Ressourcenverbrauch sowie die Schadstoffemission und unterstützt die Klimaschutzziele der Bundesregierung [1], [2], [3]. Diese Ziele beinhalten u.a. die anteilige Einbindung erneuerbarer Energien, die Reduzierung des Primärenergie- bzw. Stromverbrauchs sowie die Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Die zeitgleiche Verbesserung des Innenraumkomforts trägt zur Leistungssteigerung der Schüler und Lehrer bei und ist als volkswirtschaftlicher Mehrwert zu sehen.

### 8.1 Erkenntnisse aus den evaluierten Sanierungen

Die unsanierten Schulen weisen einen Wärmebedarf ( $Q_{h,f}$ ) von durchschnittlich 140 kWh/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a) und einen Strombedarf von rund 22 kWh/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a) auf. Der größte Anteil des Wärmebedarfs resultiert aus der Beheizung der Gebäude. Der Trinkwarmwasserverbrauch kann in den Schulen und in angrenzenden Sporthallen als gering eingestuft werden. Je nach eingesetztem Energieträger zur Wärmeproduktion beträgt der Primärenergieverbrauch ( $Q_p$ ) 130 bis 400 kWh/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a). Analog hierzu resultiert aus dem Gebäudebetrieb eine CO<sub>2</sub>-Emission von 44 bis 101 kg<sub>CO2</sub>/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a).

Die evaluierten Sanierungskonzepte, die sich auf die reine Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes beschränken, erzielen eine Verringerung des Wärmeverbrauchs ( $Q_{h,f}$ ) von bis zu  $100 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Die Installation von RLT-Anlagen mit wärmerückgewinnenden Systemen ( $\eta_{\text{WRG}} = 0,75$  [-]) führt zur weiteren Reduzierung des Heizwärmebedarfs um durchschnittlich  $40 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Aus dem Anlagenbetrieb resultiert ein Strombedarf von rund  $10 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Vergleichend zu den evaluierten Konzepten, die sich allein auf die Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes fokussieren, stellen sich diese Strategien innerhalb der Bilanzgrenze der Wärmeversorgung als energetisch effizienter dar.

Der Betrieb von RLT-Anlagen führt zu einer Verringerung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in den Klassenräumen von über 3.000 auf 1.000 ppm. Die Einhaltung einer Luftqualität mit einer  $\text{CO}_2$ -Konzentration von unter 1.000 ppm (VDI 6040 (vgl. [12] S. 4)) führt zu einer Leistungssteigerung der Schüler und Lehrer nach Wargocki (vgl. [13] 4 ff.) um über 5 %. Diese Erkenntnisse decken sich mit den Ergebnissen nach König (vgl. [14] S. 154 ff.).

Eine zusätzliche Nutzung von wärmeerzeugenden Anlagen auf Basis erneuerbarer Energien (Holzpelletkessel) reduziert den Primärenergieverbrauch der Gebäude um bis zu 80 %. Die evaluierten Sanierungen berücksichtigen andere Wärmeversorgungskonzepte, wie z.B. die Integration von Wärmepumpen in die Konzepte, nicht.

Die Hälfte der evaluierten Schulen weisen nach der Sanierung einen höheren Stromverbrauch um bis zu  $9 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$  auf, was einem Mehrverbrauch von bis zu 50 % entspricht. Der erhöhte Verbrauch resultiert aus dem Betrieb raumluftechnischer Anlagen sowie der Ausstattung der Klassenräume mit nutzungsspezifischen Geräten, wie Smartboards und Beamer. Durch den Austausch herkömmlicher durch effiziente Beleuchtungsanlagen verringert sich der Strombedarf um  $1 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Eine Kompensation des Mehrverbrauchs durch den Austausch der Beleuchtungsanlagen kann damit nicht erzielt werden. Die Integration von stromproduzierenden Anlagen, wie z.B. Photovoltaikanlagen mit Eigenstromnutzung, bleibt unberücksichtigt.

Die Sanierungen zeigen eine Erhöhung der Jahresgesamtkosten um bis zu  $25 \text{ €/}(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$  auf. Die reduzierten Energiekosten decken in diesen Fällen die Kapitalkosten nicht, und die Schulsanierungen sind als unwirtschaftlich zu bewerten. Die Sanierungen, die eine Verringerung des Stromverbrauchs erzielen, zeigen mit der Reduzierung der Jahresgesamtkosten nach VDI 2067 (vgl. [11] S. 7 ff.) bzw. VDI 6025 (vgl. [61] S. 38 ff.) einen ökonomischen Erfolg auf. Die Reduzierung des Wärmeverbrauchs durch die Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes trägt in diesem Zusammenhang zweitrangig zum ökonomischen Erfolg einer Sanierung bei.

## 8.2 Ableitung kostenoptimaler Maßnahmen und Aufstellung des ganzheitlichen Konzepts

Die Ableitung kostenoptimaler Maßnahmen und die Aufstellung des ganzheitlichen Konzepts erfolgt in zwei Schritten. Der erste Schritt beinhaltet die Auslegung technischer Anlagen. Da die kostenoptimierte Qualität des baulichen Wärmeschutzes durch das Wärmeversorgungskonzept bestimmt wird, beinhaltet der zweite Schritt die Ableitung optimierter Maßnahmen an der thermischen Gebäudehülle.

### Schritt 1: Technische Anlagen

Eine Erfassung des Energieverbrauchs der unsanierten Gebäude ist zur Aufstellung des Sanierungskonzepts notwendig.

Aus dem Betrieb von bestehenden RLT-Anlagen resultiert ein durchschnittlicher Stromverbrauch von  $10 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Dieser Verbrauch ist gegenüber anderen technischen Systemen in Schulen, wie z.B. Beleuchtungsanlagen, als hoch einzustufen und bei der Konzeptionierung zu berücksichtigen.

Der Einsatz von Lüftungsanlagen zur Verbesserung des Innenraumkomforts und zur Steigerung der Leistungsfähigkeit von Schülern und Lehrern ist aufgrund hoher Belegungsdichten und luftdichter Gebäudehüllen nachdrücklich zu empfehlen. Dabei bietet sich die Hybridlüftung, eine Kombination aus mechanischer Grundlüftung ( $\dot{V}_A 18,8 \text{ m}^3/(\text{Person} \cdot \text{h})$ ; IDA IV nach DIN 13779 (vgl. [73] S. 59)) und einer natürlichen Stoßlüftung über die Fenster, an. Zur Umsetzung der natürlichen Belüftung der Räume sind ausreichende Öffnungsflächen in der Fassade vorzusehen. Gugerli et al. leiten in diesem Zusammenhang einzuplanende Öffnungsflächen ab, die in Abhängigkeit zu der Fensterhöhe und Außenlufttemperatur stehen (vgl. [96] S. 8 f.).

Die Belegungsdichte in Klassenräumen von allgemein- und berufsbildenden Schulen beträgt  $2,5 \text{ m}^2_{\text{NGF}}/\text{Person}$ . Bei einer durchschnittlichen Klassenraumfläche von  $65 \text{ m}^2$  ist eine Raumbelegung von 27 Personen inkl. Lehrer gegeben. Der erforderliche, natürliche Volumenstrom beträgt  $300 \text{ m}^3/(\text{Raum} \cdot \text{h})$ . Anhand eines maximal möglichen Volumenstroms über die Fenster der Klassenräume, ergibt sich im Winter eine erforderliche Lüftungsdauer von weniger als 15 min/h. Die Dauer kann durch größere Öffnungsflächen oder geringere Belegungsdichten, wie z.B. in Förderschulen, reduziert werden. Die Durchführung der natürlichen Lüftung in den Pausen vermeidet Luftzugerscheinungen und eine Auskühlung der Räume während des Unterrichts.

Aus der Verringerung des mechanischen Luftvolumenstroms kann bei dem beschriebenen Lüftungskonzept gegenüber der vollständigen mechanischen Belüftung der Räume eine Energieeinsparung von  $4 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$  erzielt werden. Der reduzierte Strombedarf und die verringerten Kapitalkosten kompensieren den erhöhten Wärmebedarf durch die Fensterlüftung. Der äquivalente Energiepreis der Wärmeeinsparung über die Wärmerückgewinnung beträgt durchschnittlich  $0,36 \text{ €/kWh}$ .

Durch geringe Betriebszeiten von Beleuchtungsanlagen in Schulen verringert sich der Strombedarf durch den Austausch der Anlagen von durchschnittlich  $4,3$  auf  $3,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Der äquivalente Energiepreis beträgt  $2 \text{ €/kWh}$ . Diese Maßnahmen stellen sich als unwirtschaftlich dar.

Die Wahl des Wärmeversorgungskonzepts hängt aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht vom zu erwartenden Stromverbrauch des sanierten Gebäudes ab, der je nach Schulform variiert.

In berufsbildenden Schulen und Förderschulen mit dem Lehrschwerpunkt „geistige Entwicklung“ ist ein höherer Stromverbrauch  $> 25 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$  zu erwarten. Dieser hohe Verbrauch ist durch den erhöhten Betreuungsaufwand der Förderschüler sowie der Zubereitung von Mahlzeiten mit Hilfe von Haushaltsgeräten (dezentrale Trinkwarmwasserbereitung) zu begründen. In den berufsbildenden Schulen trägt die nutzungsspezifische Ausstattung zu überdurchschnittlichen Verbräuchen bei.

Besonders in diesen Schulen eignen sich z.B. Luft/Wasser-Wärmepumpen ( $\text{JAZ} > 3$  [-]) in Kombination mit PV-Anlagen und Eigenstromnutzung. Neben der Luft eignen sich auch das Abwasser der anliegenden Kanalisation und das Erdreich als Wärmequelle. Diese Art der Wärmeversorgung weist durch das hohe Potenzial der Direktstromnutzung (DSN) ökonomische und ökologische Vorteile gegenüber anderen Wärmeversorgungskonzepten auf.

Schulgebäude weisen insgesamt ein hohes Potenzial der Eigenstromstromdeckung (ESD) beim Betrieb von Photovoltaikanlagen auf. Dieses hohe Potenzial resultiert aus der zeitlichen Überschneidung der schulischen Nutzungszeit und dem Zeitraum solarer Einstrahlung. Die kostenoptimale Dimensionierung der Anlagen stellt sich bei einer Eigenstromdeckungsrate von rund  $50 \%$  ein. Schuldächer weisen in der Regel nicht genügend Aufstellfläche auf, sodass eine ESD von nur  $40 \%$  erreicht werden kann oder weitere Flächen auf dem Grundstück zur Aufstellung genutzt werden sollten.

Der Stromgestehungspreis beläuft sich auf durchschnittlich  $9 \text{ ct/kWh}$ . Hierbei sind die Erlöse der Einspeisevergütung nach EEG (vgl. [44] Teil 3) inbegriffen. Bei einem aktuellen Strombezugspreis von  $> 20 \text{ ct/kWh}$  stellt sich diese Maßnahme als wirtschaftlich dar. Die Untersuchung

verfolgt darüber hinaus nicht den Einsatz von lokalen Batteriespeichern zur Effizienzsteigerung der PV-Anlagen.

In allgemeinbildenden Schulen und Förderschulen mit dem Lehrschwerpunkt „Lernen“ beträgt der Stromverbrauch generell weniger als  $25 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{kond.NGF}} \cdot \text{a})$ . Durch den niedrigeren Verbrauch liegt ein geringeres Potenzial der solarelektrischen Direktstromnutzung in diesen Schulen vor. Der Betrieb von Feststoffkesseln (Holz) stellt sich durch die geringeren Bauwerkskosten und einer primärenergetisch günstigen Wärmeversorgung ( $f_p = 0,2$  [-]) aus ökonomischer und ökologischer Sicht als Alternative dar.

Abbildung 177 zeigt die aus ökonomischer und ökologischer Betrachtung abgeleitete sinnvolle Reihenfolge der Maßnahmen für technische Anlagen (Schritt 1).

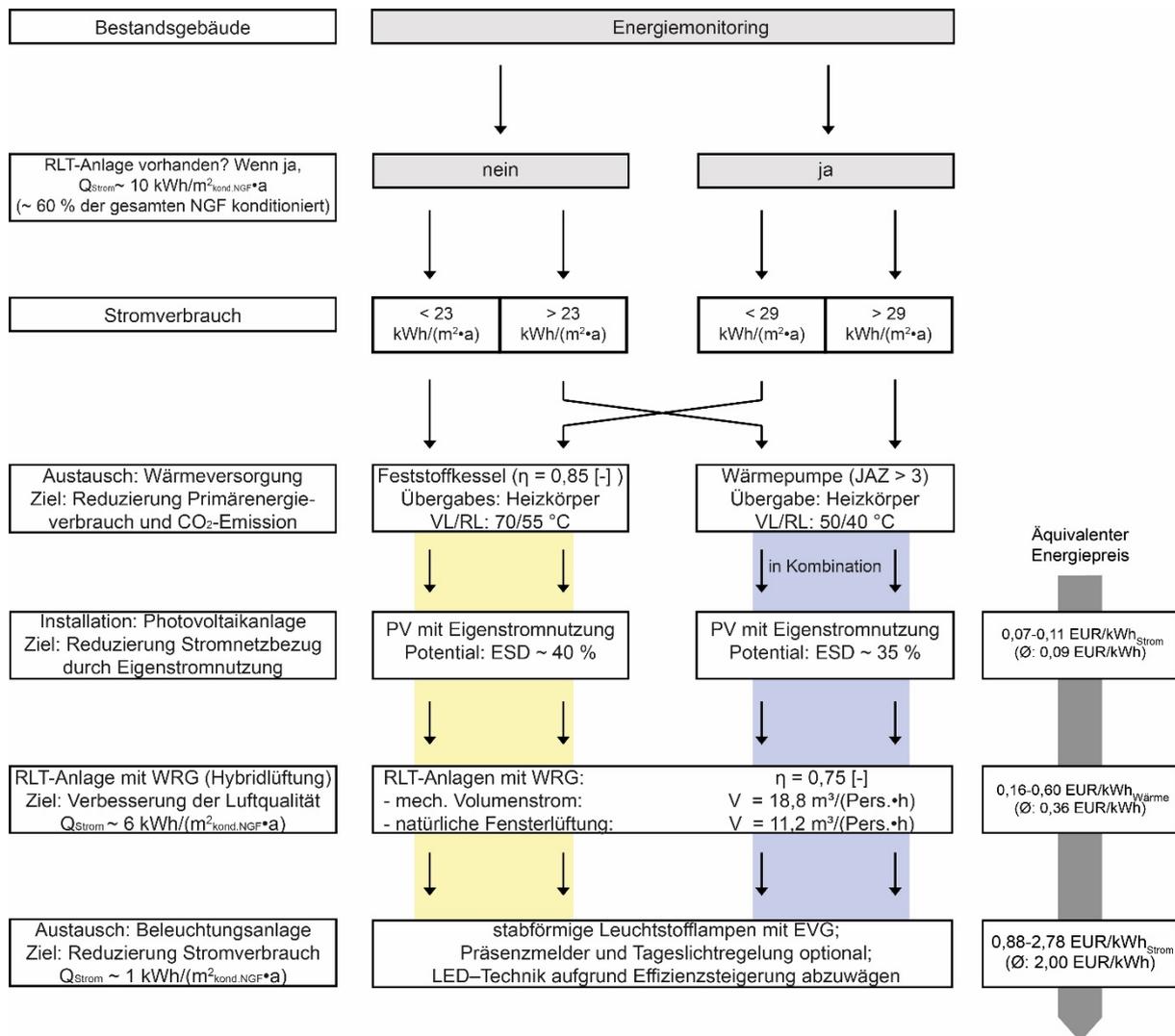


Abbildung 177 Schritt 1: Reihenfolge der Maßnahmen an technischen Anlagen

## **Schritt 2: Thermische Gebäudehülle**

Der zweite Schritt sieht die Sanierung einzelner Bauteile der thermischen Gebäudehülle vor. Da die energetische Bilanzierung nach EnEV 2014 [8] die Anlagentechnik berücksichtigt, beeinflusst die Wahl des Wärmeversorgungssystems die kostenoptimierte Qualität des baulichen Wärmeschutzes.

Als kostenoptimal stellt sich die Qualität des baulichen Wärmeschutzes heraus, die das Gleichgewicht aus reduziertem Wärmebedarf und Sanierungskosten bildet. Eine zu geringe Qualität des Wärmeschutzes führt zum erhöhten Wärmebedarf. Ein zu hoher Wärmeschutz stellt sich aufgrund überhöhter Sanierungskosten als unwirtschaftlich dar. Der aus der Ableitung optimierter Maßnahmen resultierende äquivalente Energiepreis definiert die aus ökonomischer Sicht sinnvolle Reihenfolge für zukünftige Umsetzungen.

Beim Betrieb von Wärmepumpen ist gegenüber dem Einsatz von Feststoffkesseln (Holz) eine geringere Qualität des baulichen Wärmeschutzes erforderlich.

Der Fensteraustausch weist einen äquivalenten Energiepreis von durchschnittlich 0,56 €/kWh auf und stellt sich als die wirtschaftlich ungünstigste Maßnahme an der Gebäudehülle heraus. Der Austausch ist jedoch nicht nur aus energetischer Sicht zu betrachten. Der Einbau neuer Verglasung reduziert die solaren Erträge im Sommer. Der luftdichte Verbund mit der Außenwand verringert die Gefahr von Luftzugerscheinungen in den Klassenräumen im Winter und trägt zur Sicherstellung eines guten thermischen Komforts bei. Mit der zusätzlichen Installation von außenliegenden Sonnenschutzsystemen werden solare Einstrahlungen reduziert und eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Schülern und Lehrern von rund 4 % nach Seppänen et al. (vgl. [38] S. 6ff.) erzielt.

Abbildung 178 zeigt die sinnvolle Reihenfolge der Maßnahmen an der thermischen Gebäudehülle. Die kostenoptimale Qualität des baulichen Wärmeschutzes ist differenziert nach Wärmeversorgungskonzept dargestellt (Schritt 2).

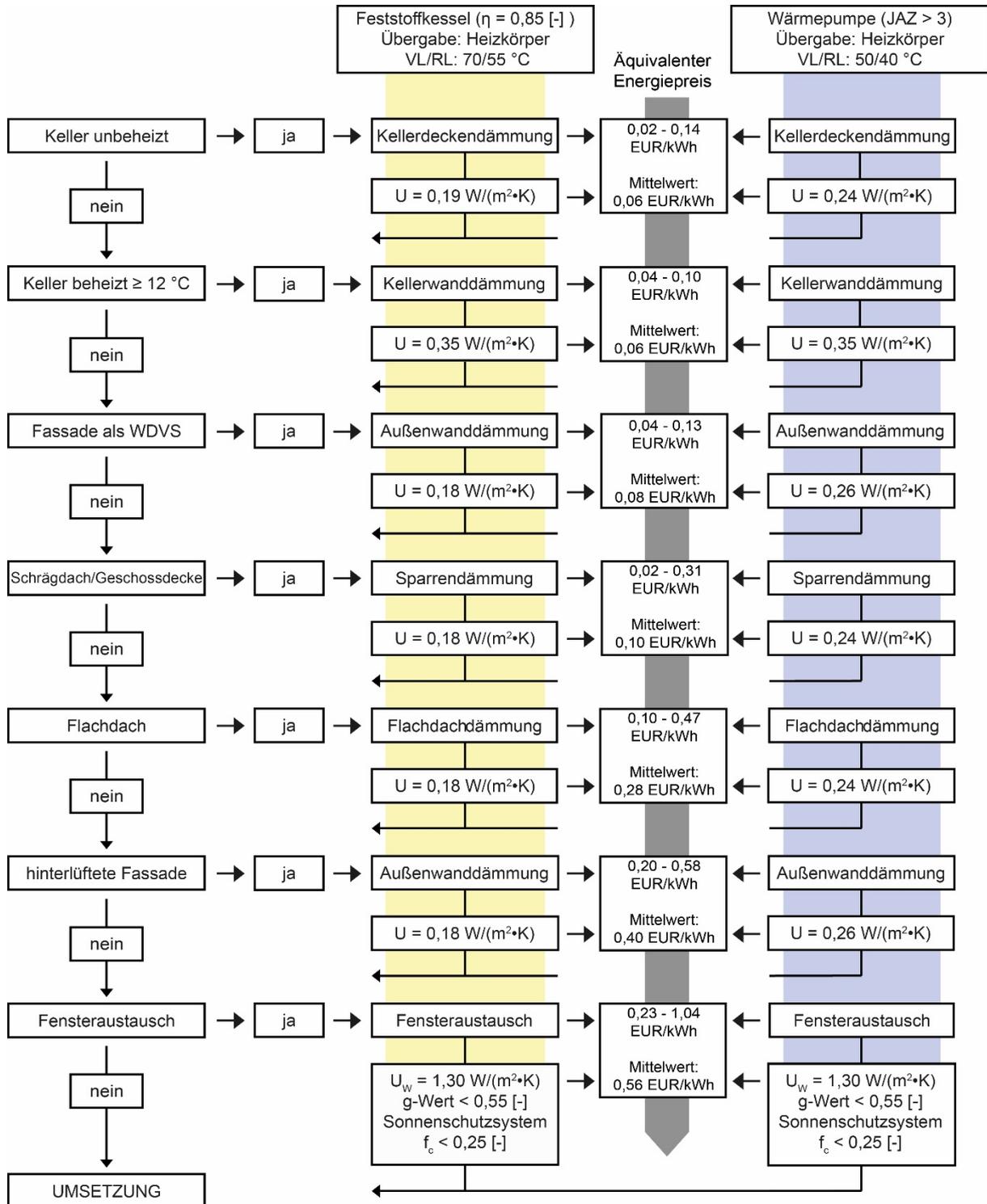


Abbildung 178 Schritt 2: Reihenfolge der Maßnahmen an der thermischen Gebäudehülle

Die EnEV 2014 [8] stellt für Nichtwohngebäude im Bilanzierungsverfahren Anforderungen an Höchstwerte der maximalen mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten ( $\bar{U}$ ) getrennt für opake und transparente Bauteile. Die Umsetzung der kostenoptimalen Maßnahmen hält diese Anforderungen der EnEV ein.

### 8.3 Beispielhafte Anwendung des Sanierungskonzepts

Die Zusammenführung der kostenoptimierten Einzelmaßnahmen zu einem Sanierungskonzept zeigt gegenüber den evaluierten Schulen Vorteile im Hinblick auf Baukosten, Energieeffizienz, Wirtschaftlichkeit und Innenraumkomfort auf:

#### **Baukosten**

Die Bauwerkskosten belaufen sich auf rund  $700 \text{ €/m}^2_{\text{NGF}}$ . Der energetisch relevante Anteil beträgt  $410 \text{ €/m}^2_{\text{NGF}}$ . Durch die Zusammenführung der entwickelten Maßnahmen an der Gebäudehülle kann eine Reduzierung der Bauwerkskosten von  $60 \text{ €/m}^2_{\text{kond.NGF}}$  erzielt werden. Die Fenster weisen hierbei das größte Potenzial der Kosteneinsparung auf. Die Umsetzung des Belüftungskonzepts als dezentrale Hybridlüftung bietet gegenüber der zentralen Lösung ein weiteres Einsparpotenzial von  $50 \text{ €/m}^2_{\text{kond.RLT}}$ . Die reduzierten Bauwerkskosten resultieren aus dem minimierten Luftvolumenstrom der Anlage sowie den reduzierten Längen der Lüftungskanäle. Das dezentrale Lüftungskonzept unterliegt geringeren Brandschutzanforderungen. Unterschiedliche Beleuchtungssysteme (Kompaktleuchtstofflampen/LED) zeigen im Hinblick auf die Bauwerkskosten keine signifikanten Einsparpotenziale auf.

Die optimierten Maßnahmen bewirken eine Reduzierung der Bauwerkskosten und ermöglichen die technologische Einbindung regenerativer Energien in die Wärmeversorgungs-konzepte der Gebäude. Die Baukosten der evaluierten Sanierungen stellen sich in diesem Zusammenhang als Kostendeckel dar.

Eine Überschreitung dieses Deckels ist mit der Installation von PV-Anlagen und der Umsetzung der Eigenstromnutzung möglich. Die Nutzung des solarelektrischen Stroms trägt zur Reduzierung des Netzbezugs bei. Die reduzierten Energiekosten kompensieren die erhöhten Bauwerkskosten und führen zur Verringerung der Jahresgesamtkosten gegenüber den evaluierten Maßnahmen in einem späteren Bewertungsschritt.

#### **Energie**

Die Kombination dieser Maßnahmen führt zu einer vermehrten Nutzung erneuerbarer Energien für die Wärme- und Strombereitstellung in den Schulgebäuden. Die Einbindung regenerativer Energien führt zu einer weiteren Reduzierung des Primärenergiebedarfs auf

35 kWh/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a) und der CO<sub>2</sub>-Emission auf 8 kg/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a). Durch diese Effizienzsteigerung halbieren sich die äquivalenten Kosten zur Substituierung des Primärenergiebedarfs auf < 0,20 €/kWh<sub>PE</sub>•a) und zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf < 700 €/(t<sub>CO2</sub>•a).

Aus der Kombination der kostenoptimierten Maßnahmen an der thermischen Gebäudehülle ist beim Betrieb von Feststoffkesseln ein Endenergiebedarf (Heizen) von 60 kWh/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a) festzustellen. Beim Einsatz von elektrisch betriebenen Luft/Wasser-Wärmepumpen resultiert ein Strombedarf von 18 kWh/(m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a).

Die Verringerung des mechanisch geförderten Außenluftvolumenstroms der Lüftungsanlagen auf 18,8 m<sup>3</sup>/(Person•h) (Hybridlüftung) sowie die Einbindung der Photovoltaikanlage mit Eigenstromnutzung kann den Stromnetzbezug um > 6 kWh/(m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>•a) reduzieren.

### **Wirtschaftlichkeit**

Die evaluierten Schulsanierungen zeigen im Mittel eine Erhöhung der Jahresgesamtkosten von 12 €/m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a) auf. Mit Anwendung des entwickelten Sanierungskonzepts entsteht trotz erhöhtem Wärmebedarf eine Verringerung der Jahresgesamtkosten von 31 auf 28 €/m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a). Die Differenz von 3 €/m<sup>2</sup><sub>kond.NGF</sub>•a) resultiert aus der Substituierung des Stromnetzbezugs, die zur Reduzierung der Energiekosten um 20 % führt. Höhere Jahresgesamtkosten können mit der Anwendung des Konzepts gegenüber den evaluierten Sanierungen vermieden werden.

Um eine Erhöhung der Jahresgesamtkosten durch die Sanierung zu vermeiden und eine Kostenneutralität zu erzielen, ist eine finanzielle Förderung nötig. Die notwendige Quote der evaluierten Sanierungen beträgt bei einem konstanten Energiepreis rund 70 %. Die Umsetzungen der abgeleiteten Maßnahmen zeigen einen Förderanteil von 76 % auf und stellen sich als ökonomisch schlechter dar.

Durch steigende Energiepreise ist die Kostenneutralität bei der Umsetzung des abgeleiteten Sanierungskonzepts mit geringeren Förderquoten zu erzielen. Bei einer jährlichen Erhöhung der Wärme- und Strompreise um z.B. 7,5 %/a ist eine notwendige Förderquote bei einer Umsetzung der optimierten Maßnahmen von rund 30 % erforderlich. Die evaluierten Maßnahmen aus der Feldstudie erzielen erst ab einer Förderquote von 40 % die Kostenneutralität. Die Kombination der abgeleiteten Maßnahmen weist somit einen ökonomischen Vorteil auf.

### **Komfort**

Die Sicherstellung des nach DIN V 18599 (vgl. [23] Teil 10) geforderten Außenluftvolumenstroms von 30 m<sup>3</sup>/(Person•h) führt zu einer besseren Luftqualität in den Klassenräumen. Die korrekte Umsetzung und der Betrieb der Hybridlüftung verringert die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft auf rund 1.000 ppm. Diese Luftqualität trägt zu einer Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Schüler und Lehrer um über 5 % nach Wargocki (vgl. [13] 4 ff.) bei. Eine nutzergerechte

Anleitung zur Fensterlüftung durch die Gebäudenutzer ist nach König (vgl. [14] S. 154 ff.) zu empfehlen.

Die Installation von außenliegenden, beweglichen Sonnenschutzsystemen verringert das Potenzial der sommerlichen Überhitzung von Klassenräumen. Eine Leistungssteigerung von rund 4 % nach Seppänen et al. (vgl. [38] S. 6ff.) kann durch die Verbesserung des thermischen Komforts erzielt werden. Die Verglasungsart der Fenster trägt in diesem Zusammenhang nur sekundär zu einem guten Komfort bei. Gegenüber der 3-fach-Wärmeschutzverglasung sind beim Einbau einer 2-fach-Verglasung in Kombination mit einem außenliegenden Sonnenschutz keine Nachteile zu verzeichnen.

## 8.4 Ausblick

Die Vorgaben der Bundesregierung fordern verschärft die Einhaltung der angestrebten Sanierungsquote öffentlicher Gebäude. Zukünftig können mit der Umsetzung der kostenoptimierten Maßnahmen gezielte Investitionen in den sanierungsbedürftigen Gebäudebestand der 18.000 Bildungsstätten (vgl. [9] S. 37 f.) getätigt werden.

Die Umsetzung der entwickelten Maßnahmen vermeidet Fehlinvestitionen und entlastet gleichzeitig kommunale Haushaltskassen. Planern und Ausführenden bietet sich mit dem Ergebnis dieser Arbeit eine einheitliche Grundlage, die zu einer Verkürzung der Planungszeiten führen kann.

Die Zusammenführung der kostenoptimalen Maßnahmen zu einem integralen Konzept unterstützt die Forderung der Richtlinie 2010/31/EU [15] an die Definition des „nearly zero energy building“ für zukünftige Schulsanierungen. Die Übertragung der Maßnahmen auf die Schullandschaft leistet zukünftig einen größeren Beitrag, die klimapolitischen Ziele bis 2050 [1], [2], [3] zu erreichen.

Bereits heute ist eine Übererfüllung der Klimaschutzziele bis 2050 [1], [2], [3] innerhalb der Bilanzgrenze des sanierten Gebäudes möglich. Für zukünftige Schulsanierungen empfiehlt sich die Entwicklung und Einführung des Sanierungsstandards „**Klimaschutzschule**“. Ausgehend vom unsanierten Zustand des Gebäudes bilden die Klimaschutzziele die einzuhaltenden Anforderungswerte dieses Standards. Das Grundstück des Gebäudes bildet hierbei die Bilanzgrenze.

Tabelle 44 zeigt die Anforderungswerte, die zum Erreichen der einzelnen Auszeichnungsgrade erforderlich sind.

**Tabelle 44** Anforderungen unterschiedlicher Auszeichnungsgrade gegenüber dem unsanierten Zustand

<b>Erfüllungsgrad</b>	<b>Klimaschutzschule 2020</b>	<b>Klimaschutzschule 2030</b>	<b>Klimaschutzschule 2040</b>	<b>Klimaschutzschule 2050</b>
<b>Reduzierung des Primärenergieverbrauchs</b>	20 %	30 %	40 %	50 %
<b>Reduzierung der Treibhausgasemission</b>	40 %	55 %	70 %	80 %
<b>Reduzierung des Stromverbrauchs</b>	10 %	15 %	20 %	25 %
<b>anteilige Einbindung erneuerbarer Energien</b>	18 %	30 %	45 %	60 %

Zusätzlich stellt dieser Standard gegenüber der EnEV 2014 [8], dem KfW-Effizienzhaus [39] oder dem Passivhaus (vgl. [51] S. 5 ff.) erstmals Anforderungen an eine maximale Qualität des baulichen Wärmeschutzes sowie an die Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen. Zudem findet das bisher vernachlässigte Thema des Innenraumkomforts innerhalb des Konzepts Berücksichtigung. Der entwickelte Standard leistet eine Verbesserung der Lernumwelt, die zu Leistungssteigerungen von Schülern führt. Diese Verbesserung der Lernleistung ist als volkswirtschaftlicher Mehrwert der Zukunft anzusehen.

Ein zukünftiger Forschungsbedarf besteht für die Umsetzung des entwickelten Konzepts an bestehenden Bildungsstätten. Die Überwachung des Gebäudebetriebs nach der Sanierung führt zur Validierung der Ergebnisse dieser Arbeit und trägt zur Qualitätssicherung im Hinblick auf Energie und Innenraumkomfort bei. Zudem weist die technische Umsetzung zur lokalen Speicherung und Nutzung des PV-Stroms einen weiteren Forschungsbedarf auf, um den Netzbezug weiter zu substituieren und eine Effizienzsteigerung des entwickelten Sanierungskonzepts für Bildungsstätten zu erzielen.

## 9 VERÖFFENTLICHUNGEN UND VORTRÄGE

Diedrich, Arne: „Methodik zur Erfolgskontrolle der Sanierung von Bildungsstätten“, Exposé (Zwischenstand der Arbeit) auf dem Stipendiatentag der Reiner Lemoine - Stiftung, Berlin, 17. September 2011.

Diedrich, Arne: „Methodik zur Erfolgskontrolle der Sanierung von Bildungsstätten“, Poster (Zwischenstand der Arbeit) auf dem Stipendiatentag der Reiner Lemoine - Stiftung, Berlin, 17. September 2011.

Diedrich, Arne: „Methodik zur Erfolgskontrolle der Sanierung von Bildungsstätten“, Exposé (Zwischenstand der Arbeit) auf dem Stipendiatentag der Reiner Lemoine - Stiftung, Berlin, 27. Oktober 2012.

Diedrich, Arne: „Methodik zur Erfolgskontrolle der Sanierung von Bildungsstätten“, Poster (Zwischenstand der Arbeit) auf dem Stipendiatentag der Reiner Lemoine - Stiftung, Berlin, 27. Oktober 2012.

Diedrich, Arne: „Energetische Sanierung von Bildungsstätten – Energie, Ökonomie und Komfort im Fokus“, Vortrag auf der 16. Fachtagung „Gebäude energetisch optimieren“, Eckernförde, 22. März 2013.

Diedrich, Arne: „Energetische Sanierung von Bildungsstätten – Energie, Ökonomie und Komfort im Fokus“, Paper auf der 16. Fachtagung „Gebäude energetisch optimieren“, Eckernförde, 22. März 2013.

Diedrich, Arne: „Energetische Sanierung von Bildungsstätten – Entwicklung von energetisch und wirtschaftlich optimierten Sanierungsstandards“, Vortrag, Hannover, 29. April 2014.

## 10 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: „Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“, 28. September 2010 [Online]. Available: [http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energiekonzept\\_bundesregierung.pdf](http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energiekonzept_bundesregierung.pdf) [Zugriff am 05. Dezember 2013].
- [2] Die Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland: 05. Dezember 2007 [Online]. Available: <http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Archiv16/Artikel/2007/12/Anlagen/2007-12-05-integriertes-energie-und-klimaprogramm.html> [Zugriff am 04. Dezember 2013].
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: 01. Oktober 2011 [Online]. Available: <http://www.bmu.de/themen/klima-energie/energie/wende/beschluesse-und-massnahmen/> [Zugriff am 20. September 2013].
- [4] M. Hegger, M. Fuchs, T. Stark und M. Zeumer: „Energie Atlas – Nachhaltige Architektur“, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, München, 2007.
- [5] „Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung EnEV)“, Bundesgesetzblatt (BGBl) Teil I Nr. 59 vom 21. November 2001, Seiten 3085 ff., Berlin, 16. November 2001.
- [6] „Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV)“, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2007 Teil 1 Nr. 34, Bonn, 24. Juli 2007.
- [7] „Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV)“ (nichtamtliche Lesefassung), Berlin, 2009.
- [8] „Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV)“ (nichtamtliche Lesefassung), Berlin, 01. Mai 2014.
- [9] E. von Hebel, K. Jahn und K.-D. Clausnitzer: „Der energetische Sanierungsbedarf und der Neubaubedarf von Gebäuden der kommunalen und sozialen Infrastruktur – Abschlussbericht“, Bremen, November 2011.
- [10] „Gesetz zur Umsetzung von Zukunftsinvestitionen der Kommunen und Länder (Zukunftsinvestitionsgesetz – ZuInvG)“, Berlin, März 2009.
- [11] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) e.V.: „VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenberechnung“, Düsseldorf, Beuth Verlag GmbH Berlin, September 2010.
- [12] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) e.V.: „VDI 6040: Raumluftechnik Schulen Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln, VDI-Schulbaurichtlinien)“, Düsseldorf, Beuth Verlag GmbH Berlin, Juni 2011.
- [13] P. Wargocki: „Improving indoor air quality improves the performance of office work and schoolwork“, Vortrag und Paper on 8th International Conference for Enhanced Building Operations – ICEBO'08, Berlin, 2008.
- [14] J. König: „Dissertation: Lüftungskonzepte in Bildungsstätten – Einfluss der Luftqualität auf die Leistungsfähigkeit von Schülern“, Braunschweig, 2015.
- [15] „Richtlinie 2010/31/EU des europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung)“, Straßburg, 19. Mai 2010.
- [16] British Petroleum p.l.c.: „www.bp.com – BP Statistical Review of World Energy“, Juni 2015 [Online]. Available: <http://www.bp.com/statisticalreview>. [Zugriff am 01. Oktober 2015].

- [17] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: „Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren – Deutschland (Zahlen und Fakten Energiedaten – Nationale und internationale Entwicklung)“. Primärquelle: Internationale Energie Agentur: „Coal Information 2014“, 27. August 2014 [Online]. Available: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/energiedaten.html> [Zugriff am 01. Oktober 2015].
- [18] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: „Erneuerbare Energien – Deutschland (Zahlen und Fakten Energiedaten – Nationale und internationale Entwicklung). Primärquelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, Stand: Dezember 2014, 10. März 2015 [Online]. Available: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/energiedaten.html>. [Zugriff am 01. Oktober 2015].
- [19] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: „Erneuerbare Energien – Deutschland (Zahlen und Fakten Energiedaten – Nationale und internationale Entwicklung). Primärquelle: „Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien – Statistik (2015)“ Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, Arbeitsgruppe „Erneuerbare Energien – Statistik“, 11. März 2015 [Online]. Available: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/energiedaten.html>. [Zugriff am 01. Oktober 2015].
- [20] M. Reidenbach et al.: „Investitionsrückstand und Investitionsbedarf der Kommunen – Ausmaß, Ursachen, Folgen und Strategien“, Deutsches Institut für Urbanistik (DIFU), Berlin, 2008.
- [21] Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN 4108-2:1952-06: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz“, Beuth Verlag GmbH Berlin und Köln, Juni 1952.
- [22] „Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung – WärmeschutzV)“, Bonn, 11. August 1977.
- [23] Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN V 18599:2011-12: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 2011.
- [24] M. Luley: „Erziehungskonzeptionen und Praxis – Band 47 – Eine kleine Geschichte des deutschen Schulbaus - Vom späten 18. Jahrhundert bis zur Gegenwart“, Peter Lang – Europäischer Verlag der Wissenschaften, Frankfurt am Main, 2000.
- [25] B. A. Blanck: „Zur Schul- und Schulbauentwicklung im 19. und 20. Jahrhundert: Die Schulbauentwicklung zwischen politisch-ökonomischen, erziehungs-ideologischen Bindungen und pädagogisch-emanzipatorischen Elementen; eine sozioökonomisch orientierte Untersuchung typischer Nutzungs- und Gestaltungskonstellationen im historischen und gegenwärtigen Schulbau – Dissertation“, TU Berlin, Berlin, 1979.
- [26] K. H. Günther: „Quellen zur Geschichte der Erziehung“, 6. Auflage, Volk und Wissen volkseigener Verlag, Ost-Berlin, 1971.
- [27] J. A. Comesnius: „Didacta Magna“, übersetzt und herausgegeben von W. Vorbrodt, Verlag der Dürr'schen Buchhandlung, Leipzig, 1906.
- [28] C. G. Salzmann: „Noch etwas über die Erziehung“, Klöne & Meyer, Berlin, 1869, bearbeitet und erweitert von Karl Richter, 2. verbesserte Auflage.
- [29] O. u. W. Meyer-Bohe: „Neue Schulen“, Verlag Ernst Wasmuth, Tübingen, 1974.
- [30] B. Otto: „Die Zukunftsschule: Lehrgang u. Einrichtungen“, 3. Auflage, Verlag des Hauslehrers, Berlin - Lichterfelde, 1928.
- [31] P. Perlick: „Architektur im Dienste der Pädagogik: Ein Beitrag zur Planung von Grund- und Hauptschulen sowie verwandten Systemen“, Aloys Henn Verlag KG, Ratingen, 1969.
- [32] A. Lederer, A. Pieper, R. Kötz et.al.: „Schulen in Deutschland – Neubau und Revitalisierung“, Wüstenroth Stiftung, Karl Krämer Verlag, Stuttgart, 2004.
- [33] C. Rittelmeyer: „Zur pädagogischen Bedeutung der Schularchitektur. In: Baumeister 83/1986“, 1994.

- [34] H. Scharoun: „Raum und Mileu der Schule“, IN: Bauen und Wohnen, Heft 8: „Lebendige Schule“, Band 15, 1961.
- [35] K. Otto: „Schulbau – Beispiele und Entwicklungen“, Verlagsanstalt Alexander Koch GmbH, 2. durchgesehene Auflage, Stuttgart, 1963.
- [36] E. Gluch und L. Hornuf: „Europäischer Nichtwohnhochbau weiterhin auf Expansionskurs“, *ifo-Schnelldienst*, Band H.5, 2006.
- [37] Umweltbundesamt – Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes: „Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden“, Dessau-Roßlau, KOMAG mbH, Berlin, 2008.
- [38] O. Seppänen, W. J. Fisk und Q. Lei: „Effect of temperature on task performance in office environment“, Helsinki University of Technology, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2006.
- [39] Kreditanstalt für Wiederaufbau: „Neue Förderstandards für Energieeffizientes Bauen und Sanieren ab 01.10.2009“, 07. August 2009 [Online]. Available: [https://www.kfw.de/KfW-Konzern/Newsroom/Aktuelles/Pressemitteilungen/Pressemitteilungen-Details\\_10393.html](https://www.kfw.de/KfW-Konzern/Newsroom/Aktuelles/Pressemitteilungen/Pressemitteilungen-Details_10393.html). [Zugriff am 13. Oktober 2015].
- [40] „Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden (Energieeinsparungsgesetz – EnEG)“, Bonn, 22. Juli 1976.
- [41] „Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung – WärmeschutzV)“, Bonn, 24. Februar 1982.
- [42] „Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung – WärmeschutzV)“, Bonn, 16. August 1994.
- [43] „Richtlinie 2002/91/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden“, Brüssel, 16. Dezember 2002.
- [44] „Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG)“, Berlin, 25. Oktober 2008.
- [45] „Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-WärmeGesetz – EEWärmeG)“, Berlin, 07. August 2008.
- [46] H. Kluttig, A. Dirscherl und H. Erhorn: „Energieverbräuche von Bildungsstätten in Deutschland“, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart.
- [47] Fraunhofer-Institut für Bauphysik: „<http://www.eneff-schule.de>“ 2013 [Online]. Available: <http://www.eneff-schule.de/> [Zugriff am 24. Mai 2016].
- [48] Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN 4108-2:2013-02: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz“, Beuth Verlag GmbH Berlin, Februar 2013.
- [49] Fraunhofer-Institut für Bauphysik: „BMW i – Begleitforschung Energieeffiziente Schulen (EnEff:Schulen)“ 2013 [Online]. Available: <http://www.eneff-schule.de/> [Zugriff am 12. Oktober 2015].
- [50] H. Recknagel, E. Sprenger und E.-R. Schramek: „Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik“, 73. Auflage, Dortmund, Oldenbourg Industrieverlag München, 2007.
- [51] Passivhaus Institut: „Kriterien für den Passivhaus-, EnerPHit- und PHI-Energiesparhaus-Standard (Version 9f)“, Darmstadt, 2016.
- [52] Fraunhofer-Institut für Bauphysik: „Wege zum Effizienzhaus Plus“, 3.Auflage, im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Berlin, Juni 2014.
- [53] M. N. Fisch, T. Wilken, C. Stähr: „EnergiePLUS: Gebäude und Quartiere als erneuerbare Energiequellen“, Leonberg, 2012.
- [54] T. Schoch: „EnEV 2009 und DIN V 18599 Nichtwohnungsbau – Kompaktdarstellung, Kommentar, Praxisbeispiele – 2. Auflage“, Neumünster, Bauwerk Verlag GmbH Berlin, Mai 2009.

- [55] GEMIS: „CO<sub>2</sub>-Äquivalente einzelner Energieträger“, Version 4.5, 2009.
- [56] B. Oschatz: „Erarbeitung eines Leitfadens zum Abgleich Energiebedarf – Energieverbrauch – Abschlussbericht“, Fraunhofer IRB Verlag, Fraunhofer- Informationszentrum Raum und Bau, Stuttgart, 2009.
- [57] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: „Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohnungsbau“, Berlin, 30. Juli 2009.
- [58] „Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden (Energieeinsparungsgesetz – EnEG)“, Berlin, 04. Juli 2013.
- [59] C. Uske: „EnEV 2009 – Anforderungen und Lösungen für Konstruktionen, Bauteile und technische Anlagen“, Forum Verlag Herkert GmbH, München, September 2012.
- [60] W. Pistohl: „Handbuch der Gebäudetechnik, Band 2“, Werner Verlag (Wolters Kluwer Deutschland GmbH), Köln, 2009.
- [61] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) e.V.: „VDI 6025: Betriebswirtschaftliche Berechnung für Investitionsgüter und Anlagen“, Düsseldorf, Beuth Verlag GmbH, Berlin, November 1996.
- [62] Stadt Frankfurt am Main – Energierreferat – Die kommunale Klimaschutzagentur: „Passivhäuser: Die wirklichen Kosten – Kostenvergleich Passivhaus – Standardhaus nach aktuell gültigen Vorschriften“, Frankfurt, 2010.
- [63] Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN 276-1:2008-01: Kosten im Bauwesen – Teil 1: Hochbau“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Januar 2016.
- [64] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin – baua: „Technische Regeln für Arbeitsstätten (ASR): Lüftung A3.6“, Dortmund, Januar 2012.
- [65] Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN 1946-2:1994-01: Raumluftechnik; Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln)“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Januar 1994.
- [66] S. Plesser und M. N. Fisch: „Demonstrationsprojekt Neues Regionshaus Hannover: Energieoptimiertes Bauen in Public-Private-Partnerships (Abschlussbericht)“, Braunschweig, 2010.
- [67] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin – baua: „Technische Regeln für Arbeitsstätten (ASR): Raumtemperatur A3.5“, Dortmund, Juni 2010.
- [68] Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN EN 15251:2007-08: Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumlufqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, August 2007.
- [69] Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN EN ISO 7730:2006-05: Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 2006.
- [70] Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN 4108-3:2012-01: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Januar 2012.
- [71] B. W. Olesen: „Indoor Environment – Health-Comfort and Productivity“, International Center for Indoor Environment and Energy, Technical University of Denmark.
- [72] M. Pettenkofer: „Über den Luftwechsel in Wohngebäuden“, Literarisch-Aristische Anstalt der J. G. Cotta'schen Buchhandlung, München, 1858.
- [73] Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN EN 13779:2007-09: Lüftung in Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlssysteme; Deutsche Fassung EN 13779:2007“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, September 2007.
- [74] Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN 277:2005-02: Grundflächen und Rauminhalte von Bauwerken im Hochbau“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Februar 2005.

- [75] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin – baua: „Technische Regeln für Arbeitsstätten (ASR): Sichtverbindung nach außen ASR 7/1“, Dortmund, April 1976.
- [76] Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN EN ISO 6946:2008-04; Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren (ISO 6946: 2007)“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, April 2008.
- [77] Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN EN ISO 13370:2008-04: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Wärmeübertragung über das Erdreich – Berechnungsverfahren (ISO 13370: 2007)“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, April 2008.
- [78] Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN 4108-2:1960-05: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz“, Beuth Verlag GmbH, Berlin und Köln, Mai 1960.
- [79] Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN 4108-2:1969-08: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz“, Beuth Verlag GmbH, Berlin und Köln, August 1969.
- [80] Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN 4108-2:1981-08: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, August 1981.
- [81] Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN EN ISO 10456:2010-05: Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte: Deutsche Fassung EN 10456:2007 + AC:2009“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 2010.
- [82] Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN V 4108-4:2017-05: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, März 2017.
- [83] Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN EN ISO 10077:2010-05: Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 2010.
- [84] Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN 4108-7:2011-01: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden – Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Januar 2011.
- [85] Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN V 4701-10:2003-08 Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen – Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, August 2003.
- [86] Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN EN 12831:2003-08: Heizungsanlagen in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Normheizlast – Deutsche Fassung EN 12831:2003“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, August 2003.
- [87] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: „Leitfaden Nachhaltiges Bauen: Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)“, Berlin, 03. November 2011.
- [88] Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN EN ISO 10551:2002-01: Ergonomie des Umgebungsklimas – Beurteilung des Einflusses des Umgebungsklimas unter Anwendung subjektiver Bewertungsskalen (ISO 10551:1995)“, Beuth Verlag GmbH Berlin, Januar 2002.
- [89] R. Ahnert und K.-H. Krause: „Typische Baukonstruktionen von 1880 bis 1960 zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz - Band 3“, Verlag Bauwesen, 6. Auflage Berlin, 2002.
- [90] G. Giebeler, R. Fisch, H. Krause, K.-H. Petzinka, F. Musso und A. Rudolphi: „Atlas Sanierung – Instandhaltung, Umbau, Ergänzung – Edition DETAIL“, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, München, 2008.
- [91] B. Haas: „Zur Deckung flacher Dächer“ in: „Deutsche Bauhütte“, 1900.
- [92] G. Schönermark und W. Stüber: „Hochbau-Lexikon“, Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin, 1903 / 1904.

- [93] R. Ahnert und K.-H. Krause: „Typische Baukonstruktionen von 1880 bis 1960 zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz; Gründungen, Wände, Decken, Dachtragwerke - Band 1“, Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin, 1996.
- [94] Stadt Aachen – Gebäudemanagement – Energiemanagement: „Energiekennzahlenbericht – Schulen 2007“, Aachen, Juli 2008.
- [95] D. Hennings: „LEE – Leitfaden Elektrische Energie im Hochbau“, Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt, Juli 2000.
- [96] H. Gugerli, H. Huber und A. Weber: „Schulhäuser – Wieviel Luft braucht das Hirn“, Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, Hochschule für Technik und Architektur, Luzern (HTA), Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA).

## 11 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<b>Abbildung 1</b>	Weltweiter Endenergieverbrauch und CO <sub>2</sub> -Emission [16].....	1
<b>Abbildung 2</b>	Prozentuale Verteilung des weltweiten Primärenergieverbrauchs (Stand: 2014) [16] .....	2
<b>Abbildung 3</b>	Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland (Stand: 2014) [19].....	3
<b>Abbildung 4</b>	Ziele der deutschen Energie- und Klimapolitik nach [1], [2] und [3].....	4
<b>Abbildung 5</b>	Anzahl der Gebäude in „sozialer und kommunaler Infrastruktur“ [9] .....	4
<b>Abbildung 6</b>	Bruttogrundfläche (BGF) aller Gebäude in „sozialer und kommunaler Infrastruktur“ [9] .....	4
<b>Abbildung 7</b>	Aufschlüsselung des Investitionsbedarfs in Bildungsstätten von 2006 bis 2020 [20].....	15
<b>Abbildung 8</b>	Primärenergiefaktoren [23] und CO <sub>2</sub> -Äquivalente [55] unterschiedlicher Energieträger .....	24
<b>Abbildung 9</b>	Abgleich von energetischen Bedarfs- und Verbrauchswerten von Nichtwohngebäuden .....	
	(eigene Darstellung) (links Wärme, rechts Strom) .....	25
<b>Abbildung 10</b>	Aufteilung der Schulgebäude nach Baujahr und Schulform .....	42
<b>Abbildung 11</b>	Aufteilung der Grundflächen nach DIN 277 [74] .....	43
<b>Abbildung 12</b>	Auszug aus der Aufstellung der Kostengruppen erster Ebene nach DIN 276 [63] .....	52
<b>Abbildung 13</b>	Zweipolige Skala zur Bewertung des unsanierten Zustands (am Beispiel des thermischen Komforts) .....	
	nach DIN EN ISO 10551 [88] .....	55
<b>Abbildung 14</b>	Verteilung des $A_{FE}/A_{NGF}$ -Verhältnis in den untersuchten Klassenräumen.....	62
<b>Abbildung 15</b>	Prozentuale Verteilung der Bauteile .....	64
<b>Abbildung 16</b>	Schematische Darstellung der Gebäude in Schnitt und Ansicht getrennt nach Baualtersklasse .....	64
<b>Abbildung 17</b>	Wärmedurchgangskoeffizienten der Dächer und obersten Geschossdecken .....	66
<b>Abbildung 18</b>	Wärmedurchgangskoeffizienten der Kellerböden und Kellerdecken .....	67
<b>Abbildung 19</b>	Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenwände .....	69
<b>Abbildung 20</b>	Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U_W$ -Wert) der Fenster .....	70
<b>Abbildung 21</b>	Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes einzelner Bauteile nach Altersklassen .....	71
<b>Abbildung 22</b>	Einfluss der Wärmeverluste auf die Bedarfsentwicklung (Endenergie = 100 %) nach DIN V 18599 [23].....	73
<b>Abbildung 23</b>	Spezifischer Norm-Transmissionswärmeverlust ( $\Phi_T$ ) über die Gebäudehülle nach DIN EN 12831 [86] .....	75
<b>Abbildung 24</b>	Norm-Lüftungswärmeverluste ( $\Phi_{ml}$ ) nach DIN EN 12831 [86].....	76
<b>Abbildung 25</b>	Norm-Lüftungswärmeverluste ( $\Phi_{min}$ ) nach DIN EN 12831 [86] .....	76
<b>Abbildung 26</b>	Ermittlung der spezifischen und absoluten Norm-Heizlast ( $\Phi_{HL}$ ) nach DIN EN 12831 [86].....	76
<b>Abbildung 27</b>	Vergleich der Bewertungsleistung ( $\rho$ ) mit der Beleuchtungsleistung ( $p$ ).....	77
<b>Abbildung 28</b>	Endenergieverbrauch (Heizen) in Abhängigkeit des $A/V_e$ -Verhältnisses.....	79
<b>Abbildung 29</b>	Vergleich der witterungs bereinigten Endenergieverbräuche (Heizen) mit den Verbrauchswerten.....	
	der Referenzgebäude [94] sowie den EnEV-Kennwerten [57] .....	80
<b>Abbildung 30</b>	Stromverbrauch der Bildungsstätten im Vergleich mit den Referenzgebäuden der Stadt Aachen [94].....	
	sowie den Vergleichswerten [57].....	81
<b>Abbildung 31</b>	Auswirkung der Energieträger auf den Primärenergieverbrauch ( $Q_p$ ) sowie die CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	82
<b>Abbildung 32</b>	Bewertung der Lufttemperatur in den Innenräumen ( $\theta_{i,ar}$ ) der Bildungsstätten .....	
	(Anzahl der befragten Lehrer: n = 287) .....	83
<b>Abbildung 33</b>	Bewertung der Luftfeuchtigkeit in den Innenräumen ( $\varphi_i$ ) der Bildungsstätten .....	
	(Anzahl der befragten Lehrer: n = 287) .....	83
<b>Abbildung 34</b>	Bewertung der Tages- und Kunstlichtversorgung sowie der Luftqualität in den Schulgebäuden.....	
	(Anzahl der befragten Lehrer: n = 287) .....	84
<b>Abbildung 35</b>	Bewertung der Regulierbarkeit von Komfortparametern (Anzahl der befragten Lehrenden: n = 287)....	84
<b>Abbildung 36</b>	Mittlerer Transmissionswärmekoeffizient ( $H'_T$ ) vor und nach den Sanierungsmaßnahmen sowie.....	
	prozentuale Verbesserung gegenüber dem unsanierten Zustand .....	89
<b>Abbildung 37</b>	Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) der sanierten Dächer und obersten Geschossdecken.....	91

<b>Abbildung 38</b>	Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) der sanierten Kellerdecken .....	92
<b>Abbildung 39</b>	Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) der sanierten Außenwände .....	93
<b>Abbildung 40</b>	Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U_w$ ) der eingebauten Fenster .....	94
<b>Abbildung 41</b>	Volumenstrom ( $\dot{V}_A$ ) der RLT-Anlagen und Bewertung der Luftqualität nach DIN EN 13779 [73] .....	95
<b>Abbildung 42</b>	Spezifische Ventilatorleistung ( $p_{SFP}$ ) der RLT-Anlagen nach DIN EN13779 [73] .....	96
<b>Abbildung 43</b>	Wochenprofil des Heizkreises vor den Sanierungsmaßnahmen .....	97
<b>Abbildung 44</b>	Wochenprofil des Heizkreises nach den Sanierungsmaßnahmen .....	97
<b>Abbildung 45</b>	Reduzierung der Norm-Transmissionswärmeverluste ( $\Phi_T$ ) nach DIN EN 12831 [86] .....	98
<b>Abbildung 46</b>	Reduzierung der Norm-Lüftungswärmeverluste ( $\Phi_V$ ) nach DIN EN 12831 [86] .....	98
<b>Abbildung 47</b>	Reduzierung der Norm-Lüftungswärmeverluste ( $\Phi_{min}$ ) nach DIN EN 12831 [86] .....	98
<b>Abbildung 48</b>	Reduzierung der Norm-Heizlast ( $\Phi_{HL}$ ) in den Bildungsstätten nach DIN EN 12831 [86] .....	99
<b>Abbildung 49</b>	Bewertungsleistung ( $p_j$ ) nach DIN V 18599 [23] und installierte Beleuchtungsleistung ( $p$ ) .....	100
<b>Abbildung 50</b>	Veränderung des Endenergiebedarfs (Heizen) und -verbrauchs ( $Q_{n,t}$ ) .....	102
<b>Abbildung 51</b>	Veränderung des Strombedarfs- und -verbrauchs ( $Q_{Strom,t}$ ) .....	102
<b>Abbildung 52</b>	Reduzierung des Endenergieverbrauchs (Heizen) und -verbrauchs ( $Q_{n,t}$ ) .....	102
<b>Abbildung 53</b>	Reduzierung des Strombedarfs- und -verbrauchs ( $Q_{Strom,t}$ ) .....	102
<b>Abbildung 54</b>	Reduzierung des Energiebedarfs ( $Q_{n,t}$ ) durch die Dämmung von Außenwänden .....	103
<b>Abbildung 55</b>	Reduzierung des Energiebedarfs ( $Q_{n,t}$ ) durch die Dämmung von Dächern und obersten Geschossdecken .....	103
<b>Abbildung 56</b>	Reduzierung des Energiebedarfs ( $Q_{n,t}$ ) durch den Austausch von Fenstern .....	104
<b>Abbildung 57</b>	Reduzierung des Energiebedarfs ( $Q_{n,t}$ ) durch die Dämmung von Kellerdecken .....	104
<b>Abbildung 58</b>	Reduzierung des Wärmebedarfs ( $Q_{n,t}$ ) durch die Verbesserung des mittleren Transmissionswärmekoeffizienten ( $H'_T$ ) .....	104
<b>Abbildung 59</b>	Reduzierung der Lüftungswärmeverluste ( $Q_{V,e}$ ) und Strombedarf ( $Q_{Strom,t}$ ) beim Betrieb raumluftechnischer Anlagen .....	105
<b>Abbildung 60</b>	Veränderung des Primärenergiebedarfs durch den Betrieb raumluftechnischer Anlagen und den Einsatz unterschiedlicher Energieträger zur Wärmeproduktion .....	106
<b>Abbildung 61</b>	Verringerung der Bewertungsleistung ( $p$ ) in den Klassenräumen .....	107
<b>Abbildung 62</b>	Verringerung des Strombedarfs ( $Q_{Strom,t}$ ) durch den Austausch von KVG mit EVG .....	107
<b>Abbildung 63</b>	Veränderung des Primär- ( $Q_P$ ) und Endenergieverbrauchs ( $Q_t$ ) durch die energetischen Gesamtsanierungsmaßnahmen .....	109
<b>Abbildung 64</b>	Verteilung der Bauwerkskosten (KG 300 und 400) in Abhängigkeit der Baunebenkosten (KG 700) .....	110
<b>Abbildung 65</b>	Spezifische Kosten (brutto inkl. Stundenlohnarbeiten) der energetischen Sanierungsmaßnahmen .....	111
<b>Abbildung 66</b>	Bauwerks- und Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) der Maßnahmen an Außenwänden ( $q = 1,5 \%/a$ ) .....	112
<b>Abbildung 67</b>	Bauwerks- und Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) der Maßnahmen an Dächern ( $q = 1,5 \%/a$ ) .....	112
<b>Abbildung 68</b>	Bauwerks- und Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) durch den Fensteraustausch ( $q = 1,5 \%/a$ ) .....	112
<b>Abbildung 69</b>	Bauwerks- und Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) der Maßnahmen an Kellerdecken ( $q = 1,5 \%/a$ ) .....	112
<b>Abbildung 70</b>	Bauwerks- und Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) der Installation von raumluftechnischen Anlagen ( $q = 1,5 \%/a$ ) .....	113
<b>Abbildung 71</b>	Bauwerks- und Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) durch den Austausch von Beleuchtungsanlagen ( $q = 1,5 \%/a$ ) .....	113
<b>Abbildung 72</b>	Bauwerks- und Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) durch den Austausch von Heizungsanlagen ( $q = 1,5 \%/a$ ) .....	113
<b>Abbildung 73</b>	Bauwerks- und kapitalgebundene Kosten ( $K_{N,K}$ ) der energetischen Gesamtmaßnahmen .....	114
<b>Abbildung 74</b>	Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) aufgrund der Dämmung von Dächern und obersten Geschossdecken ( $T_N = 30$ a) .....	115
<b>Abbildung 75</b>	Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) aufgrund der Dämmung von Außenwänden ( $T_N = 30$ a) .....	115
<b>Abbildung 76</b>	Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) aufgrund des Austauschs von Fenstern ( $T_N = 25$ a) .....	115
<b>Abbildung 77</b>	Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) aufgrund der Dämmung von Kellerdecken ( $T_N = 30$ a) .....	115
<b>Abbildung 78</b>	Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) aufgrund der Installation und dem Betrieb von RLT-Anlagen ( $T_N = 15$ a) .....	116

<b>Abbildung 79</b>	Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) aufgrund des Austauschs von Beleuchtungsanlagen ..... ( $T_N = 30$ a) ..... 116
<b>Abbildung 80</b>	Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) und des Stromverbrauchs ( $Q_{Strom,t}$ ) durch ..... die Gesamtmaßnahmen..... 117
<b>Abbildung 81</b>	Veränderung der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) und des Wärmeverbrauchs ( $Q_{h,t}$ ) durch..... die Gesamtmaßnahmen..... 117
<b>Abbildung 82</b>	Amortisationszeit bei der Dämmung von Dächern und obersten Geschossdecken ( $T_N = 30$ a)..... 117
<b>Abbildung 83</b>	Amortisationszeit bei der Dämmung von Außenwänden ( $T_N = 30$ a)..... 117
<b>Abbildung 84</b>	Amortisationszeit beim Austausch von Fenstern ( $T_N = 25$ a)..... 118
<b>Abbildung 85</b>	Amortisationszeit bei der Dämmung von Kellerdecken ( $T_N = 30$ a) ..... 118
<b>Abbildung 86</b>	Amortisationszeit bei der Installation und dem Betrieb von RLT-Anlagen ( $T_N = 15$ a)..... 118
<b>Abbildung 87</b>	Amortisationszeit bei der Installation und dem Betrieb von Beleuchtungsanlagen ( $T_N = 30$ a) ..... 118
<b>Abbildung 88</b>	Amortisationszeit der energetischen Gesamtanierungsmaßnahmen ( $T = 20$ a)..... 119
<b>Abbildung 89</b>	Ermittlung des äquivalenten Energiepreises bei der Dämmung von Dächern und..... obersten Geschossdecken..... 120
<b>Abbildung 90</b>	Ermittlung des äquivalenten Energiepreises bei der Dämmung von Außenwänden ..... 120
<b>Abbildung 91</b>	Ermittlung des äquivalenten Energiepreises beim Austausch von Fenstern ..... 120
<b>Abbildung 92</b>	Ermittlung des äquivalenten Energiepreises bei unterseitiger Dämmung von Kellerdecken ..... 120
<b>Abbildung 93</b>	Ermittlung des äquivalenten Energiepreises bei der Installation und dem Betrieb von RLT-Anlagen .. 121
<b>Abbildung 94</b>	Ermittlung des äquivalenten Energiepreises beim Austausch und Betrieb von Beleuchtungsanlagen 121
<b>Abbildung 95</b>	Ermittlung des äquivalenten Energiepreises der energetischen Gesamtanierungsmaßnahmen ..... 121
<b>Abbildung 96</b>	Gegenüberstellung des äquivalenten Energiepreises aller Einzel- sowie Gesamtmaßnahmen ..... ( $T = 20$ a)..... 122
<b>Abbildung 97</b>	Ermittlung des PLV der eingesparten Primärenergie ( $T = 20$ a)..... 123
<b>Abbildung 98</b>	Ermittlung des PLV der reduzierten $CO_2$ -Emission ( $T = 20$ a)..... 123
<b>Abbildung 99</b>	Bewertung des thermischen Komforts nach VDI 6040 [12] und DIN 4108-2 [48]..... 123
<b>Abbildung 100</b>	Minimale Leistungsbereitschaft der Schüler in den 31 Klassenräumen nach Seppänen et al. [38] ..... 124
<b>Abbildung 101</b>	Bewertung des thermischen Komforts in der Heizperiode nach DIN EN ISO 7730 [69]..... und den Nutzer ..... 125
<b>Abbildung 102</b>	Bewertung des thermischen Komforts in den Referenzräumen während der Heizperiode..... nach DIN EN ISO 7730 [69] ..... 125
<b>Abbildung 103</b>	Bewertung des thermischen Komforts in den Referenzräumen während der Heizperiode..... nach DIN EN ISO 7730 [69]..... 125
<b>Abbildung 104</b>	Bewertung des thermischen Komforts nach DIN EN 15251 [68] und durch den Nutzer während der ..... Nicht-Heizperiode ..... 126
<b>Abbildung 105</b>	Bewertung des thermischen Komforts in der Nicht-Heizperiode nach DIN EN 15251 [68] ..... 127
<b>Abbildung 106</b>	Bewertung des thermischen Komforts in der Nicht-Heizperiode nach DIN EN 15251 [68] ..... 127
<b>Abbildung 107</b>	Bewertung des hygrischen Komforts nach DIN EN 15251 [68] und durch den Nutzer ..... 127
<b>Abbildung 108</b>	Bewertung des hygrischen Komforts in mechanisch belüfteten Räumen nach DIN EN 15251 [68]..... 128
<b>Abbildung 109</b>	Bewertung des hygrischen Komforts in natürlich belüfteten Räumen nach DIN EN 15251 [68] ..... 128
<b>Abbildung 110</b>	Bewertung der hygienischen Raumluftqualität in den Klassenräumen nach VDI 6040 [12]..... 129
<b>Abbildung 111</b>	Anteil unzufriedener Personen und normierte Leistungsfähigkeit nach Wargocki [13] und Olesen [71]130
<b>Abbildung 112</b>	Nutzervotum: Lufttemperatur ( $\theta_{i,ar}$ ) im Winter ..... 131
<b>Abbildung 113</b>	Nutzervotum: Lufttemperatur ( $\theta_{i,ar}$ ) im Sommer ..... 131
<b>Abbildung 114</b>	Nutzervotum: Luftfeuchtigkeit ( $\phi$ ) im Winter..... 131
<b>Abbildung 115</b>	Nutzervotum: Luftfeuchtigkeit ( $\phi$ ) im Sommer..... 131
<b>Abbildung 116</b>	Nutzervotum: Verbesserung der Raumluftqualität ( $C_{CO_2}$ )..... 132
<b>Abbildung 117</b>	Nutzervotum: Regulierbarkeit der Raumlufttemperatur ( $\theta_{i,ar}$ )..... 133
<b>Abbildung 118</b>	Nutzervotum: Regulierbarkeit der Frischluftversorgung ( $\dot{V}_a$ ) ..... 133

<b>Abbildung 119</b>	Ermittlung des kostenreduzierten Betriebs raumluftechnischer Anlagen ( $r = 3,5 \text{ %/a}$ ) .....	137
<b>Abbildung 120</b>	Ermittlung des kostenreduzierten Betriebs raumluftechnischer Anlagen ( $r = 5,5 \text{ %/a}$ ) .....	137
<b>Abbildung 121</b>	Veränderung des Wärme- ( $Q_h$ ) und Strombedarfs ( $Q_{Strom,t}$ ) in Abhängigkeit von der Auslegung des..... maximal zu fördernden Luftvolumenstroms ( $\dot{V}_A$ ) raumluftechnischer Anlagen .....	138
<b>Abbildung 122</b>	(kostenreduzierter Sanierungsstandard = 0) .....	138
<b>Abbildung 122</b>	Verbesserung der Leistungsfähigkeit ( $P$ ) nach Wargocki et al [13].....	139
<b>Abbildung 123</b>	Gegenüberstellung der Beleuchtungskonzepte ( $r = 3,5 \text{ %/a}$ ).....	140
<b>Abbildung 124</b>	Gegenüberstellung der Beleuchtungskonzepte ( $r = 5,5 \text{ %/a}$ ).....	140
<b>Abbildung 125</b>	Veränderung des Strombedarfs ( $Q_{Strom,t}$ ) sowie der Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) in Abhängigkeit der .....	141
<b>Abbildung 126</b>	unterschiedlichen Beleuchtungskonzepte (kostenreduziertes Beleuchtungskonzept (BEL I = 0)) .....	141
<b>Abbildung 126</b>	Stromlastgänge des Schulgebäudes und der Photovoltaikanlage im Zeitraum einer Woche im .....	142
<b>Abbildung 127</b>	Januar .....	142
<b>Abbildung 127</b>	Stromlastgänge des Schulgebäudes und der Photovoltaikanlage im Zeitraum einer Woche im Juli ...	142
<b>Abbildung 128</b>	Ermittlung der kostenoptimierten Integration von Photovoltaikanlagen in Abhängigkeit der.....	143
<b>Abbildung 129</b>	ESD zu den Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) ( $r = 3,5 \text{ %/a}$ ) .....	143
<b>Abbildung 129</b>	Ermittlung der kostenoptimierten Integration von Photovoltaikanlagen in Abhängigkeit der.....	143
<b>Abbildung 130</b>	ESD zu den Jahresgesamtkosten ( $K_{N,G}$ ) ( $r = 5,5 \text{ %/a}$ ) .....	143
<b>Abbildung 130</b>	Veränderung der Jahresgesamtkosten aufgrund der Umsetzung unterschiedlicher .....	146
<b>Abbildung 131</b>	Wärmeerzeugungskonzepte inklusive der Investitionskosten ( $IK$ ) zur Verbesserung des .....	146
<b>Abbildung 131</b>	baulichen Wärmeschutzes ( $r = 3,5 \text{ %/a}$ ).....	146
<b>Abbildung 131</b>	Veränderung der Jahresgesamtkosten aufgrund der Umsetzung unterschiedlicher .....	146
<b>Abbildung 132</b>	Wärmeerzeugungskonzepte inklusive der Investitionskosten ( $IK$ ) zur Verbesserung.....	146
<b>Abbildung 132</b>	des baulichen Wärmeschutzes ( $r = 5,5 \text{ %/a}$ ) .....	146
<b>Abbildung 132</b>	Veränderung des Primärenergiebedarfs aufgrund der Umsetzung unterschiedlicher .....	146
<b>Abbildung 133</b>	Wärmeerzeugungskonzepte sowie der Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes.....	146
<b>Abbildung 133</b>	Veränderung der CO <sub>2</sub> -Emission aufgrund der Umsetzung unterschiedlicher.....	146
<b>Abbildung 134</b>	Wärmeerzeugungskonzepte sowie der Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes.....	146
<b>Abbildung 134</b>	Bewertung der unterschiedlichen Wärmeversorgungskonzepte anhand der äquivalenten.....	148
<b>Abbildung 135</b>	Preise zur Reduzierung von Primärenergie .....	148
<b>Abbildung 135</b>	Bewertung der unterschiedlichen Wärmeversorgungskonzepte anhand der äquivalenten.....	148
<b>Abbildung 136</b>	Preise zur Reduzierung der CO <sub>2</sub> -Emission.....	148
<b>Abbildung 136</b>	Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme von Außenwänden gegen .....	149
<b>Abbildung 137</b>	Außenluft ( $r = 3,5 \text{ %/a}$ ).....	149
<b>Abbildung 137</b>	Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme von Außenwänden gegen .....	149
<b>Abbildung 138</b>	Außenluft ( $r = 5,5 \text{ %/a}$ ).....	149
<b>Abbildung 138</b>	Veränderung der Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) und des Wärmebedarfs ( $Q_{h,t}$ ) von Außenwänden .....	150
<b>Abbildung 139</b>	gegen Außenluft (kostenoptimale Sanierungsmaßnahme = 0) .....	150
<b>Abbildung 139</b>	Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme von Außenwänden gegen .....	151
<b>Abbildung 140</b>	Außenluft ( $r = 3,5 \text{ %/a}$ ).....	151
<b>Abbildung 140</b>	Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme von Außenwänden gegen .....	151
<b>Abbildung 141</b>	Außenluft ( $r = 5,5 \text{ %/a}$ ).....	151
<b>Abbildung 141</b>	Veränderung der Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) und des Wärmebedarfs ( $Q_{h,t}$ ) von Außenwänden gegen.....	151
<b>Abbildung 142</b>	Außenluft (kostenoptimale Sanierungsmaßnahme = 0).....	151
<b>Abbildung 142</b>	Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme an Dächern und obersten.....	152
<b>Abbildung 143</b>	Geschossdecken ( $r = 3,5 \text{ %/a}$ ) .....	152
<b>Abbildung 143</b>	Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme an Dächern und obersten.....	152
<b>Abbildung 144</b>	Geschossdecken ( $r = 5,5 \text{ %/a}$ ) .....	152
<b>Abbildung 144</b>	Veränderung der Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) und des Wärmebedarfs ( $Q_{h,t}$ ) in Abhängigkeit von der .....	153
	Qualität des baulichen Wärmeschutzes von Dächern und obersten Geschossdecken .....	153
	(kostenoptimale Sanierungsmaßnahme = 0).....	153

<b>Abbildung 145</b>	Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme an Dächern und obersten Geschossdecken ( $r = 3,5 \text{ %/a}$ ).....	154
<b>Abbildung 146</b>	Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme an Dächern und obersten Geschossdecken ( $r = 5,5 \text{ %/a}$ ).....	154
<b>Abbildung 147</b>	Veränderung der Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) und des Wärmebedarfs ( $Q_{h,i}$ ) in Abhängigkeit der Qualität des baulichen Wärmeschutzes von Dächern und obersten Geschossdecken (kostenoptimale Sanierungsmaßnahme = 0).....	154
<b>Abbildung 148</b>	Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme beim Fensteraustausch ( $r = 3,5 \text{ %/a}$ ).....	155
<b>Abbildung 149</b>	Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme beim Fensteraustausch ( $r = 5,5 \text{ %/a}$ ).....	155
<b>Abbildung 150</b>	Veränderung der Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) und des Wärmebedarfs ( $Q_{h,i}$ ) in Abhängigkeit der Qualität des baulichen Wärmeschutzes von Fenstern (kostenoptimale Sanierungsmaßnahme = 0).....	156
<b>Abbildung 151</b>	Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme beim Fensteraustausch ( $r = 3,5 \text{ %/a}$ ).....	156
<b>Abbildung 152</b>	Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme beim Fensteraustausch ( $r = 5,5 \text{ %/a}$ ).....	156
<b>Abbildung 153</b>	Veränderung der Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) und des Wärmebedarfs ( $Q_{h,i}$ ) in Abhängigkeit der Qualität des baulichen Wärmeschutzes von Fenstern (kostenoptimale Sanierungsmaßnahme = 0)....	157
<b>Abbildung 154</b>	Bewertung des thermischen Komforts anhand der Übertemperaturstunden nach DIN 4108-2 [48]....	158
<b>Abbildung 155</b>	Leistungsfähigkeit ( $P$ ) der Nutzer in Abhängigkeit von unterschiedlichen Verglasungsarten in Kombination mit außenliegenden Sonnenschutzsystemen.....	160
<b>Abbildung 156</b>	Prozentualer Anteil Unzufriedener (PPD) in Abhängigkeit von unterschiedlichen Verglasungsarten in Kombination mit außenliegenden Sonnenschutzsystemen.....	160
<b>Abbildung 157</b>	Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme an Kellerdecken ( $r = 3,5 \text{ %/a}$ ).....	161
<b>Abbildung 158</b>	Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme an Kellerdecken ( $r = 5,5 \text{ %/a}$ ).....	161
<b>Abbildung 159</b>	Veränderung der Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) und des Wärmebedarfs ( $Q_{h,i}$ ) in Abhängigkeit der Qualität des baulichen Wärmeschutzes von Kellerdecken (kostenoptimale Sanierungsmaßnahme = 0).....	161
<b>Abbildung 160</b>	Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme der Kellerdeckendämmung ( $r = 3,5 \text{ %/a}$ )....	162
<b>Abbildung 161</b>	Ermittlung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahme der Kellerdeckendämmung ( $r = 5,5 \text{ %/a}$ )....	162
<b>Abbildung 162</b>	Veränderung der Kapitalkosten ( $K_{N,K}$ ) und des Wärmebedarfs ( $Q_{h,i}$ ) in Abhängigkeit der Qualität des baulichen Wärmeschutzes von Kellerdecken (kostenoptimale Sanierungsmaßnahme = 0).....	163
<b>Abbildung 163</b>	Gegenüberstellung der Sanierungskonzepte.....	170
<b>Abbildung 164</b>	Gegenüberstellung der Bauwerkskosten zur Umsetzung der Konzepte (brutto).....	173
<b>Abbildung 165</b>	Gegenüberstellung: Wärmeverbrauch ( $Q_{h,i}$ ) der Sanierungskonzepte.....	174
<b>Abbildung 166</b>	Gegenüberstellung: Stromverbrauch ( $Q_{Strom,i}$ ) der Sanierungskonzepte.....	175
<b>Abbildung 167</b>	Gegenüberstellung: Primärenergieverbrauch ( $Q_p$ ) der Sanierungskonzepte.....	175
<b>Abbildung 168</b>	Gegenüberstellung: CO <sub>2</sub> -Emission der Sanierungskonzepte.....	176
<b>Abbildung 169</b>	Gegenüberstellung der Jahresgesamtkosten ( $r = 3,5 \text{ %/a}$ ; $T = 20 \text{ a}$ ).....	177
<b>Abbildung 170</b>	Gegenüberstellung der Jahresgesamtkosten ( $r = 5,5 \text{ %/a}$ ; $T = 20 \text{ a}$ ).....	177
<b>Abbildung 171</b>	Veränderung der notwendigen Förderquote in Abhängigkeit zu den kumulierten Jahresgesamtkosten ( $T = 20\text{a}$ ) und der Energiepreissteigerung ( $r$ ).....	178
<b>Abbildung 172</b>	Ermittlung der äquivalenten Wärmepreise der Sanierungskonzepte.....	179
<b>Abbildung 173</b>	Ermittlung der äquivalenten Strompreise der Sanierungskonzepte.....	179
<b>Abbildung 174</b>	Ermittlung des äquivalenten Primärenergiepreises der Sanierungskonzepte.....	179
<b>Abbildung 175</b>	Ermittlung des äquivalenten Preises zur CO <sub>2</sub> -Emissionseinsparung der Sanierungskonzepte.....	179
<b>Abbildung 176</b>	Gegenüberstellung der erreichten Effizienz der Sanierungskonzepte und der Klimaschutzziele bis 2050 [1], [2], [3].....	180
<b>Abbildung 177</b>	Schritt 1: Reihenfolge der Maßnahmen an technischen Anlagen.....	185
<b>Abbildung 178</b>	Schritt 2: Reihenfolge der Maßnahmen an der thermischen Gebäudehülle.....	187
<b>Abbildung 179</b>	Steckbrief: Gebäude 01.....	208

<b>Abbildung 180</b>	Steckbrief: Gebäude 03 .....	209
<b>Abbildung 181</b>	Steckbrief: Gebäude 04 .....	210
<b>Abbildung 182</b>	Steckbrief: Gebäude 05 .....	211
<b>Abbildung 183</b>	Steckbrief: Gebäude 06 .....	212
<b>Abbildung 184</b>	Steckbrief: Gebäude 07 .....	213
<b>Abbildung 185</b>	Steckbrief: Gebäude 08 .....	214
<b>Abbildung 186</b>	Steckbrief: Gebäude 10 .....	215
<b>Abbildung 187</b>	Steckbrief: Gebäude 11 .....	216
<b>Abbildung 188</b>	Steckbrief: Gebäude 12 .....	217
<b>Abbildung 189</b>	Steckbrief: Gebäude 13 .....	218
<b>Abbildung 190</b>	Steckbrief: Gebäude 41 .....	219
<b>Abbildung 191</b>	Steckbrief: Gebäude 57 .....	220
<b>Abbildung 192</b>	Steckbrief: Gebäude 69 .....	221
<b>Abbildung 193</b>	Steckbrief: Gebäude 78 .....	222
<b>Abbildung 194</b>	Steckbrief: Gebäude 81 .....	223
<b>Abbildung 195</b>	Steckbrief: Gebäude 82 .....	224
<b>Abbildung 196</b>	Fragebogen: Vorderseite .....	225
<b>Abbildung 197</b>	Fragebogen: Rückseite .....	226

## 12 TABELLENVERZEICHNIS

<b>Tabelle 1</b>	Neubau- und Sanierungsbedarf von Schulen in „sozialer und kommunaler Infrastruktur“ [9] .....	16
<b>Tabelle 2</b>	Anzahl und Nutzungsarten der untersuchten Gebäude [46] .....	19
<b>Tabelle 3</b>	Anforderungen unterschiedlicher Energiestandards von Nichtwohngebäuden .....	22
<b>Tabelle 4</b>	Innenraumtemperatur (Bezugswerte) der Sommer-Klimaregionen nach DIN 4108-2 [48].....	35
<b>Tabelle 5</b>	Beschreibung der Kategorien der DIN EN 15251 [68] .....	37
<b>Tabelle 6</b>	Beschreibung der Kategorien der DIN EN 7730 [69] .....	37
<b>Tabelle 7</b>	Grenzwerte der relativen und absoluten Luftfeuchtigkeit ( $\phi_{ar}$ ) nach ASR A3.6 [64].....	38
<b>Tabelle 8</b>	Beschreibung der Kategorien der DIN EN 15251 [68] .....	39
<b>Tabelle 9</b>	Außenluftvolumenströme je Person nach DIN EN 13779 [73] .....	40
<b>Tabelle 10</b>	Eigenschaften von Fensterverglasungen .....	46
<b>Tabelle 11</b>	Parameter des Berechnungsmodells sowie Randbedingungen zur energetischen Bewertung .....	49
<b>Tabelle 12</b>	Anzahl und Primärenergiefaktoren ( $f_p$ ) [23] sowie CO <sub>2</sub> -Äquivalente [55] der..... verwendeten Energieträger zur Beheizung der Bildungsstätten .....	52
<b>Tabelle 13</b>	angesetzte Energiekosten .....	54
<b>Tabelle 14</b>	Parameter der ökonomischen Bewertung .....	54
<b>Tabelle 15</b>	Bewertungskategorien des thermischen Komforts während der Heizperiode nach..... DIN EN ISO 7730 [69].....	57
<b>Tabelle 16</b>	Kategorien des hygrischen Komforts nach DIN EN 15251 [68].....	58
<b>Tabelle 17</b>	Aufteilung der Nutz-, Verkehrs- und Technikflächen der Schulgebäude nach DIN 277 [74].....	60
<b>Tabelle 18</b>	$A_{FE}/A_{NGF}$ -Verhältnisse der Schulgebäude nach Fassadentyp (ermittelt an 507 Klassenräumen).....	61
<b>Tabelle 19</b>	Verteilung der Zonen in den Schulgebäuden nach DIN V 18599 [23].....	62
<b>Tabelle 20</b>	Belegungsdichte in den Klassenräumen .....	63
<b>Tabelle 21</b>	Zur Verfügung stehendes Luftvolumen in den Klassenräumen.....	63
<b>Tabelle 22</b>	Mittlere Transmissionswärmeverluste ( $H'_T$ ) nach Baualtersklasse.....	71
<b>Tabelle 23</b>	nach Schulform getrennter Frischwasserverbrauch (Nutzungszeit: 200 d/a) .....	74
<b>Tabelle 24</b>	Bewertungsleistung ( $p_i$ ) unterschiedlicher Beleuchtungsarten .....	78
<b>Tabelle 25</b>	Nach anlagentechnischen Systemen separierter Strombedarf ( $Q_{Strom,i}$ ) sowie „Nutzerstrom“.....	81
<b>Tabelle 26</b>	Stromverbrauch getrennt nach Schulform .....	87
<b>Tabelle 27</b>	Anzahl und Art der energetischen Einzelsanierungsmaßnahmen.....	88
<b>Tabelle 28</b>	Nach Energieeinsparungsverordnung 2007 / 2009 maximal zulässige .....	90
	Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) von Flachdächern und Dachschrägen bei Bauteilsanierung... 90	
<b>Tabelle 29</b>	Nach Energieeinsparungsverordnung 2007 / 2009 maximal zulässige .....	91
	Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) von Kellerdecken bei Bauteilsanierung .....	91
<b>Tabelle 30</b>	Nach Energieeinsparungsverordnung 2007 / 2009 maximal zulässige .....	93
	Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U$ ) beim Austausch von Außenwänden gegen Außenluft .....	93
<b>Tabelle 31</b>	Nach Energieeinsparungsverordnung 2007 / 2009 maximal zulässige .....	95
	Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U_w$ ) von Fenstern bei Bauteilsanierung .....	95
<b>Tabelle 32</b>	Bewertungsleistung ( $p_i$ ) unterschiedlicher Beleuchtungsarten in Klassenräumen nach .....	101
	DIN V 18599 [23] .....	101
<b>Tabelle 33</b>	Reduzierung des Wärmebedarfs ( $Q_{h,i}$ ) sowie Strombedarfs ( $Q_{Strom,i}$ ) durch den Betrieb .....	106
	von RLT-Anlagen.....	106
<b>Tabelle 34</b>	Verteilung der energetischen Kosten, Instandhaltungskosten sowie Baunebenkosten aller .....	110
	baulichen Gesamtmaßnahmen .....	110
<b>Tabelle 35</b>	Sinnvolle Reihenfolge umzusetzender Einzelmaßnahmen .....	135
<b>Tabelle 36</b>	Untersuchte Beleuchtungskonzepte.....	139

<b>Tabelle 37</b>	Parameter zur Bewertung der unterschiedlichen Wärmeerzeugungskonzepte .....	145
<b>Tabelle 38</b>	Benchmarks zur Installation von PV-Anlagen.....	165
<b>Tabelle 39</b>	Beschreibung der Sanierungsmaßnahmen an technischen Anlagen.....	167
<b>Tabelle 40</b>	Beschreibung der kostenoptimierten Sanierungsmaßnahmen an Gebäudehüllen .....	168
<b>Tabelle 41</b>	Qualität des baulichen Wärmeschutzes der Sanierungskonzepte .....	171
<b>Tabelle 42</b>	Integration anlagentechnischer Systeme in das Sanierungskonzept .....	172
<b>Tabelle 43</b>	Gegenüberstellung und Aufteilung der Bauwerkskosten (brutto) .....	173
<b>Tabelle 44</b>	Anforderungen unterschiedlicher Auszeichnungsgrade gegenüber dem unsanierten Zustand .....	191

## **13 ANHANG**

### **13.1 Anhang: Gebäudesteckbriefe**

### 13.1.1 Gebäude 01

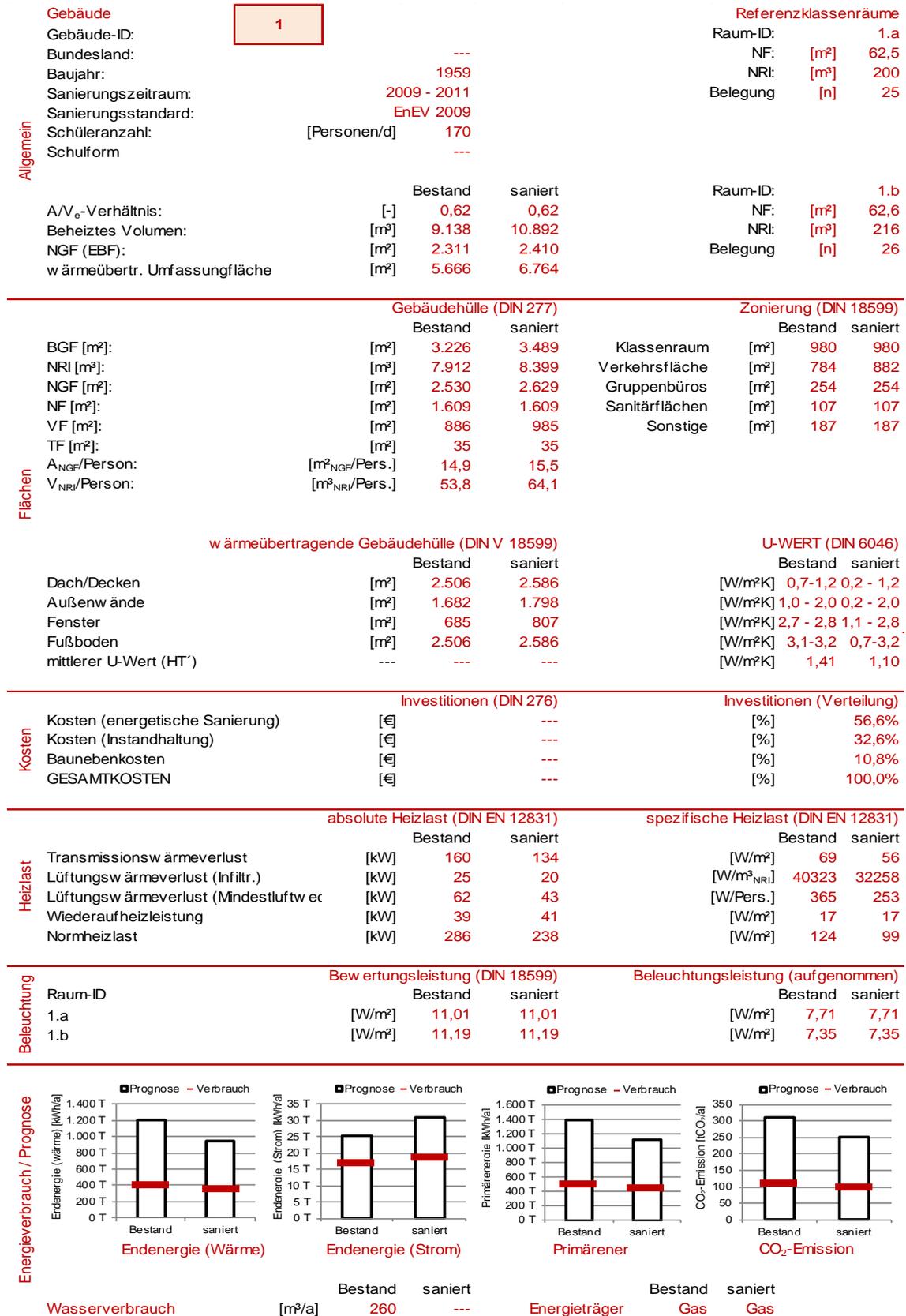


Abbildung 179 Steckbrief: Gebäude 01

### 13.1.2 Gebäude 03

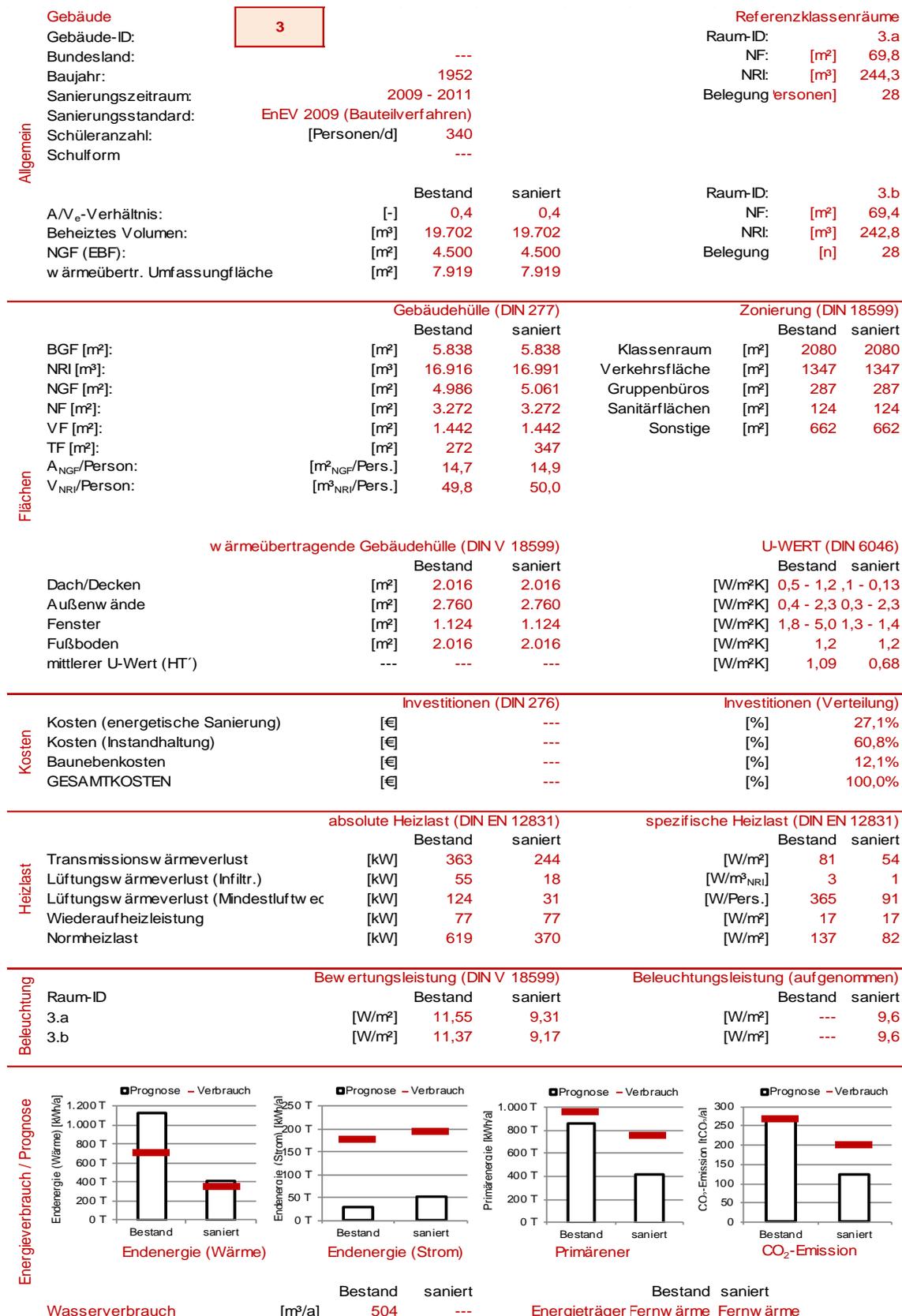


Abbildung 180 Steckbrief: Gebäude 03

### 13.1.3 Gebäude 04

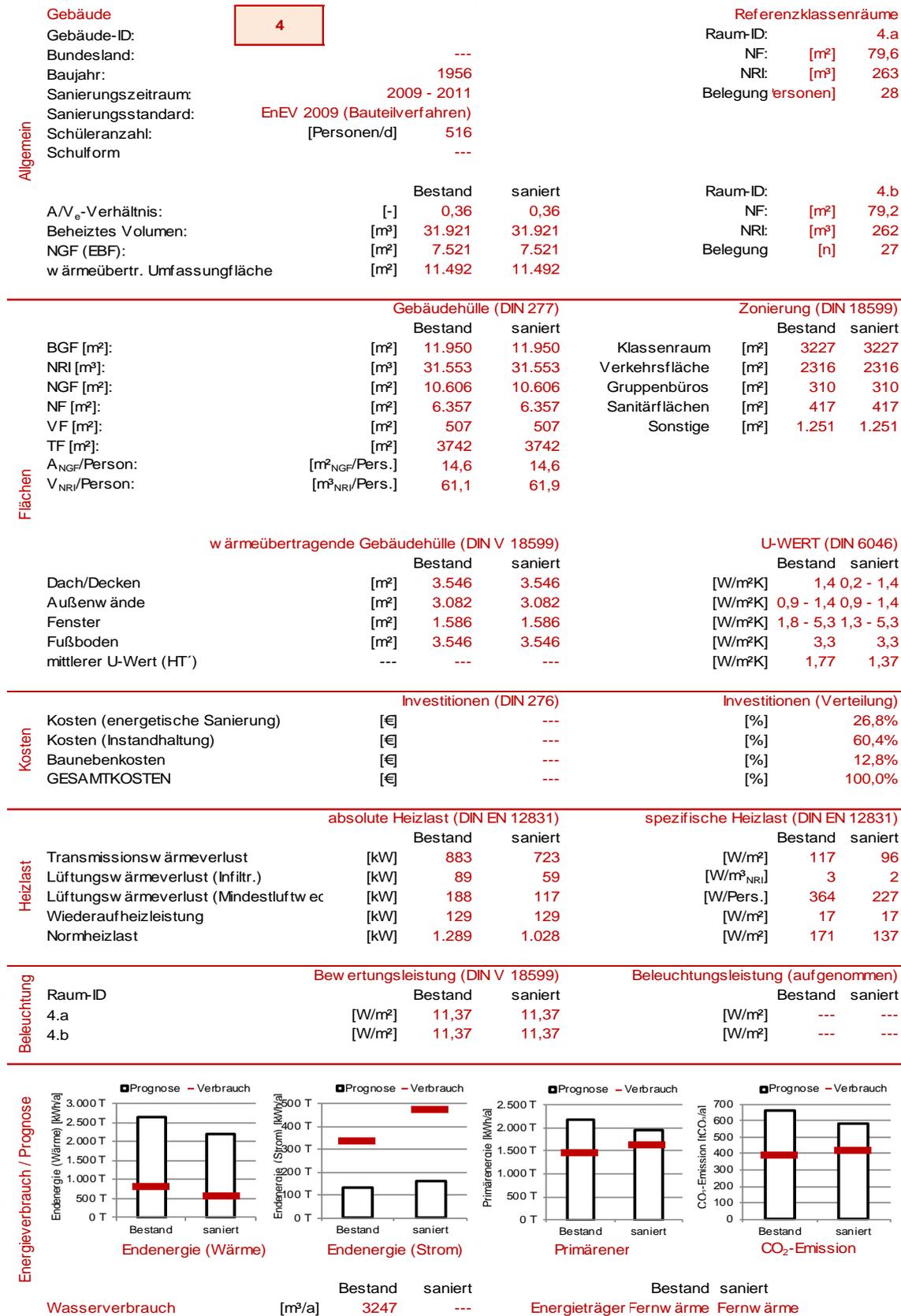


Abbildung 181 Steckbrief: Gebäude 04

### 13.1.4 Gebäude 05

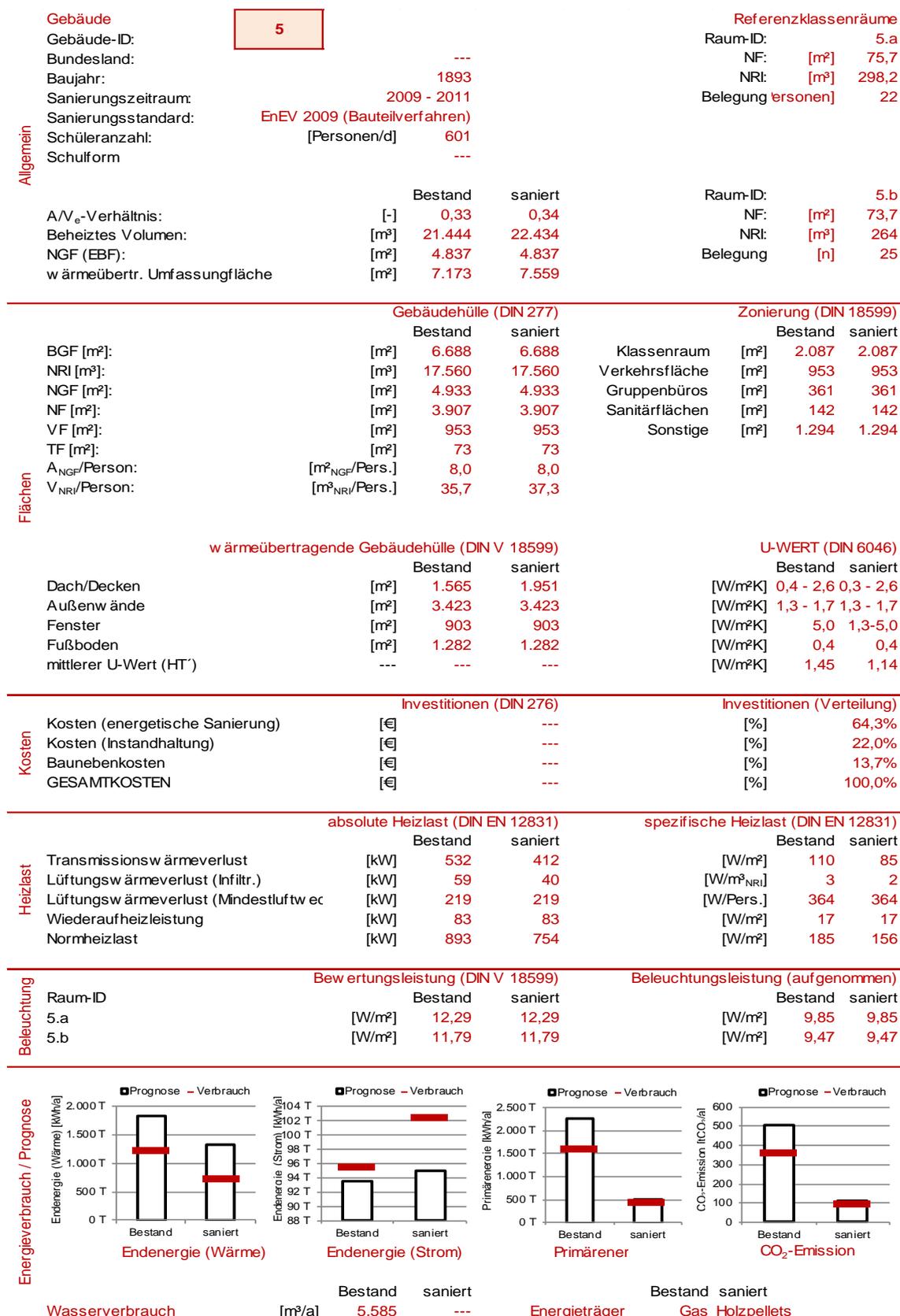


Abbildung 182 Steckbrief: Gebäude 05

### 13.1.5 Gebäude 06

<b>Allgemein</b>	<b>Gebäude</b>	<b>6</b>		<b>Referenzklassenräume</b>		
	Gebäude-ID:			Raum-ID:	6.a	
	Bundesland:	---		NF:	[m²] 73,5	
	Baujahr:	1931		NRI:	[m³] 257	
	Sanierungszeitraum:	2009 - 2011		Belegung	[Personen] 25	
	Sanierungsstandard:	EnEV 2009 (Bauteilverfahren)				
	Schüleranzahl:	[Personen/d] 1211				
	Schulform:	---				
	A/V <sub>e</sub> -Verhältnis:	[-]	Bestand	saniert	Raum-ID:	6.c
	Beheiztes Volumen:	[m³]	0,26	0,26	NF:	[m²] 73,3
NGF (EBF):	[m²]	29.154	29.154	NRI:	[m³] 257	
w ärmeübertr. Umfassungfläche	[m²]	7.126	7.126	Belegung	[n] 26	
		4.740	4.740			

<b>Flächen</b>	<b>Gebäudehülle (DIN 277)</b>			<b>Zonierung (DIN 18599)</b>		
		Bestand	saniert		Bestand	saniert
	BGF [m²]:	[m²] 8.372	8.372	Klassenraum	[m²] 3443	3443
	NRI [m³]:	[m³] 23.371	23.371	Verkehrsfläche	[m²] 1935,2	1935,2
	NGF [m²]:	[m²] 7.117	7.117	Gruppenbüros	[m²] 470	470
	NF [m²]:	[m²] 4.991	4.991	Sanitärflächen	[m²] 99	99
	VF [m²]:	[m²] 1.935	1.935	Sonstige	[m²] 1.179	1.179
	TF [m²]:	[m²] 191,3	191,3			
	A <sub>NGF</sub> /Person:	[m² <sub>NGF</sub> /Pers.]	5,9	5,9		
	V <sub>NRI</sub> /Person:	[m³ <sub>NRI</sub> /Pers.]	19,3	19,3		

<b>Kosten</b>	<b>w ärmeübertragende Gebäudehülle (DIN V 18599)</b>			<b>U-WERT (DIN 6046)</b>		
		Bestand	saniert		Bestand	saniert
	Dach/Decken	[m²] 1.141	1.141	[W/m²K]	1,5	0,2 - 1,5
	Außenwände	[m²] 4.034	4.034	[W/m²K]	2,1	2,1
	Fenster	[m²] 1.150	1.150	[W/m²K]	4,6 - 5,0	1,3
	Fußboden	[m²] 1.141	1.141	[W/m²K]	0,35	0,35
mittlerer U-Wert (HT)	---	---	---	[W/m²K]	2,21	1,67

<b>Kosten</b>	<b>Investitionen (DIN 276)</b>			<b>Investitionen (Verteilung)</b>		
	Kosten (energetische Sanierung)	[€] ---	---	[%]	39,6%	
	Kosten (Instandhaltung)	[€] ---	---	[%]	51,1%	
Baunebenkosten	[€] ---	---	[%]	9,3%		
GESAMTKOSTEN	[€] ---	---	[%]	100,0%		

<b>Heizlast</b>	<b>absolute Heizlast (DIN EN 12831)</b>			<b>spezifische Heizlast (DIN EN 12831)</b>		
		Bestand	saniert		Bestand	saniert
	Transmissionswärmeverlust	[kW] 637	495	[W/m²]	89	69
	Lüftungswärmeverlust (Infiltr.)	[kW] 81	27	[W/m³ <sub>NRI</sub> ]	3	1
	Lüftungswärmeverlust (Mindestluftw ec)	[kW] 441	441	[W/Pers.]	364	364
Wiederaufheizleistung	[kW] 121	121	[W/m²]	17	17	
Normheizlast	[kW] 1280	1084	[W/m²]	180	152	

<b>Beleuchtung</b>	<b>Bewertungsleistung (DIN V 18599)</b>			<b>Beleuchtungsleistung (aufgenommen)</b>		
		Bestand	saniert		Bestand	saniert
	Raum-ID	[W/m²]	11,19	11,19	[W/m²]	---
6.a	[W/m²]	11,19	11,19	[W/m²]	---	---
6.c	[W/m²]	11,19	11,19	[W/m²]	---	---

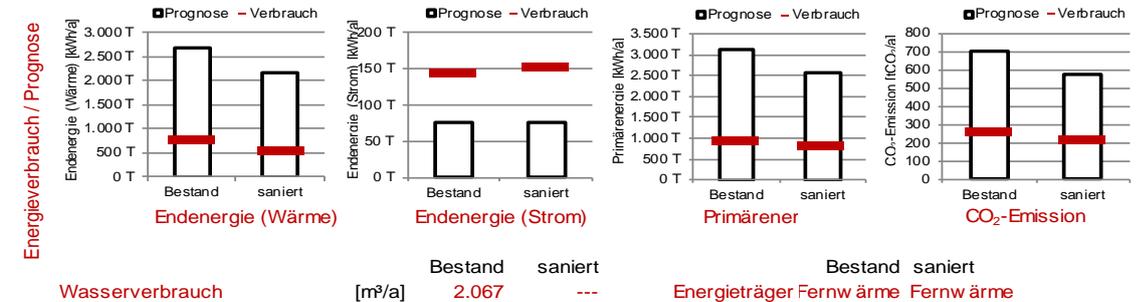


Abbildung 183 Steckbrief: Gebäude 06

### 13.1.6 Gebäude 07

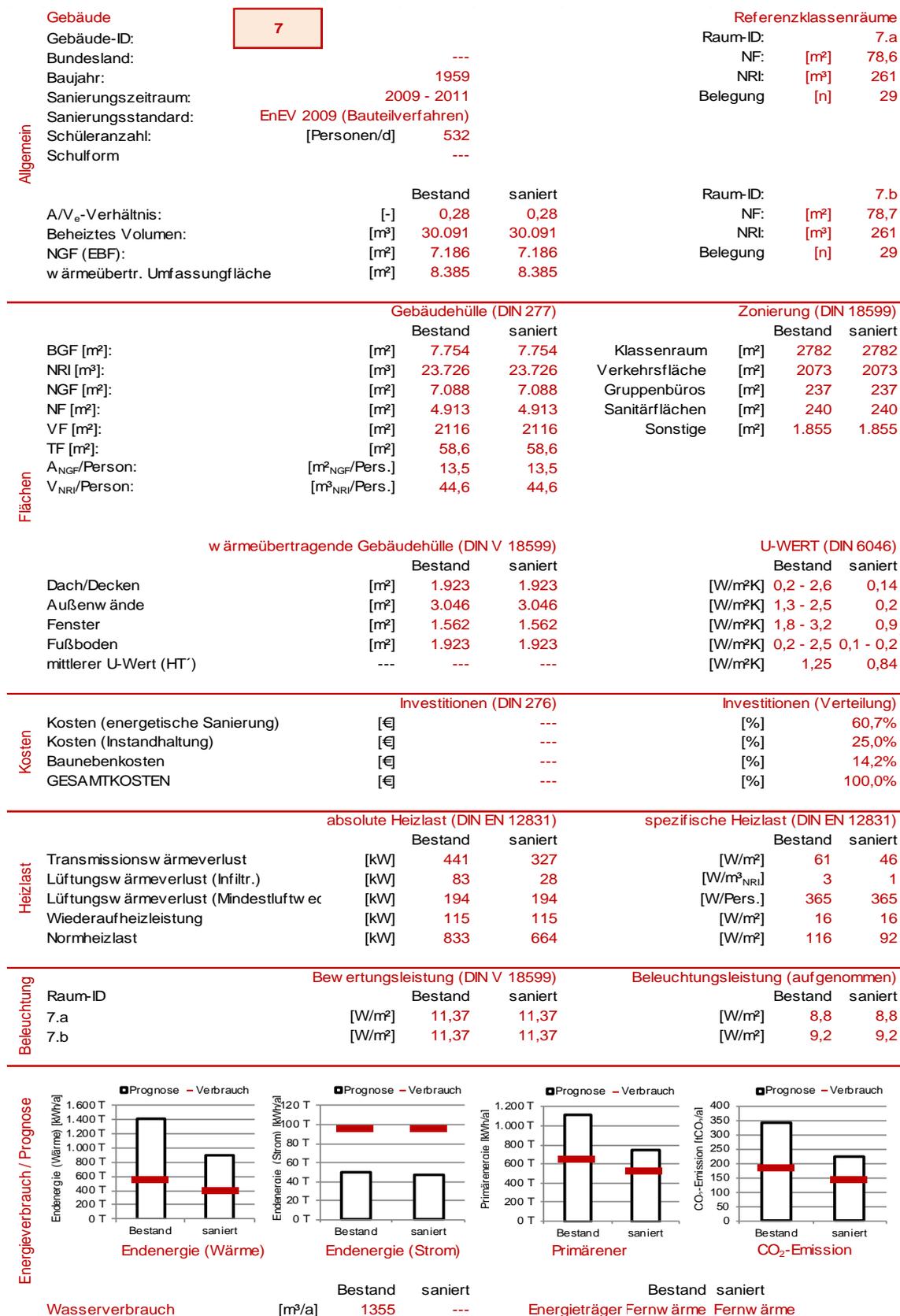


Abbildung 184 Steckbrief: Gebäude 07

### 13.1.7 Gebäude 08

<b>Allgemein</b>	<b>Gebäude</b>	<b>8</b>		<b>Referenzklassenräume</b>		
	Gebäude-ID:			Raum-ID:	8.a	
	Bundesland:	---		NF:	[m²] 50,9	
	Baujahr:	1973		NRI:	[m³] 162	
	Sanierungszeitraum:	2009 - 2011		Belegung	Personen] 14	
	Sanierungsstandard:	EnEV 2009 (Bauteilverfahren)				
	Schüleranzahl:	[Personen/d] 233				
	Schulform:	---				
	A/V <sub>e</sub> -Verhältnis:	[-]	Bestand 0,56	saniert 0,57	Raum-ID:	8.b
	Beheiztes Volumen:	[m³]	11.958	12.252	NF:	[m²] 48,5
NGF (EBF):	[m²]	2.871	2.944	NRI:	[m³] 154	
w ärmeübertr. Umfassungfläche	[m²]	6.735	6.942	Belegung	[n] 14	

<b>Flächen</b>	<b>Gebäudehülle (DIN 277)</b>			<b>Zonierung (DIN 18599)</b>		
		Bestand	saniert		Bestand	saniert
	BGF [m²]:	[m²] 5.967	6.048	Klassenraum	[m²] 1.363	1437
	NRI [m²]:	[m²] 12.835	13.009	Verkehrsfläche	[m²] 1.116	1.116
	NGF [m²]:	[m²] 5.375	5.448	Gruppenbüros	[m²] 183	183
	NF [m²]:	[m²] 4.217	4.290	Sanitärflächen	[m²] 81	81
	VF [m²]:	[m²] 1123	1123	Sonstige	[m²] 127	127
	TF [m²]:	[m²] 35	35			
	A <sub>NGF</sub> /Person:	[m² <sub>NGF</sub> /Pers.] 23,1	23,4			
	V <sub>NRI</sub> /Person:	[m³ <sub>NRI</sub> /Pers.] 55,1	55,8			

<b>Kosten</b>	<b>w ärmeübertragende Gebäudehülle (DIN V 18599)</b>			<b>U-WERT (DIN 6046)</b>		
		Bestand	saniert		Bestand	saniert
	Dach/Decken	[m²] 2.401	2.458	[W/m²K]	0,4	0,1 - 0,2
	Außenwände	[m²] 1.112	1.111	[W/m²K]	1,7	0,2
	Fenster	[m²] 808	900	[W/m²K]	3	0,8
	Fußboden	[m²] 2.401	2.458	[W/m²K]	1,2	1,2
mittlerer U-Wert (HT)	---	---	[W/m²K]	1,26	0,63	

<b>Kosten</b>	<b>Investitionen (DIN 276)</b>			<b>Investitionen (Verteilung)</b>		
	Kosten (energetische Sanierung)	[€] ---	---	[%]	58,4%	
	Kosten (Instandhaltung)	[€] ---	---	[%]	25,5%	
Baunebenkosten	[€] ---	---	[%]	16,1%		
GESAMTKOSTEN	[€] ---	---	[%]	100,0%		

<b>Heizlast</b>	<b>absolute Heizlast (DIN EN 12831)</b>			<b>spezifische Heizlast (DIN EN 12831)</b>		
		Bestand	saniert		Bestand	saniert
	Transmissionsw ärmeverlust	[kW] 302	163	[W/m²]	105	55
	Lüftungsw ärmeverlust (Infiltr.)	[kW] 33	11	[W/m³ <sub>NRI</sub> ]	3	1
	Lüftungsw ärmeverlust (Mindestluftw ec	[kW] 85	85	[W/Pers.]	365	365
	Wiederaufheizleistung	[kW] 49	50	[W/m²]	17	17
Normheizlast	[kW] 469	309	[W/m²]	163	105	

<b>Beleuchtung</b>	<b>Bewertungsleistung (DIN V 18599)</b>			<b>Beleuchtungsleistung (aufgenommen)</b>		
		Bestand	saniert		Bestand	saniert
	Raum-ID	[W/m²]	11,37	11,37	[W/m²]	---
8.a	[W/m²]	11,37	11,37	[W/m²]	---	---
8.b	[W/m²]	11,37	11,37	[W/m²]	---	---

<b>Energieverbrauch / Prognose</b>	<b>Endenergie (Wärme)</b>		<b>Endenergie (Strom)</b>		<b>Primärenergie</b>		<b>CO<sub>2</sub>-Emission</b>	
	Bestand	saniert	Bestand	saniert	Bestand	saniert	Bestand	saniert
	700 T	600 T	50 T	40 T	800 T	700 T	200	150
	600 T	500 T	30 T	20 T	600 T	500 T	100	75
500 T	400 T	10 T	0 T	400 T	300 T	50	50	
400 T	300 T	0 T	0 T	200 T	100 T	0	0	
300 T	200 T			100 T	0 T			
200 T	100 T			0 T	0 T			
100 T	0 T							
0 T	0 T							

	Bestand	saniert	Bestand	saniert	Bestand	saniert	Bestand	saniert
Wasserverbrauch	[m³/a]	389	---	Energieträger	Gas	Gas	Gas	Gas

Abbildung 185 Steckbrief: Gebäude 08

### 13.1.8 Gebäude 10

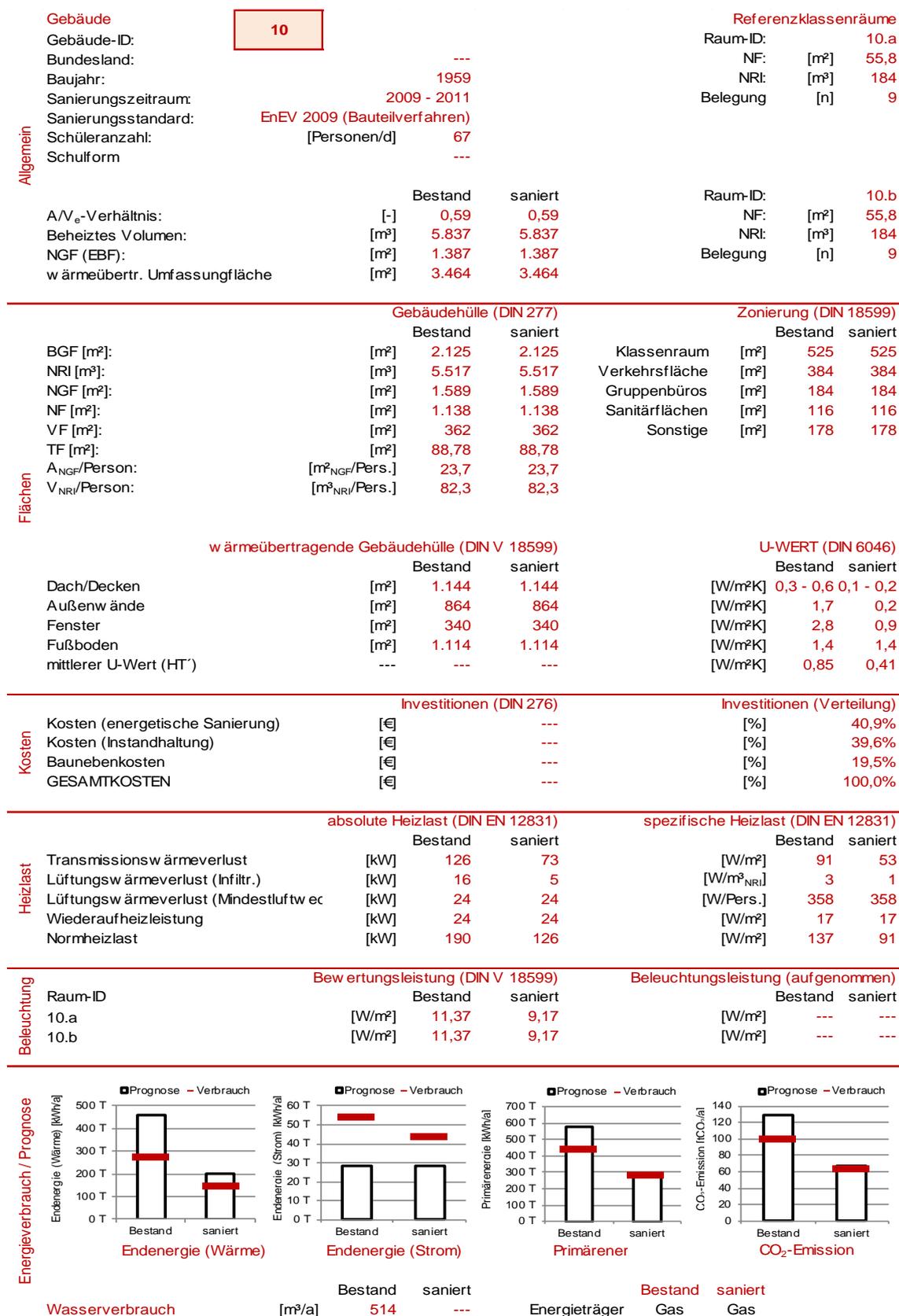


Abbildung 186 Steckbrief: Gebäude 10

### 13.1.9 Gebäude 11

<b>Allgemein</b>	<b>Gebäude</b>	<b>11</b>		<b>Referenzklassenräume</b>		
	Gebäude-ID:			Raum-ID:	11.a	
	Bundesland:	---		NF:	[m²] 60	
	Baujahr:	1959		NRI:	[m³] 282	
	Sanierungszeitraum:	2009 - 2011		Belegung	[n] 9	
	Sanierungsstandard:	EnEV 2009 (Bauteilverfahren)				
	Schüleranzahl:	[Personen/d] ---				
	Schulform	---				
	A/V <sub>e</sub> -Verhältnis:	[-]	Bestand	saniert	Raum-ID:	11.b
	Beheiztes Volumen:	[m³]	0,63	0,63	NF:	[m²] 60
NGF (EBF):	[m²]	6.454	6.454	NRI:	[m³] 282	
w ärmeübertr. Umfassungfläche	[m²]	1.392	1.392	Belegung	[n] 9	
		4.072	4.072			

<b>Flächen</b>	<b>Gebäudehülle (DIN 277)</b>				<b>Zonierung (DIN 18599)</b>			
			Bestand	saniert			Bestand	saniert
	BGF [m²]:	[m²]	1.756	1.756	Klassenraum	[m²]	784	784
	NRI [m³]:	[m³]	5.256	5.256	Verkehrsfläche	[m²]	306	306
	NGF [m²]:	[m²]	1.493	1.493	Gruppenbüros	[m²]	136	136
	NF [m²]:	[m²]	1.148	1.148	Sanitärflächen	[m²]	91	91
	VF [m²]:	[m²]	319	319	Sonstige	[m²]	76	76
	TF [m²]:	[m²]	26	26				
	A <sub>NGF</sub> /Person:	[m² <sub>NGF</sub> /Pers.]	28,7	28,7				
	V <sub>NRI</sub> /Person:	[m³ <sub>NRI</sub> /Pers.]	101,1	101,1				

<b>Kosten</b>	<b>w ärmeübertragende Gebäudehülle (DIN V 18599)</b>				<b>U-WERT (DIN 6046)</b>			
			Bestand	saniert			Bestand	saniert
	Dach/Decken	[m²]	1.405	1.405	[W/m²K]	0,4 - 0,5	0,1 - 0,2	
	Außenw ände	[m²]	867	867	[W/m²K]	0,5 - 0,8	0,1 - 0,2	
	Fenster	[m²]	373	373	[W/m²K]	3,0	0,8	
	Fußboden	[m²]	1.392	1.392	[W/m²K]	2,1	2,1	
mittlerer U-Wert (HT')	---	---	---	[W/m²K]	0,84	0,38		

<b>Kosten</b>	<b>Investitionen (DIN 276)</b>				<b>Investitionen (Verteilung)</b>			
	Kosten (energetische Sanierung)	[€]	---	---	[%]	80,1%		
	Kosten (Instandhaltung)	[€]	---	---	[%]	9,3%		
Baunebenkosten	[€]	---	---	[%]	10,6%			
GESAMTKOSTEN	[€]	---	---	[%]	100,0%			

<b>Heizlast</b>	<b>absolute Heizlast (DIN EN 12831)</b>				<b>spezifische Heizlast (DIN EN 12831)</b>			
			Bestand	saniert			Bestand	saniert
	Transmissionsw ärmeverlust	[kW]	193	75	[W/m²]	139	54	
	Lüftungsw ärmeverlust (Infiltr.)	[kW]	18	6	[W/m³ <sub>NRI</sub> ]	3	1	
	Lüftungsw ärmeverlust (Mindestluftw ec	[kW]	19	19	[W/Pers.]	365	365	
	Wiederaufheizleistung	[kW]	24	24	[W/m²]	17	17	
Normheizlast	[kW]	254	124	[W/m²]	182	89		

<b>Beleuchtung</b>	<b>Bew ertungsleistung (DIN V 18599)</b>				<b>Beleuchtungsleistung (aufgenommen)</b>			
			Bestand	saniert			Bestand	saniert
	Raum-ID	[W/m²]	13,42	10,83	[W/m²]	11,98	10,03	
11.a	[W/m²]	11,04	8,9	[W/m²]	11,98	7,2		
11.b								

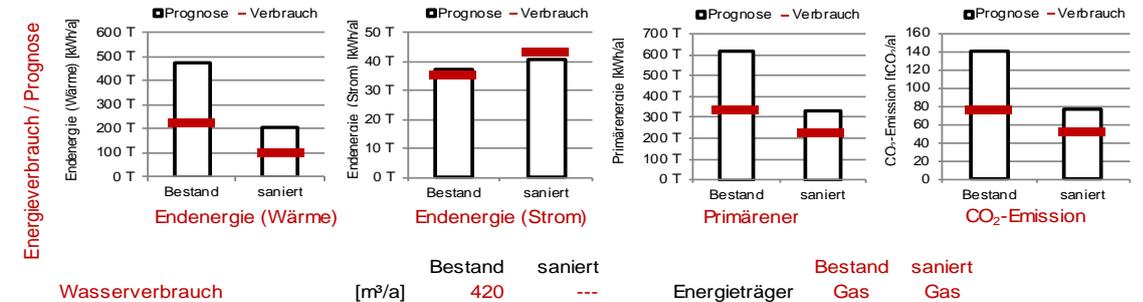


Abbildung 187 Steckbrief: Gebäude 11

### 13.1.10 Gebäude 12

<b>Allgemein</b>	<b>Gebäude</b>	<b>Gebäude-ID:</b>	<b>12</b>		<b>Referenzklassenräume</b>				
		<b>Bundesland:</b>	---		<b>Raum-ID:</b>	12.a			
		<b>Baujahr:</b>	1962		<b>NF:</b>	[m²]	64,4		
		<b>Sanierungszeitraum:</b>	2009 - 2011		<b>NRI:</b>	[m³]	185		
		<b>Sanierungsstandard:</b>	EnEV 2009 (Bauteilverfahren)		<b>Belegung</b>	[n]	14		
		<b>Schüleranzahl:</b>	[Personen/d] 374						
		<b>Schulform</b>	---						
			<b>Bestand</b>	<b>saniert</b>	<b>Raum-ID:</b>	12.b			
		<b>A/V<sub>e</sub>-Verhältnis:</b>	[-]	0,53	0,53	<b>NF:</b>	[m²]	40	
		<b>Beheiztes Volumen:</b>	[m³]	26.053	26.053	<b>NRI:</b>	[m³]	142	
	<b>NGF (EBF):</b>	[m²]	6.120	6.120	<b>Belegung</b>	[n]	13		
	<b>w ärmeübertr. Umfassungfläche</b>	[m²]	13.686	13.686					
<b>Flächen</b>	<b>Gebäudehülle (DIN 277)</b>				<b>Zonierung (DIN 18599)</b>				
			<b>Bestand</b>	<b>saniert</b>		<b>Bestand</b>	<b>saniert</b>		
	<b>BGF [m²]:</b>	[m²]	11.135	11.135	<b>Klassenraum</b>	[m²]	2422	2422	
	<b>NRI [m²]:</b>	[m²]	26.331	26.331	<b>Verkehrsfläche</b>	[m²]	1617	1617	
	<b>NGF [m²]:</b>	[m²]	9.000	9.000	<b>Gruppenbüros</b>	[m²]	325	325	
	<b>NF [m²]:</b>	[m²]	7.246	7.246	<b>Sanitärflächen</b>	[m²]	395	395	
	<b>VF [m²]:</b>	[m²]	1674	1674	<b>Sonstige</b>	[m²]	1.361	1.361	
	<b>TF [m²]:</b>	[m²]	80	80					
	<b>A<sub>NGF</sub>/Person:</b>	[m² <sub>NGF</sub> /Pers.]	24,1	24,1					
	<b>V<sub>NRI</sub>/Person:</b>	[m³ <sub>NRI</sub> /Pers.]	70,4	70,4					
<b>Kosten</b>	<b>w ärmeübertragende Gebäudehülle (DIN V 18599)</b>				<b>U-WERT (DIN 6046)</b>				
			<b>Bestand</b>	<b>saniert</b>		<b>Bestand</b>	<b>saniert</b>		
	<b>Dach/Decken</b>	[m²]	4.432	4.432	[W/m²K]	0,6 - 2,1	0,1		
	<b>Außenw ände</b>	[m²]	3.313	3.313	[W/m²K]	1,1 - 1,3	0,2 - 1,3		
	<b>Fenster</b>	[m²]	1.503	1.503	[W/m²K]	3,0 - 4,5	0,7 - 4,5		
	<b>Fußboden</b>	[m²]	4.432	4.432	[W/m²K]	0,9 - 1,8	0,2 - 1,8		
<b>mittlerer U-Wert (HT')</b>	---	---	---	[W/m²K]	1,13	0,79			
<b>Investitionen</b>	<b>Investitionen (DIN 276)</b>				<b>Investitionen (Verteilung)</b>				
	<b>Kosten (energetische Sanierung)</b>	[€]	---	---	[%]	26,4%			
	<b>Kosten (Instandhaltung)</b>	[€]	---	---	[%]	59,7%			
	<b>Baunebenkosten</b>	[€]	---	---	[%]	13,9%			
	<b>GESAMTKOSTEN</b>	[€]	---	---	[%]	100,0%			
<b>Heizlast</b>	<b>absolute Heizlast (DIN EN 12831)</b>				<b>spezifische Heizlast (DIN EN 12831)</b>				
			<b>Bestand</b>	<b>saniert</b>		<b>Bestand</b>	<b>saniert</b>		
	<b>Transmissionsw ärmeverlust</b>	[kW]	622	454	[W/m²]	102	74		
	<b>Lüftungsw ärmeverlust (Infiltr.)</b>	[kW]	72	48	[W/m³ <sub>NRI</sub> ]	3	2		
	<b>Lüftungsw ärmeverlust (Mindestluftw ec</b>	[kW]	136	136	[W/Pers.]	364	364		
	<b>Wiederaufheizleistung</b>	[kW]	104	104	[W/m²]	17	17		
<b>Normheizlast</b>	[kW]	934	742	[W/m²]	153	121			
<b>Beleuchtung</b>	<b>Bew ertungsleistung (DIN V 18599)</b>				<b>Beleuchtungsleistung (aufgenommen)</b>				
	<b>Raum-ID</b>		<b>Bestand</b>	<b>saniert</b>		<b>Bestand</b>	<b>saniert</b>		
	12.a	[W/m²]	10,83	10,83	[W/m²]	10,22	10,22		
	12.b	[W/m²]	---	---	[W/m²]	8,6	8,6		
<b>Energieverbrauch / Prognose</b>	<b>Wasserverbrauch</b>				<b>Energieträger</b>				
			<b>Bestand</b>	<b>saniert</b>		<b>Bestand</b>	<b>saniert</b>	<b>Bestand</b>	<b>saniert</b>
		[m³/a]	867	---		<b>Gas</b>	<b>Gas</b>		
	<b>Endenergie (Wärme)</b>	[kWh/a]			<b>Endenergie (Wärme)</b>	[kWh/a]		<b>Endenergie (Strom)</b>	[kWh/a]
	<b>Endenergie (Strom)</b>	[kWh/a]			<b>Primärenergie</b>	[kWh/a]		<b>CO<sub>2</sub>-Emission</b>	[tCO <sub>2</sub> /a]

Abbildung 188 Steckbrief: Gebäude 12

### 13.1.11 Gebäude 13

<b>Allgemein</b>	<b>Gebäude</b>	<b>13</b>		<b>Referenzklassenräume</b>			
	Gebäude-ID:			Raum-ID:	13.a		
	Bundesland:	---		NF:	[m²]	53,7	
	Baujahr:	1970		NRI:	[m³]	172	
	Sanierungszeitraum:	2007-2008		Belegung	[n]	19	
	Sanierungsstandard:	EnEV 2007 -30 %					
	Schüleranzahl:	[Personen/d]	400				
	Schulform	---					
			Bestand	saniert	Raum-ID:	13.b	
	A/V <sub>e</sub> -Verhältnis:	[-]	0,33	0,33	NF:	[m²]	53,7
Beheiztes Volumen:	[m³]	16.328	16.328	NRI:	[m³]	172	
NGF (EBF):	[m²]	4.082	4.082	Belegung	[n]	22	
w ärmeübertr. Umfassungfläche	[m²]	5.413	5.413				

<b>Flächen</b>	<b>Gebäudehülle (DIN 277)</b>			<b>Zonierung (DIN 18599)</b>				
		Bestand	saniert		Bestand	saniert		
	BGF [m²]:	[m²]	4.809	4.809	Klassenraum	[m²]	2033	2033
	NRI [m³]:	[m³]	14.060	14.060	Verkehrsfläche	[m²]	1563	1563
	NGF [m²]:	[m²]	4.070	4.070	Gruppenbüros	[m²]	243	243
	NF [m²]:	[m²]	2.439	2.439	Sanitärflächen	[m²]	97	97
	VF [m²]:	[m²]	1562	1562	Sonstige	[m²]	147	147
	TF [m²]:	[m²]	68,68	68,68				
	A <sub>NGF</sub> /Person:	[m² <sub>NGF</sub> /Pers.]	10,2	10,2				
	V <sub>NRI</sub> /Person:	[m³ <sub>NRI</sub> /Pers.]	35,2	35,2				

<b>Kosten</b>	<b>w ärmeübertragende Gebäudehülle (DIN V 18599)</b>			<b>U-WERT (DIN 6046)</b>			
		Bestand	saniert		Bestand	saniert	
	Dach/Decken	[m²]	1.349	1.349	[W/m²K]	0,5 - 0,7	0,1 - 0,2
	Außenw ände	[m²]	1.557	1.557	[W/m²K]	1,4 - 3,9	0,1 - 0,5
	Fenster	[m²]	1.158	1.158	[W/m²K]	3,1 - 3,4	1,4
	Fußboden	[m²]	1.349	1.349	[W/m²K]	1,0 - 1,1	0,2 - 1,1
mittlerer U-Wert (HT)	---	---	---	[W/m²K]	1,78	0,50	

<b>Kosten</b>	<b>Investitionen (DIN 276)</b>			<b>Investitionen (Verteilung)</b>		
		Bestand	saniert		Bestand	saniert
	Kosten (energetische Sanierung)	[€]	---	---	[%]	40,4%
	Kosten (Instandhaltung)	[€]	---	---	[%]	51,0%
Baunebenkosten	[€]	---	---	[%]	8,6%	
GESAMTKOSTEN	[€]	---	---	[%]	100,0%	

<b>Heizlast</b>	<b>absolute Heizlast (DIN EN 12831)</b>			<b>spezifische Heizlast (DIN EN 12831)</b>			
		Bestand	saniert		Bestand	saniert	
	Transmissionsw ärmeverlust	[kW]	355	112	[W/m²]	87	27
	Lüftungsw ärmeverlust (Infiltr.)	[kW]	45	15	[W/m³ <sub>NRI</sub> ]	3	1
	Lüftungsw ärmeverlust (Mindestluftw ec	[kW]	146	146	[W/Pers.]	365	365
	Wiederaufheizleistung	[kW]	69	69	[W/m²]	17	17
Normheizlast	[kW]	615	342	[W/m²]	151	84	

<b>Beleuchtung</b>	<b>Bew ertungsleistung (DIN V 18599)</b>			<b>Beleuchtungsleistung (aufgenommen)</b>			
		Bestand	saniert		Bestand	saniert	
	Raum-ID	[W/m²]	11,55	9,31	[W/m²]	11,88	9,95
	13.a	[W/m²]	11,55	9,31	[W/m²]	11,88	9,95
13.b	[W/m²]	11,55	9,31	[W/m²]	11,88	9,95	

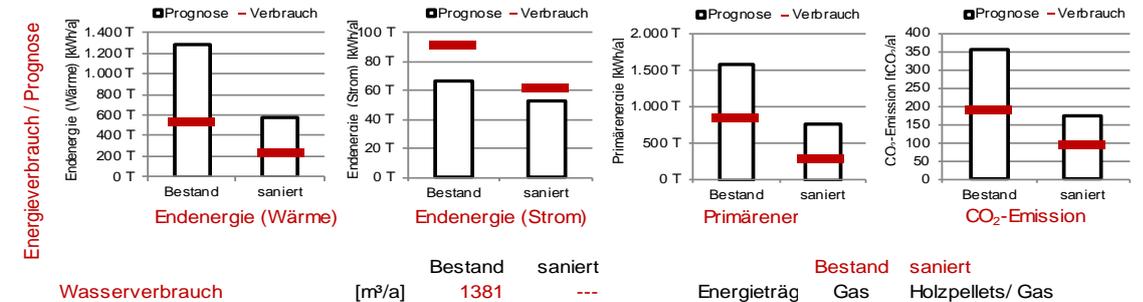


Abbildung 189 Steckbrief: Gebäude 13

### 13.1.12 Gebäude 41

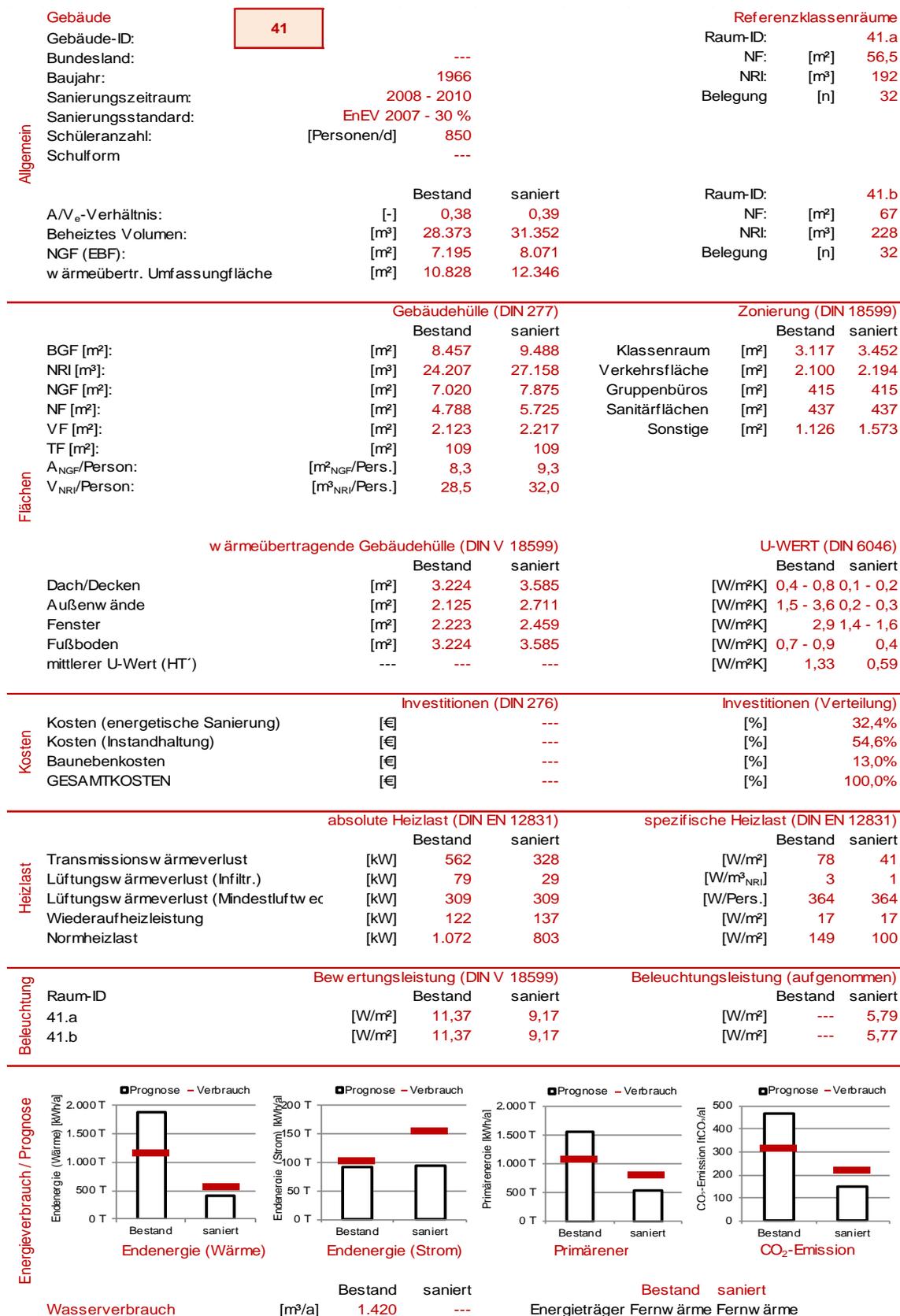


Abbildung 190 Steckbrief: Gebäude 41

### 13.1.13 Gebäude 57

<b>Allgemein</b>	<b>Gebäude</b>	<b>57</b>		<b>Referenzklassenräume</b>			
	Gebäude-ID:			Raum-ID:	57.a		
	Bundesland:	---		NF:	[m²]	74,8	
	Baujahr:	1966		NRI:	[m³]	251	
	Sanierungszeitraum:	2009 - 2010		Belegung	[n]	25	
	Sanierungsstandard:	EnEV 2007 - 30 %					
	Schüleranzahl:	[Personen/d]	658				
	Schulform	---					
			Bestand	saniert	Raum-ID:	57.b	
	A/V <sub>e</sub> -Verhältnis:	[-]	0,22	0,22	NF:	[m²]	74,9
Beheiztes Volumen:	[m³]	22.126	22.126	NRI:	[m³]	251	
NGF (EBF):	[m²]	5.112	5.112	Belegung	[n]	30	
w ärmeübertr. Umfassungfläche	[m²]	4.961	4.961				

<b>Flächen</b>	<b>Gebäudehülle (DIN 277)</b>			<b>Zonierung (DIN 18599)</b>				
		Bestand	saniert		Bestand	saniert		
	BGF [m²]:	[m²]	5.819	5.819	Klassenraum	[m²]	2746	2746
	NRI [m²]:	[m²]	16.566	16.566	Verkehrsfläche	[m²]	1633	1633
	NGF [m²]:	[m²]	5.127	5.127	Gruppenbüros	[m²]	150	150
	NF [m²]:	[m²]	3.959	3.959	Sanitärflächen	[m²]	25	25
	VF [m²]:	[m²]	986,3	986,3	Sonstige	[m²]	558	558
	TF [m²]:	[m²]	181,8	181,8				
	A <sub>NGF</sub> /Person:	[m² <sub>NGF</sub> /Pers.]	7,8	7,8				
	V <sub>NRI</sub> /Person:	[m³ <sub>NRI</sub> /Pers.]	25,2	25,2				

<b>Kosten</b>	<b>w ärmeübertragende Gebäudehülle (DIN V 18599)</b>			<b>U-WERT (DIN 6046)</b>			
		Bestand	saniert		Bestand	saniert	
	Dach/Decken	[m²]	1.309	1.309	[W/m²K]	0,6 - 0,8	0,1
	Außenw ände	[m²]	1.307	1.307	[W/m²K]	1,1 - 4,4	0,2
	Fenster	[m²]	1.034	1.034	[W/m²K]	3,0	0,9
	Fußboden	[m²]	1.309	1.309	[W/m²K]	0,4 - 3,4	0,3 - 0,4
mittlerer U-Wert (HT')	---	---	---	[W/m²K]	1,50	0,48	

<b>Kosten</b>	<b>Investitionen (DIN 276)</b>			<b>Investitionen (Verteilung)</b>	
		Bestand	saniert		
	Kosten (energetische Sanierung)	[€]	---	[%]	47,9%
	Kosten (Instandhaltung)	[€]	---	[%]	40,0%
Baunebenkosten	[€]	---	[%]	12,1%	
GESAMTKOSTEN	[€]	---	[%]	100,0%	

<b>Heizlast</b>	<b>absolute Heizlast (DIN EN 12831)</b>			<b>spezifische Heizlast (DIN EN 12831)</b>			
		Bestand	saniert		Bestand	saniert	
	Transmissionsw ärmeverlust	[kW]	368	107	[W/m²]	72	21
	Lüftungsw ärmeverlust (Infiltr.)	[kW]	61	20	[W/m³ <sub>NRI</sub> ]	3	1
	Lüftungsw ärmeverlust (Mindestluftw ec	[kW]	239	60	[W/Pers.]	363	91
	Wiederaufheizleistung	[kW]	88	88	[W/m²]	17	17
Normheizlast	[kW]	756	275	[W/m²]	148	54	

<b>Beleuchtung</b>	<b>Bew ertungsleistung (DIN 18599)</b>			<b>Beleuchtungsleistung (aufgenommen)</b>		
		Bestand	saniert		Bestand	saniert
	Raum-ID					
	57.a	[W/m²]	11,19	9,12	[W/m²]	---
57.b	[W/m²]	11,19	9,12	[W/m²]	9,58	8,02

<b>Energieverbrauch / Prognose</b>	<b>Endenergie (Wärme)</b>		<b>Endenergie (Strom)</b>		<b>Primärenergie</b>		<b>CO<sub>2</sub>-Emission</b>	
	Bestand	saniert	Bestand	saniert	Bestand	saniert	Bestand	saniert
	1.000 T	800 T	140 T	120 T	1.200 T	1.000 T	300 T	250 T
	800 T	600 T	120 T	100 T	800 T	600 T	200 T	150 T
600 T	400 T	100 T	80 T	600 T	400 T	150 T	100 T	
400 T	200 T	80 T	60 T	400 T	200 T	100 T	50 T	
200 T	0 T	60 T	40 T	200 T	0 T	50 T	0 T	
0 T		40 T	20 T	0 T		0 T		
		20 T	0 T					
		0 T						

	Bestand	saniert	Bestand	saniert
Wasserverbrauch	[m³/a]	1.967	---	---
Energieträger	Gas	Gas	Gas	Gas

Abbildung 191 Steckbrief: Gebäude 57

### 13.1.14 Gebäude 69

<b>Allgemein</b>	<b>Gebäude</b>	<b>69</b>		<b>Referenzklassenräume</b>		
	Gebäude-ID:			Raum-ID:	69.a	
	Bundesland:	---		NF:	[m <sup>2</sup> ] 70,8	
	Baujahr:	1960		NRI:	[m <sup>3</sup> ] 230	
	Sanierungszeitraum:	2008 - 2010		Belegung	[n] 32	
	Sanierungsstandard:	EnEV 2007 - 30 %				
	Schüleranzahl:	[Personen/d] 876				
	Schulform:	---				
			<b>Bestand</b>	<b>saniert</b>	<b>Raum-ID:</b>	<b>69.b</b>
	A/V <sub>e</sub> -Verhältnis:	[-]	0,35	0,36	NF:	[m <sup>2</sup> ] 71
Beheiztes Volumen:	[m <sup>3</sup> ]	24.187	25.342	NRI:	[m <sup>3</sup> ] 231	
NGF (EBF):	[m <sup>2</sup> ]	6.406	6.701	Belegung	[n] 32	
w ärmeübertr. Umfassungfläche	[m <sup>2</sup> ]	8.511	9.042			

<b>Flächen</b>	<b>Gebäudehülle (DIN 277)</b>			<b>Zonierung (DIN 18599)</b>		
		<b>Bestand</b>	<b>saniert</b>		<b>Bestand</b>	<b>saniert</b>
	BGF [m <sup>2</sup> ]:	[m <sup>2</sup> ] 8.449	8.837	Klassenraum	[m <sup>2</sup> ] 3415	3490
	NRI [m <sup>3</sup> ]:	[m <sup>3</sup> ] 22.338	23.365	Verkehrsfläche	[m <sup>2</sup> ] 1987	2047
	NGF [m <sup>2</sup> ]:	[m <sup>2</sup> ] 7.182	7.477	Gruppenbüros	[m <sup>2</sup> ] 319	319
	NF [m <sup>2</sup> ]:	[m <sup>2</sup> ] 4.885	5.120	Sanitärflächen	[m <sup>2</sup> ] 334	346
	VF [m <sup>2</sup> ]:	[m <sup>2</sup> ] 2166	2226	Sonstige	[m <sup>2</sup> ] 351	499
	TF [m <sup>2</sup> ]:	[m <sup>2</sup> ] 131,05	131,05			
	A <sub>NGF</sub> /Person:	[m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> /Pers.]	8,2	8,5		
	V <sub>NRI</sub> /Person:	[m <sup>3</sup> <sub>NRI</sub> /Pers.]	25,5	26,7		

<b>Kosten</b>	<b>w ärmeübertragende Gebäudehülle (DIN V 18599)</b>			<b>U-WERT (DIN 6046)</b>		
		<b>Bestand</b>	<b>saniert</b>		<b>Bestand</b>	<b>saniert</b>
	Dach/Decken	[m <sup>2</sup> ] 2.201	2.462	[W/m <sup>2</sup> K]	0,4 - 1,4	0,1 - 0,3
	Außenw ände	[m <sup>2</sup> ] 2.581	2.662	[W/m <sup>2</sup> K]	1,3 - 3,2	0,2 - 0,5
	Fenster	[m <sup>2</sup> ] 1.584	1.536	[W/m <sup>2</sup> K]	2,8 - 5,2	1,3 - 1,7
	Fußboden	[m <sup>2</sup> ] 2.201	2.462	[W/m <sup>2</sup> K]	0,8 - 3,6	0,3 - 0,8
mittlerer U-Wert (HT')	---	---	---	[W/m <sup>2</sup> K]	1,84	0,43

<b>Investitionen</b>	<b>Investitionen (DIN 276)</b>			<b>Investitionen (Verteilung)</b>	
	Kosten (energetische Sanierung)	[€]	---	[%]	33,8%
	Kosten (Instandhaltung)	[€]	---	[%]	53,5%
	Baunebenkosten	[€]	---	[%]	12,8%
	<b>GESAMTKOSTEN</b>	[€]	---	[%]	100,0%

<b>Heizlast</b>	<b>absolute Heizlast (DIN EN 12831)</b>			<b>spezifische Heizlast (DIN EN 12831)</b>		
		<b>Bestand</b>	<b>saniert</b>		<b>Bestand</b>	<b>saniert</b>
	Transmissionsw ärmeverlust	[kW] 637	156	[W/m <sup>2</sup> ]	99	23
	Lüftungsw ärmeverlust (Infiltr.)	[kW] 67	23	[W/m <sup>3</sup> <sub>NRI</sub> ]	3	1
	Lüftungsw ärmeverlust (Mindestluftw ec	[kW] 319	80	[W/Pers.]	364	91
	Wiederaufheizleistung	[kW] 109	114	[W/m <sup>2</sup> ]	17	17
Normheizlast	[kW] 1.132	373	[W/m <sup>2</sup> ]	177	56	

<b>Beleuchtung</b>	<b>Bew ertungsleistung (DIN V 18599)</b>			<b>Beleuchtungsleistung (aufgenommen)</b>		
	Raum-ID	<b>Bestand</b>	<b>saniert</b>		<b>Bestand</b>	<b>saniert</b>
	69.a	[W/m <sup>2</sup> ] 11,19	9,02	[W/m <sup>2</sup> ]	---	6,37
	69.b	[W/m <sup>2</sup> ] 11,19	9,02	[W/m <sup>2</sup> ]	---	6,37

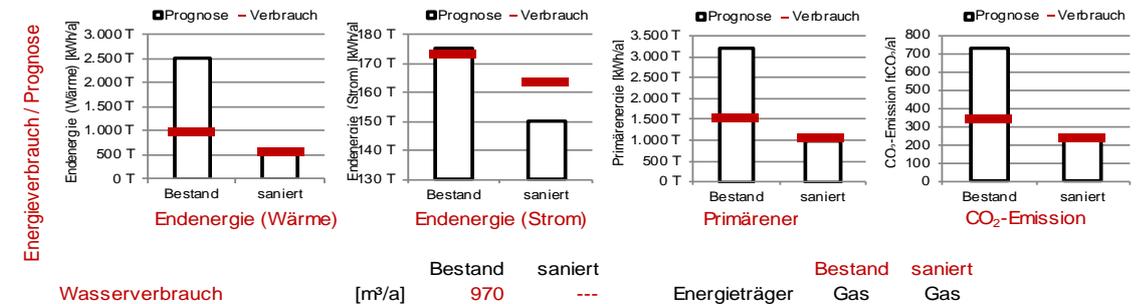


Abbildung 192 Steckbrief: Gebäude 69

### 13.1.15 Gebäude 78

<b>Allgemein</b>	<b>Gebäude</b>	<b>78</b>		<b>Referenzklassenräume</b>		
	Gebäude-ID:			Raum-ID:	78.a	
	Bundesland:	---		NF:	[m²]	66,7
	Baujahr:	1937		NRI:	[m³]	222
	Sanierungszeitraum:	2008 - 2010		Belegung	[n]	28
	Sanierungsstandard:	EnEV 2007 - 30 %				
	Schüleranzahl:	[Personen/d]	254			
	Schulform	---				
	A/V <sub>e</sub> -Verhältnis:	[-]	0,32	0,32	Raum-ID:	78.b
	Beheiztes Volumen:	[m³]	9.378	9.378	NF:	[m²]
NGF (EBF):	[m²]	2.382	2.382	NRI:	[m³]	219
w ärmeübertr. Umfassungfläche	[m²]	2.988	2.988	Belegung	[n]	26

<b>Flächen</b>	<b>Gebäudehülle (DIN 277)</b>				<b>Zonierung (DIN 18599)</b>			
			Bestand	saniert		Bestand	saniert	
	BGF [m²]:	[m²]	3001	3001	Klassenraum	[m²]	1358	1358
	NRI [m²]:	[m²]	7545	7545	Verkehrsfläche	[m²]	562	562
	NGF [m²]:	[m²]	2392	2392	Gruppenbüros	[m²]	123	123
	NF [m²]:	[m²]	1824	1824	Sanitärflächen	[m²]	133	133
	VF [m²]:	[m²]	562	562	Sonstige	[m²]	206	206
	TF [m²]:	[m²]	6	6				
	A <sub>NGF</sub> /Person:	[m² <sub>NGF</sub> /Pers.]	9,4	9,4				
	V <sub>NRI</sub> /Person:	[m³ <sub>NRI</sub> /Pers.]	29,7	29,7				

<b>Kosten</b>	<b>w ärmeübertragende Gebäudehülle (DIN V 18599)</b>				<b>U-WERT (DIN 6046)</b>		
			Bestand	saniert		Bestand	saniert
	Dach/Decken	[m²]	593	593	[W/m²K]	2,3	0,2
	Außenw ände	[m²]	1.501	1.501	[W/m²K]	1,2 - 3,6	0,2 - 0,3
	Fenster	[m²]	312	312	[W/m²K]	5,0	1,0
	Fußboden	[m²]	585	585	[W/m²K]	0,4 / 2,1	0,4 / 2,1
mittlerer U-Wert (HT')	---	---	---	[W/m²K]	2,54	0,42	

<b>Kosten</b>	<b>Investitionen (DIN 276)</b>				<b>Investitionen (Verteilung)</b>	
	Kosten (energetische Sanierung)	[€]	---	---	[%]	38,6%
	Kosten (Instandhaltung)	[€]	---	---	[%]	48,6%
Baunebenkosten	[€]	---	---	[%]	12,9%	
GESAMTKOSTEN	[€]	---	---	[%]	100,0%	

<b>Heizlast</b>	<b>absolute Heizlast (DIN EN 12831)</b>				<b>spezifische Heizlast (DIN EN 12831)</b>		
			Bestand	saniert		Bestand	saniert
	Transmissionsw ärmeverlust	[kW]	319	78	[W/m²]	134	33
	Lüftungsw ärmeverlust (Infiltr.)	[kW]	26	9	[W/m² <sub>NRI</sub> ]	3	1
	Lüftungsw ärmeverlust (Mindestluftw ec	[kW]	92	23	[W/Pers.]	362	91
	Wiederaufheizleistung	[kW]	40	40	[W/m²]	17	17
Normheizlast	[kW]	477	150	[W/m²]	200	63	

<b>Beleuchtung</b>	<b>Bew ertungsleistung (DIN V 18599)</b>				<b>Beleuchtungsleistung (aufgenommen)</b>		
			Bestand	saniert		Bestand	saniert
	Raum-ID				[W/m²]		
	78.a	[W/m²]	11,55	9,31	[W/m²]	10,09	8,45
78.b	[W/m²]	11,55	9,31	[W/m²]	9,54	7,99	

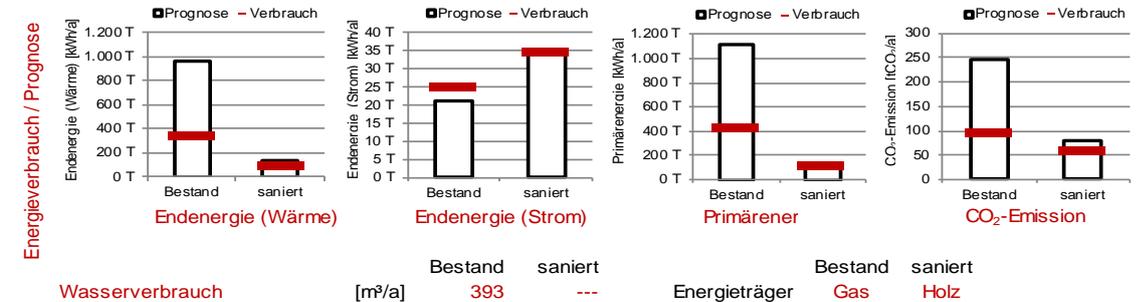


Abbildung 193 Steckbrief: Gebäude 78

### 13.1.16 Gebäude 81

<b>Allgemein</b>	<b>Gebäude</b>	<b>81</b>		<b>Referenzklassenräume</b>		
	Gebäude-ID:			Raum-ID:	81.a	
	Bundesland:	---		NF:	[m²] 76,8	
	Baujahr:	1972		NRI:	[m³] 227	
	Sanierungszeitraum:	2008 - 2009		Belegung	[n] 24	
	Sanierungsstandard:	EnEV 2007- 30 %				
	Schüleranzahl:	[Personen/d] 243				
	Schulform	---				
			Bestand	saniert	Raum-ID:	81.b
	A/V <sub>e</sub> -Verhältnis:	[-]	0,43	0,43	NF:	[m²] 76,5
Beheiztes Volumen:	[m³]	7.017	7.017	NRI:	[m³] 225	
NGF (EBF):	[m²]	1.907	1.907	Belegung	[n] 23	
w ärmeübertr. Umfassungfläche	[m²]	3.017	3.017			

	Gebäudehülle (DIN 277)				Zonierung (DIN 18599)				
		Bestand	saniert		Bestand	saniert		Bestand	saniert
	<b>Flächen</b>	BGF [m²]:	[m²] 2.310	2.310	Klassenraum	[m²] 981	981	Verkehrsfläche	[m²] 493
	NRI [m²]:	[m²] 5.538	5.538	Gruppenbüros	[m²] 135	135	Sanitärflächen	[m²] 73	73
	NGF [m²]:	[m²] 1.895	1.895	Sonstige	[m²] 225	225			
	NF [m²]:	[m²] 1.345	1.345						
	VF [m²]:	[m²] 480	480						
	TF [m²]:	[m²] 69,63	69,63						
	A <sub>NGF</sub> /Person:	[m² <sub>NGF</sub> /Pers.] 7,8	7,8						
	V <sub>NRI</sub> /Person:	[m³ <sub>NRI</sub> /Pers.] 22,8	22,8						

	w ärmeübertragende Gebäudehülle (DIN V 18599)				U-WERT (DIN 6046)				
		Bestand	saniert		Bestand	saniert		Bestand	saniert
	Dach/Decken	[m²] 799	799	[W/m²K]	0,6	0,19			
	Außenw ände	[m²] 946	946	[W/m²K]	0,9 - 3,1	0,2 - 0,3			
	Fenster	[m²] 457	457	[W/m²K]	2,0	1,0 - 1,2			
	Fußboden	[m²] 811	811	[W/m²K]	1,5 - 3,3	1,5 - 3,3			
	mittlerer U-Wert (HT')	---	---	[W/m²K]	0,89	0,51			

<b>Kosten</b>	Investitionen (DIN 276)				Investitionen (Verteilung)	
	Kosten (energetische Sanierung)	[€]	---		[%]	43,7%
	Kosten (Instandhaltung)	[€]	---		[%]	39,8%
	Baunebenkosten	[€]	---		[%]	16,5%
	<b>GESAMTKOSTEN</b>	[€]	---		[%]	100,0%

<b>Heizlast</b>	absolute Heizlast (DIN EN 12831)				spezifische Heizlast (DIN EN 12831)					
		Bestand	saniert		Bestand	saniert		Bestand	saniert	
	Transmissionsw ärmeverlust	[kW]	135	95	[W/m²]	71	50			
	Lüftungsw ärmeverlust (Infiltr.)	[kW]	19	6	[W/m² <sub>NRI</sub> ]	3	1			
	Lüftungsw ärmeverlust (Mindestluftw ec	[kW]	88	22	[W/Pers.]	362	91			
	Wiederaufheizleistung	[kW]	32	32	[W/m²]	17	17			
Normheizlast	[kW]	274	155	[W/m²]	144	81				

<b>Beleuchtung</b>	Bew ertungsleistung (DIN V 18599)				Beleuchtungsleistung (aufgenommen)				
	Raum-ID	Bestand	saniert		Bestand	saniert		Bestand	saniert
	81.a	[W/m²]	10,83	8,73	[W/m²]	---	8,13		
81.b	[W/m²]	10,83	8,73	[W/m²]	---	8,13			

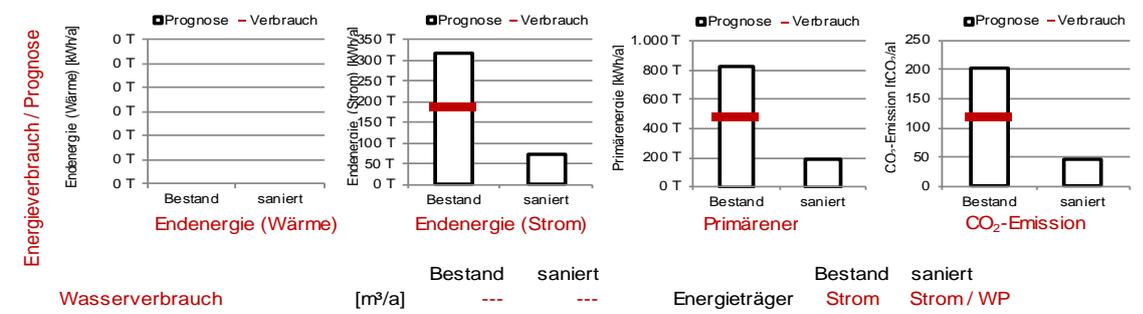


Abbildung 194 Steckbrief: Gebäude 81

### 13.1.17 Gebäude 82

<b>Allgemein</b>	<b>Gebäude</b>	<b>82</b>		<b>Referenzklassenräume</b>		
	Gebäude-ID:			Raum-ID:	82.a	
	Bundesland:	---		NF:	[m²]	73
	Baujahr:	1960		NRI:	[m³]	219
	Sanierungszeitraum:	2007 - 2009		Belegung	[n]	26
	Sanierungsstandard:	EnEV 2007 - 30 %				
	Schüleranzahl:	[Personen/d]	524			
	Schulform	---				
	A/V <sub>e</sub> -Verhältnis:	[-]	0,33	sanert	Raum-ID:	82.b
	Beheiztes Volumen:	[m³]	14.405	14.724	NF:	[m²]
NGF (EBF):	[m²]	3.730	3.817	NRI:	[m³]	223
w ärmeübertr. Umfassungfläche	[m²]	4.754	4.582	Belegung	[n]	24

<b>Flächen</b>	<b>Gebäudehülle (DIN 277)</b>			<b>Zonierung (DIN 18599)</b>				
		Bestand	sanert		Bestand	sanert		
	BGF [m²]:	[m²]	4.622	4.688	Klassenraum	[m²]	1853	1685
	NRI [m³]:	[m³]	11.407	11.569	Verkehrsfläche	[m²]	980	946
	NGF [m²]:	[m²]	3.800	3.854	Gruppenbüros	[m²]	204	204
	NF [m²]:	[m²]	2.732	2.819	Sanitärflächen	[m²]	159	159
	VF [m²]:	[m²]	940	907	Sonstige	[m²]	534	823
	TF [m²]:	[m²]	128	128				
	A <sub>NGF</sub> /Person:	[m² <sub>NGF</sub> /Pers.]	7,3	7,4				
	V <sub>NRI</sub> /Person:	[m³ <sub>NRI</sub> /Pers.]	21,8	22,1				

<b>Kosten</b>	<b>w ärmeübertragende Gebäudehülle (DIN V 18599)</b>			<b>U-WERT (DIN 6046)</b>			
		Bestand	sanert		Bestand	sanert	
	Dach/Decken	[m²]	1.108	1.025	[W/m²K]	0,5	0,2
	Außenw ände	[m²]	1.843	1.877	[W/m²K]	1,2	0,2
	Fenster	[m²]	691	652	[W/m²K]	2,8 - 3,0	1,1
	Fußboden	[m²]	1.108	1.025	[W/m²K]	0,8	0,8
mittlerer U-Wert (HT')	---	---	---	[W/m²K]	1,17	0,38	

<b>Kosten</b>	<b>Investitionen (DIN 276)</b>			<b>Investitionen (Verteilung)</b>	
		Bestand	sanert		
	Kosten (energetische Sanierung)	[€]	---	[%]	31,7%
	Kosten (Instandhaltung)	[€]	---	[%]	68,2%
Baunebenkosten	[€]	---	[%]	---	
GESAMTKOSTEN	[€]	---	[%]	100,0%	

<b>Heizlast</b>	<b>absolute Heizlast (DIN EN 12831)</b>			<b>spezifische Heizlast (DIN EN 12831)</b>			
		Bestand	sanert		Bestand	sanert	
	Transmissionsw ärmeverlust	[kW]	207	75	[W/m²]	55	20
	Lüftungsw ärmeverlust (Infiltr.)	[kW]	40	14	[W/m³ <sub>NRI</sub> ]	3	1
	Lüftungsw ärmeverlust (Mindestluftw ec	[kW]	191	48	[W/Pers.]	365	92
	Wiederaufheizleistung	[kW]	63	65	[W/m²]	17	17
Normheizlast	[kW]	501	202	[W/m²]	134	53	

<b>Beleuchtung</b>	<b>Bew ertungsleistung (DIN V 18599)</b>			<b>Beleuchtungsleistung (aufgenommen)</b>		
		Bestand	sanert		Bestand	sanert
	Raum-ID	[W/m²]	11,01	8,88	[W/m²]	---
82.a	[W/m²]	11,01	8,88	[W/m²]	10,82	9,06
82.b	[W/m²]	11,01	8,88	[W/m²]	---	---

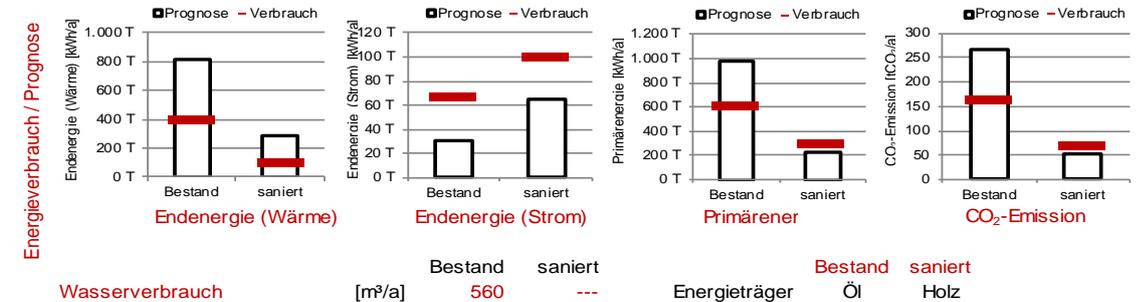


Abbildung 195 Steckbrief: Gebäude 82

## 13.2 Anhang: Fragebogen



### Fragebogen zum Thema:

#### „Methodik zur Erfolgskontrolle der Sanierung von Bildungsstätten“

(Dieser Fragebogen wird vertraulich und anonym behandelt)

#### 1. Zu Ihrer Position:

- 1.1 Name der Schule:
- 1.2 Welche Position vertreten Sie an der Schule?
- Schulleitung       Lehrer/in       Verwaltung       Schüler/in

#### 2. Allgemein:

- 2.1 **Sind Ihnen angestrebte Klimaschutzziele Deutschlands und evtl. des Schulträgers bekannt?**
- nein       ja und zwar:
- 2.2 **Würden Sie vor Baubeginn mit den Sanierungsmaßnahmen vertraut gemacht?**
- nein       ja und zwar:     Aushang       Rundschreiben       Veranstaltung
- 2.3 **Würden Sie, bzw. Ihre Meinung in die Sanierungsmaßnahmen und Entscheidungsfindungen eingebunden?**
- nein       ja und zwar

#### 3. Energieeinsparung:

- 3.1 **Sind Ihrer Meinung nach die Baumaßnahmen energetisch relevant?**
- nein       ja, vor allem:
- 3.2 **Haben Sie ein anderes Blickfeld durch die Sanierung auf das Thema „Energieeinsparung“ bekommen?**
- nein       ja
- 3.3 **Ist Ihnen der Energieverbrauch dieses Gebäudes wichtig?**
- nein       ja
- 3.4 **Tragen Sie zur Energieeinsparung innerhalb des Schulgebäudes bewusst bei?**
- nein       ja und zwar:
- 3.5 **Haben Sie durch evtl. Kosten und Energieeinsparungen durch den Gebäudebetrieb gewisse Vorteile?**
- nein       ja und zwar:     Beteiligung     Sachmittel       sonstige:

#### 4. Zum Unterricht:

- 4.1 **Werden Sie während der Sanierung in Ihrem Alltag im Gebäude eingeschränkt?**
- nein       ja und zwar:
- 4.2 **Ist das Thema der Energieeinsparung, z.B. durch Lüftungsdienste, etc. in den Schulalltag eingebunden.**
- nein       ja und zwar:
- 4.3 **Würden Sie ein Aufgreifen des Themas „Energieeinsparung“ in den Unterricht befürworten?**
- nein       ja und zwar:

Abbildung 196 Fragebogen: Vorderseite

