

Ein Überblick über die Potenziale von Schulgebäuden unter Berücksichtigung der Aspekte der Nachhaltigkeit.

Entwicklung eines Entscheidungshilfwerkzeuges für Kommunen zu nachhaltigen Sanierungsmaßnahmen von Schulgebäuden.

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades
M. Sc. Ressourceneffizientes und nachhaltiges Bauen
an der TUM School of Engineering and Design der Technischen
Universität München.

Betreut von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Werner Lang
M. Sc. Jonathan Woytowicz | M. Sc. Leander Präger
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

Eingereicht von Magdalena Anderer
Entenbachstraße 47
81541 München

Eingereicht am München, den 02.07.2024

Vereinbarung

zwischen

der Technischen Universität München, vertreten durch ihren Präsidenten,
Arcisstraße 21, 80333 München

hier handelnd der Lehrstuhl für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen
(Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Lang), Arcisstr. 21, 80333 München

– nachfolgend TUM –

und

Frau Magdalena Anderer
Entenbachstraße 47, 81541 München

– nachfolgend Autorin/Autor –

Die Autorin / der Autor wünscht, dass die von ihr/ihm an der TUM erstellte Masterarbeit
mit dem Titel

Ein Überblick über die Potenziale von Schulgebäuden unter Berücksichtigung der
Aspekte der Nachhaltigkeit.

Entwicklung eines Entscheidungshilfwerkzeuges für Kommunen zu nachhaltigen
Sanierungsmaßnahmen von Schulgebäuden.

auf mediaTUM und der Webseite des Lehrstuhls für Energieeffizientes und
Nachhaltiges Planen und Bauen mit dem Namen der Verfasserin / des Verfassers, dem
Titel der Arbeit, den Betreuer:innen und dem Erscheinungsjahr genannt werden darf.

in Bibliotheken der TUM, einschließlich mediaTUM und die Präsenzbibliothek des
Lehrstuhls für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen, Studierenden
und Besucher:innen zugänglich gemacht und veröffentlicht werden darf. Dies schließt
auch Inhalte von Abschlusspräsentationen ein.

mit einem Sperrvermerk versehen und nicht an Dritte weitergegeben wird.

Vereinbarung

Zu diesem Zweck überträgt die Autorin / der Autor der TUM zeitlich und örtlich unbefristet das nichtausschließliche Nutzungs- und Veröffentlichungsrecht an der Masterarbeit.

Die Autorin / der Autor versichert, dass sie/er alleinige(r) Inhaber(in) aller Rechte an der Masterarbeit ist und der weltweiten Veröffentlichung keine Rechte Dritter entgegenstehen, bspw. an Abbildungen, beschränkende Absprachen mit Verlagen, Arbeitgebern oder Unterstützern der Masterarbeit. Die Autorin / der Autor stellt die TUM und deren Beschäftigte insofern von Ansprüchen und Forderungen Dritter sowie den damit verbundenen Kosten frei.

Eine elektronische Fassung der Masterarbeit als pdf-Datei hat die Autorin / der Autor dieser Vereinbarung beigefügt. Die TUM ist berechtigt, ggf. notwendig werdende Konvertierungen der Datei in andere Formate vorzunehmen.

Vergütungen werden nicht gewährt.

Eine Verpflichtung der TUM zur Veröffentlichung für eine bestimmte Dauer besteht nicht.

Die Autorin / der Autor hat jederzeit das Recht, die mit dieser Vereinbarung eingeräumten Rechte schriftlich zu widerrufen. Die TUM wird die Veröffentlichung nach dem Widerruf in einer angemessenen Frist und auf etwaige Kosten der Autorin / des Autors rückgängig machen, soweit rechtlich und tatsächlich möglich und zumutbar.

Die TUM haftet nur für vorsätzlich oder grob fahrlässig verursachte Schäden. Im Falle grober Fahrlässigkeit ist die Haftung auf den vorhersehbaren Schaden begrenzt; für mittelbare Schäden, Folgeschäden sowie unbefugte nachträgliche Veränderungen der veröffentlichten Masterarbeit ist die Haftung bei grober Fahrlässigkeit ausgeschlossen.

Die vorstehenden Haftungsbeschränkungen gelten nicht für Verletzungen des Lebens, des Körpers oder der Gesundheit.

Meinungsverschiedenheiten im Zusammenhang mit dieser Vereinbarung bemühen sich die TUM und die Autorin / der Autor einvernehmlich zu klären. Auf diese Vereinbarung findet deutsches Recht unter Ausschluss kollisionsrechtlicher Regelungen Anwendung. Ausschließlicher Gerichtsstand ist München.

München, den 02.07.2024

München, den 02.07.2024

.....

.....

(TUM)

(Autorin)

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ort, Datum, Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Vereinbarung	I
Erklärung	III
Inhaltsverzeichnis	V
Kurzfassung	9
Abkürzungsverzeichnis	11
Glossar	13
1 Einleitung	17
1.1 Zielsetzung und Forschungshypothese	19
1.1.1 Abgrenzung der Arbeit.....	20
1.2 Methodik und Vorgehensweise	21
1.2.1 Methodik.....	21
1.2.2 Vorgehensweise	22
2 Stand der Technik und Forschung	23
2.1 Ökologisch Nachhaltige Sanierung.....	23
2.1.1 Energetische Aspekte der nachhaltigen Sanierung.....	24
2.1.2 Ökologische Aspekte der nachhaltigen Sanierung	32
2.1.3 Serielle Sanierung	40
2.2 Schulgebäudebestand in Deutschland.....	45
2.2.1 Quantitativer Überblick des Schulbaubestands.....	45
2.2.2 Entwicklung von Schulgebäuden im 19. Und 20. Jahrhundert	46
2.2.3 Aktuelle Situation von Schulgebäuden.....	50
2.2.4 Politische und rechtliche Rahmenbedingungen	56
2.3 Studien zur Schulgebäudesanierung	58
3 Entwicklung einer Typologie des Schulgebäudebestandes	61
3.1 Methodik.....	61
3.2 Klassifikation des Schulgebäudebestandes	62
3.2.1 Einteilung der Klassifikationskriterien.....	62
3.2.2 Definition der Gebäudetypen	65
3.3 Baukonstruktive Eigenschaften der Gebäudetypen	65
3.3.1 Bauweisen.....	66

3.3.2	Bestandskonstruktionen der BAK 2 und BAK 3.....	67
3.3.3	Wärmedurchgangskoeffizient der Bauteile.....	70
4	Entwicklung eines Sanierungskatalogs	71
4.1	Ziel und Methodik	71
4.1.1	Ziel des Sanierungskatalogs.....	71
4.1.2	Methodik.....	72
4.2	Beschreibung der Sanierungsmaßnahmen	73
4.2.1	Außenwand	74
4.2.2	Kelleraußenwand.....	78
4.2.3	Geschossdecke gegen unbeheizte Kellerräume	79
4.2.4	Erdberührter Boden	80
4.2.5	Geschossdecke zu unbeheizten Dachräumen	80
4.2.6	Flachdach.....	81
4.2.7	Fenster	84
4.3	Energetische Bewertung	85
4.3.1	Allgemeine bauphysikalische Anforderungen.....	85
4.3.2	Energetisches Anforderungsniveau der Sanierungsmaßnahmen.....	86
4.3.3	Bewertungskriterien	87
4.4	Ökologische Bewertung	88
4.4.1	Systemgrenzen.....	89
4.4.2	Dämmstoffwahl.....	90
4.4.3	Bewertungskriterien	95
4.5	Ökonomische Bewertung	98
4.5.1	Amortisationszeit der Sanierungsmaßnahme.....	98
4.5.2	Bewertungskriterien	100
5	Sanierungskatalog	103
5.1	Aufbau des Sanierungskatalogs.....	103
5.2	Handbuch des Sanierungskatalogs.....	105
5.3	Anwendung des Sanierungskatalogs - Projektbeispiel	107
5.3.1	Schwerpunkt der Sanierung.....	108
5.3.2	Bestandsanalyse	108
5.3.3	Vergleich der Sanierungsmaßnahmen.....	109
5.4	Erkenntnisse aus der Untersuchung	113

5.4.1	Energetische Bewertung.....	113
5.4.2	Ökologische Bewertung.....	114
5.4.3	Ökonomische Bewertung.....	115
6	Diskussion.....	119
6.1	Bewertung der Methodik.....	119
6.2	Eingeschränkte Datengrundlage.....	120
7	Fazit	123
7.1	Zusammenfassung und Verifizierung der Forschungshypothese	123
7.2	Ausblick.....	125
	Literaturverzeichnis.....	127
	Abbildungsverzeichnis.....	139
	Tabellenverzeichnis.....	141
	Anhang	143

Kurzfassung

Der Schulgebäudebestand in Deutschland weist aufgrund mangelhafter Zustände und hohem Energiebedarf einen erheblichen Sanierungsbedarf auf. Um dem Klimawandel entgegen zu wirken, bestrebt die Bundesregierung einen klimaneutralen Gebäudebestand bis 2050. In Anbetracht dessen, ist die Sanierung der bestehenden Schulgebäude zur Minimierung des Energiebedarfs und Reduzierung der CO₂-Emissionen essentiell. Die vorliegende Arbeit hat das Ziel, Kommunen künftig bei der Sanierung dieser Gebäude mit der Wahl geeigneter Sanierungsmaßnahmen zu unterstützen und damit einen Beitrag zur Erreichung der klimapolitischen Ziele zu schaffen.

Vor diesem Hintergrund wurde in der vorliegenden Arbeit ein Maßnahmenkatalog für die Sanierung der Gebäudehülle von sechs kategorisierten Schulgebäuden entwickelt. Dieser ist zur Bewertung der ökologischen, energetischen und ökonomischen Qualität der Sanierungsmaßnahmen am Schulgebäudebestand vorgesehen.

Dem Katalog liegt die Klassifizierung des Schulgebäudebestandes zugrunde, die insgesamt 13 Gebäudetypen anhand der Baualtersklasse, der Bauweise sowie dem Standort differenziert. Auf Basis dieser Einteilung werden entsprechende Sanierungsmaßnahmen in Abhängigkeit der bauphysikalischen und konstruktiven Eigenschaften festgesetzt.

Mit Hilfe des U-Wertes lassen sich die energetischen Einsparpotenziale der Maßnahme festhalten. Dabei erfolgt eine Differenzierung von zwei unterschiedlichen Energiestandards. Die ökologische Beurteilung erfasst anhand der Methodik der Ökobilanzierung die Umweltwirkungen der Indikatoren GWP, PE_{ges} sowie PE_{e/ges}. Die Untersuchung verschiedener Dämmstoffe ermöglicht einen Vergleich der Auswirkungen sowohl innerhalb der Sanierungsvariante als auch zu alternativen Maßnahmen. Ergänzend wird die Wirtschaftlichkeit der Sanierungsmaßnahmen durch die Ermittlung der Amortisationszeit bewertet.

Die Ergebnisse der Bewertungskategorien werden jeweils in Vergleichskennwerte transferiert und innerhalb einer Vergleichsskala bauteilbezogen oder -übergreifend definiert. Durch die Angabe der Kennwerte können Rückschlüsse auf die energetische,

ökologische und ökonomische Qualität der einzelnen Sanierungsmaßnahmen im Verhältnis zu alternativen Maßnahmen erhalten werden.

Der als Ergebnis dieser Arbeit entwickelte Maßnahmenkatalog präsentiert eine umfassende Auswahl und Bewertung geeigneter Sanierungsmaßnahmen. Seine Verwendung erzielt somit nicht nur eine Reduktion des Energieverbrauchs bestehender Schulgebäude, sondern fördert zudem die Etablierung eines klimaneutralen Gebäudebestandes sowie eine Entlastung der Kommunen.

Abkürzungsverzeichnis

ADP	.....	Abiotischer-Ressourcen-Verbrauch [kg SB-Äq.]
AP	.....	Versauerungspotenzial [kg SO ₂ -Äq.]
BAK	.....	Baualtersklasse
BKI	.....	Baukostenindex
BMWi	.....	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BNB	.....	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
BREEAM	.....	Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology
DDR	.....	Deutsche Demokratische Republik
DGNB	.....	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
EEWärmeG	.....	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EnEG	.....	Energieeinspargesetz
EnEV	.....	Energieeinsparverordnung
EP	.....	Eutrophierungspotenzial [kg PO ₄ -Äq.]
EPD	.....	Umweltproduktdeklaration
EPS	.....	Expandiertes Polystyrol
EU	.....	Europäische Union
GEG	.....	Gebäudeenergiegesetz, seit 01.11.2020 gültig
GWP	.....	Treibhausgaspotenzial [kg CO ₂ -Äq.]
IWU	.....	Institut Wohnen und Umwelt
KfW	.....	Kreditanstalt für Wiederaufbau
LCA	.....	Life Cycle Assessment; Synonym: Lebenszyklusanalyse/ Ökobilanzierung
LEED	.....	Leadership in Energy and Environmental Design

MNV	.....	Mehrkosten-Nutzungs-Verhältnis
NaWaRo	.....	Nachwachsende Rohstoffe
NWG	.....	Nichtwohngebäude
ODP	.....	Ozonabbaupotenzial [kg R11-Äq.]
PENRT | PE _{n.e.}	.....	Gesamte nicht-erneuerbare Primärenergie [MJ]
PERT | PE _{e.}	.....	Gesamte erneuerbare Primärenergie [MJ]
PET | PE _{ges.}	.....	Gesamte Primärenergie [MJ]
PLV	.....	Preis-Leistungs-Verhältnis
PUR	.....	Polyurethan-Hartschaum
PV	.....	Photovoltaik
VIP	.....	Vakuum-Isolationspaneel
WDVS	.....	Wärmedämm-Verbundsystem
XPS	.....	Extrudierstes Polystyrol

Glossar

Blower-Door-Test	Verfahren zur Ermittlung der Luftdichtheit eines Gebäudes und Bestimmung der Luftwechselrate anhand einer Druckdifferenz-Messung (Baunetz Wissen, 2024b).
CO ₂ -Äquivalent	Maßeinheit zum einheitlichen Vergleich der Klimawirkungen verschiedener Treibhausgas(Green Vision Solutions, 2023).
Effizienzstrategie	Teil der Nachhaltigkeitsstrategien zur Umsetzung einer nachhaltigen Entwicklung. Die Effizienz zielt auf eine optimierten Einsatz der Ressourcen, um mit weniger Input den gleichen Output zu erhalten (Scharke, 2023).
Gebäudeenergiegesetz (GEG)	Das „Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden“ formuliert die energetischen Anforderungen von Gebäuden, die Erstellung von Energieausweisen und den Einsatz erneuerbarer Energien in Gebäuden. Es trat 2020 in Kraft und ersetzt die bis dahin geltenden Regelwerke EnEG, EnEV und EEWärmeG (Baunetz Wissen, 2024d).
Glaser-Verfahren	Grundlage des Nachweisverfahrens zur Tauwasserbildung in einem Bauteil nach DIN 4108-3 zur Bewertung des Tauwasserrisikos (Baunetz Wissen, 2024f).
Gradtagzahl	Kennwert zur Berechnung des Heizwärmebedarfs eines Gebäudes. Die Gradtagzahl gibt die Summe der Temperaturdifferenzen zwischen Außentemperatur und Heizgrenztemperatur über einen bestimmten Zeitraum an (Deutscher Wetterdienst, 2024).
Graue Energie	Primärenergie, die sich während der Lebenszyklusphasen Herstellung, Nutzung und Entsorgung von eingesetzten Materialien ergibt (Gebäudeforum Klimaneutral, 2022).

GWP	Das Treibhauspotenzial (eng: Global Warming Potential) gibt den potenziellen Beitrag eines Stoffes zur Erwärmung der bodennahen Luftschichten an (BMI, 2017).
Konsistenzstrategie	Teil der Nachhaltigkeitsstrategien zur Umsetzung einer nachhaltigen Entwicklung. Die Konsistenz erzielt eine umweltfreundliche und kreislauffähige Verwendung von Produkten und Materialien (Scharke, 2023).
Ökobilanzierung	Methode zur Ermittlung und Beurteilung der stofflichen und energetischen Input-, Betriebs- und Outputflüsse sowie potenzieller Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebenszyklus (DIN EN ISO 14044:2021-02). Synonym: Lebenszyklusanalyse
PENRT	Die gesamte nicht-erneuerbare Primärenergie ist die Summe der verwendeten Primärenergie aus dem Bedarf an fossilen Rohstoffen (energetische und stoffliche Nutzung) (baubook, 2024a). [MJ]
PERT	Die gesamte erneuerbare Primärenergie ist die Summe der verwendeten Primärenergie aus dem Bedarf an erneuerbaren Ressourcen (Biomasse; energetische und stoffliche Nutzung) (baubook, 2024b). [MJ]
PET	Die gesamte Primärenergie ist die Summe aus der gesamten erneuerbaren und nicht erneuerbaren Primärenergie. [MJ]
Sanierung	In dieser Arbeit wird der Begriff mit der Veränderung und Verbesserung der bestehenden Gebäude zur Wiederherstellung eines akzeptablen Zustandes verstanden.
Suffizienzstrategie	Teil der Nachhaltigkeitsstrategien zur Umsetzung einer nachhaltigen Entwicklung. Die Suffizienz umfasst eine Optimierung des Ressourcenbedarfs durch Anpassungen des Nutzerverhaltens (Scharke, 2023).

U-Wert	Der Wärmedurchgangskoeffizient $[W/(m^2K)]$ dient als Maß zur energetischen Bewertung von Bauteilen. Er gibt die Wärmemenge an, die pro Zeiteinheit durch 1 m^2 Bauteilfläche bei einer Temperaturdifferenz von 1 Kelvin fließt (Giebeler et al., 2008). Je niedriger, desto höher der erreichbare Wärmeschutz (Sprengard et al., 2014).
Wärmeleitfähigkeit	Die Wärmeleitfähigkeit $\lambda\ [W/mK]$ beschreibt den Wärmestrom, der bei einer Temperaturdifferenz von 1 Kelvin durch eine 1 m^2 Fläche und 1 m Dicke eines Stoffes geht. Je kleiner, desto besser ist die Dämmwirkung eines Stoffes (Sprengard et al., 2014).

1 Einleitung

„Es ist nicht genug zu wissen, man muß auch anwenden; es ist nicht genug zu wollen, man muß auch tun.“ – Johann Wolfgang Goethe (Aphorismen, 2015).

Das Zitat von Johann Wolfgang Goethe spiegelt die aktuellen Herausforderungen im Bereich der bestehenden Schulgebäude wider. Es zeigt die Notwendigkeit neben theoretischen Vorschriften durch praktisches Handeln bei der Sanierung von Schulgebäuden tätig zu werden.

Die Schule trägt einen entscheidenden Stellenwert im Leben von Kindern und Jugendlichen, da sie dort einen Großteil ihrer Zeit verbringen (Gonzalo, 2009). Ihre Gesundheit sowie ihr Wohlbefinden steht demnach maßgeblich in Abhängigkeit des Schulgebäudes (Djahanschah et al., 2017; Großmann et al., 2023). Trotz dieser Relevanz weist der aktuelle Zustand des Schulgebäudebestandes erhebliche Mängel auf (Djahanschah et al., 2017), sodass das Sicherstellen dieser Aspekte sowie eine hochwertige Bildung häufig nicht gewährleistet werden kann (Kreditanstalt für Wiederaufbau [KfW], 2022).



Abbildung 1-1: Grundschule „FreiherrSpiegel“, Halberstadt; (Scholz, 2023)

Der Umfang von ca. 20.000 sanierungsbedürftigen Schulgebäude in Deutschland (Reiß et al., 2017) sowie ein Investitionsrückstand von etwa 47 Milliarden Euro (Brand & Salzgeber, 2023) machen den enormen Handlungsbedarf deutlich. Die Folgen der Vernachlässigung werden anhand der unzureichenden Zustände sowohl hinsichtlich ineffizienter Anlagentechniken als auch insbesondere einer mangelnden Bausubstanz der Gebäudehülle (vgl. Abbildung 1-1) sichtbar (Reiß et al., 2017). Dies resultiert nicht nur in einem hohen Energieverbrauch der Gebäude und folglich in hohen Kosten für die Kommunen (Gertis & Sedlbauer, 2010; Hebel et al., 2011), sondern beeinträchtigt zudem die Lernumgebung (Gonzalo, 2009; Reiß et al., 2017).

Vor dem Hintergrund des Klimawandels gewinnt die Sanierung des Gebäudebestandes zusätzlich an Bedeutung (Krötsch et al., 2024; Lattke et al., 2023). Der Gebäudebestand ist für ca. 40% des Endenergieverbrauchs und ca. 36% der Treibhausgasemissionen in der EU verantwortlich (Großmann et al., 2023). Die Bundesregierung verfolgt daher das Ziel eines klimaneutralen Gebäudebestandes bis 2050 (Bundesregierung, 2024). Einige Kommunen streben hierfür sogar einen früheren Zeitpunkt an, wie die Stadt München bis 2035 (Landeshauptstadt München, 2024). Eine ganzheitliche Sanierung zur Minimierung des Energiebedarfs und Reduzierung der CO₂-Emissionen ist hierfür unerlässlich (Gonzalo, 2009; Reiß et al., 2017). Für die Kommunen rückt dabei insbesondere der Schulgebäudebestand in den Fokus, da dieser überwiegend im öffentlichen Eigentum steht und ca. 18% aller öffentlichen Gebäude vertritt (Diedrich, 2018). Angesichts der Tatsache, dass etwa drei Viertel der Bildungseinrichtungen vor 1978 (Scharte, 2016) und somit vor Inkrafttreten der ersten Wärmeschutzverordnung errichtet wurden, bietet die Sanierung dieser Gebäude ein enormes Potenzial zur Umsetzung der klimapolitischen Ziele.

Die Institution Schule ist hierbei von besonderer Relevanz. Als Lernort für Kinder und Jugendliche prägt sie nicht nur das Umweltbewusstsein der künftigen Generationen, sondern ermöglicht zudem, wie kaum ein anderer Ort, eine großflächige Durchdringung der Gesellschaft (Beckel et al., 2004; Reiß et al., 2017). Durch die nachhaltige Sanierung des Schulgebäudebestandes übernimmt die öffentliche Hand eine Vorreiterrolle und erhält die Chance ihrer Vorbildfunktion gerecht zu werden (Beckel et al., 2004).

Es ist entscheidend, im Bereich der Schulsanierung mit konkretem Handeln tätig zu werden und die Kommunen hierbei zu unterstützen. Denn nur so kann sichergestellt werden, dass die Schulgebäude den Bedürfnissen der kommenden Generationen entsprechen und eine hochwertige Bildung ermöglichen.

1.1 Zielsetzung und Forschungshypothese

Aufbauend auf der genannten Problemstellung sowie der Motivation, die Kommunen künftig bei der Wahl geeigneter Sanierungsmaßnahmen an Schulgebäuden zu unterstützen, ergeben sich im Wesentlichen zwei Schwerpunkte der Arbeit.

Zum einen wird eine fundierte Datengrundlage zu den Sanierungspotenzialen von Schulgebäuden ermittelt. Dies umfasst sowohl einen ganzheitlichen Überblick über die nachhaltige Sanierung von Schulgebäuden, als auch die Erfassung und Kategorisierung des Gebäudebestandes sowie die Identifizierung von Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für den weiteren Schwerpunkt der Arbeit.

Ferner zielt die vorliegende Arbeit auf die Entwicklung eines Maßnahmenkatalogs, mit dem Informationen zu den Möglichkeiten der Sanierung sowie zu den Wirkungspotenzialen der einzelnen Sanierungsmaßnahmen aufgezeigt werden. Mit Hilfe der entwickelten Bewertungsmethodik werden hierzu bauteilspezifische bzw. bauteilübergreifende Kennwerte definiert, die anhand von fünf Kriterien die energetischen, ökologischen und ökonomischen Auswirkungen beschreiben. Unter Berücksichtigung der Energieeffizienz wird das energetische Einsparpotenzial anhand der Verbesserung des bestehenden U-Werts dargestellt. Aus ökologischer Sicht werden drei Umweltindikatoren zur Bewertung herangezogen: der Einsatz der gesamten Primärenergie, der Anteil an erneuerbarer Primärenergie am Gesamtenergieeinsatz und das Treibhausgaspotenzial (GWP). Darüber hinaus wird die Ökonomie der Maßnahme mittels der Amortisationszeit berücksichtigt. Diese Kennwerte erzielen eine erste Abschätzung der energetischen, ökologischen und ökonomischen Qualitäten unterschiedlicher Sanierungsmaßnahme.

Mit dem Ziel, Kommunen und EntscheidungsträgerInnen künftig bei der Wahl von passenden Sanierungsmaßnahmen an Schulgebäuden zu unterstützen, werden die aufgezeigten Informationen auf Grundlage des kategorisierten Gebäudebestandes benutzerfreundlich und übersichtlich präsentiert. Anhand der verschiedenen Szenarien kann eine passende Sanierungsstrategie ausgewählt werden. Darauf basierend können Kommunen im weiteren Vorgehen die Maßnahme auf das jeweilige Gebäude anwenden und die Sanierung gebäudespezifisch ausarbeiten.

Es ist von hoher Bedeutung den Entscheidungsprozess für Kommunen zu vereinfachen und einen Überblick über bauteilspezifische Optionen und Lösungen einer nachhaltigen

Sanierung für Schulgebäude zu bieten, um so zugleich einen klimaneutralen Gebäudebestand, die Reduzierung des Energieverbrauchs sowie eine Entlastung der Kommunen zu erreichen.

Aus der genannten Zielsetzung resultiert im Rahmen der vorliegenden Arbeit die folgende Forschungshypothese:

„Mit Hilfe der Entwicklung von einem Maßnahmenkatalog und der Ableitung entsprechender Kennwerte lässt sich die ökologische, energetische und ökonomische Qualität von Sanierungsmaßnahmen am Schulgebäudebestand auf Bauteilebene bewerten. Zudem lassen sich Handlungsempfehlungen in Bezug auf die Sanierung zur Umsetzung eines klimaneutralen Gebäudebestandes, sowie die Reduzierung des Energieverbrauchs ableiten.“

Die Forschungshypothese wird in Kapitel 7.1 abschließend verifiziert oder gegebenenfalls falsifiziert.

1.1.1 Abgrenzung der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit werden neben den ökologischen Umweltindikatoren GWP, PERT und PET zudem das energetische Einsparpotenzial sowie die ökonomischen Aspekte, in Form der Amortisationszeit, von Sanierungsmaßnahmen fokussiert. Die Ermittlung von Ersteren erfolgt anhand einer Ökobilanzierung gemäß DIN EN ISO 14040/44 bzw. DIN EN 15804 und DIN EN 15978. Weitere Umweltindikatoren werden hierbei nicht betrachtet. In Abgrenzung an bestehende Werkzeuge, wie das Ökobilanzierungstool eLCA des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), werden mit den zuvor genannten Aspekten Informationen über die Angaben der Umweltwirkungen der Bauteile hinaus dargestellt.

Die Ermittlung typischer Baukonstruktionen im Schulbau wird anhand einer umfassenden Datengrundlage angestrebt. Informationslücken bezüglich genauen Schichtaufbauten und verwendeten Materialien werden durch fundierte Annahmen geschlossen. Hierbei wird von dem Ausgangszustand der baualterstypischen Konstruktionsaufbauten ausgegangen und Veränderungen der ursprünglichen Konstruktion aufgrund unzureichender Angaben in der Literatur nicht berücksichtigt.

1.2 Methodik und Vorgehensweise

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Methoden zur Erreichung der Zielsetzung verwendet. Im folgenden Abschnitt werden diese sowie die Vorgehensweise aufgezeigt.

1.2.1 Methodik

Ein wesentlicher Bestandteil zu Beginn der Arbeit liegt in einer umfangreichen Literaturrecherche zur Grundlagenermittlung im Bereich der nachhaltigen Sanierung, der bestehenden Gebäudestrukturen von Schulgebäuden sowie potenziellen Sanierungsmaßnahmen. Hierfür wird eine systematische Literaturrecherche verwendet. Die jeweiligen relevanten Ergebnisse wurden zusammengetragen und einer kritischen Bewertung hinsichtlich ihrer Qualität unterzogen. Durch die Synthese der Literatur konnten Forschungslücken identifiziert und genannt werden. Diese Herangehensweise bildet eine fundierte, theoretische Grundlage für die Arbeit. Darüber hinaus wurden erfolgreich umgesetzte Sanierungsprojekte von Schulen analysiert, um Erkenntnisse zu Bestandskonstruktionen und bewährten Praktiken zu erhalten. Die qualitative Analyse der Bestandsprojekte umfasst das Erheben der relevanten Themen und Techniken in Bezug auf die Gebäudehülle. Diese Methode ist bedeutend für den Transfer auf den Gebäudebestand sowie Sanierungsmaßnahmen künftiger Gebäude.

Darauf aufbauend wurde eine Methodik zur Entwicklung eines Maßnahmenkatalogs erarbeitet. Die Ergebnisse der vorherigen Herangehensweisen werden zu möglichen Sanierungsszenarien zusammengetragen. Für die ökologische Bewertung der Sanierungsmaßnahmen kam die Methodik der Ökobilanzierung mittels dem Softwaretool eLCA zum Einsatz. Zur Bewertung der Ökonomie wurde eine Methode zur Ermittlung der Amortisationszeit verwendet. Die Anwendung des Katalogs wird abschließend mit einem Proof-of-Concept aufgezeigt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Arbeit nach der Bottom-Up-Methode erfolgt und sich von Datensammlungen und konkreten Fallstudien hin zu allgemeinen Prinzipien entwickelt.

1.2.2 Vorgehensweise

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit ist in fünf Schritte zu untergliedern. Als Einführung in die Thematik werden im nachfolgenden Kapitel die wesentlichen Grundlagen der nachhaltigen Sanierung aufgezeigt. Vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeit werden hierzu insbesondere die energetischen und ökologischen Aspekte thematisiert. Des Weiteren wird ein umfassender Überblick des Schulgebäudebestands in Deutschland gegeben.

Auf Basis der Grundlagenermittlung erfolgt im zweiten Teil der Arbeit die Erstellung einer Gebäudetypologie des Schulgebäudebestandes. Hierbei handelt es sich um eine Typisierung mittels spezifischer Kriterien. Das Kapitel beschreibt neben der Einteilung ebenfalls die baukonstruktiven Eigenschaften der definierten Gebäudetypen.

Aufbauend auf der Identifikation des Bestandes können die einzelnen Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle ermittelt, beschrieben und bewertet werden. Das dritte Kapitel erläutert die angewandte Methodik zur Erstellung eines Maßnahmenkatalogs im Detail und bildet damit einen Schwerpunkt dieser Arbeit.

Der darauffolgende Teil präsentiert das Ergebnis der Arbeit: einen Sanierungskatalog. Zudem beinhaltet er das Aufzeigen der Umsetzbarkeit anhand eines Anwendungsbeispiels sowie wesentliche Erkenntnisse aus den Untersuchungen.

Abschließend erfolgen im fünften Abschnitt eine kritische Auseinandersetzung und Einordnung der Ergebnisse der Arbeit vor dem Hintergrund bestehender Einschränkungen.

2 Stand der Technik und Forschung

Der Fokus der Literaturrecherche zum Stand der Technik und Forschung liegt im Bereich der Sanierung von Schulgebäuden unter Berücksichtigung der ökologischen Nachhaltigkeit. Dabei werden die Aspekte der energetischen und ökologischen Sanierung sowie die Analyse des aktuellen Schulgebäudebestandes in Deutschland besonders beachtet.

2.1 Ökologisch Nachhaltige Sanierung

Im Kontext der aktuellen klimapolitischen Herausforderungen der Baubranche und der dringenden Notwendigkeit einer Umstrukturierung in ein kreislauffähiges System gewinnt nicht nur das nachhaltige Bauen, sondern dieses insbesondere in Zusammenhang mit der Ertüchtigung des Gebäudebestands an Bedeutung (Krötsch et al., 2024). Aufgrund der Vorbildfunktion von Kommunen ist dies speziell im Bereich der Schulgebäudesanierung von enormer Priorität (Beckel et al., 2004).

Nachhaltigkeit steht hierbei im Zentrum der Handlungsprinzipien und umfasst eine gleichberechtigte Berücksichtigung der in Wechselwirkung zueinanderstehenden drei Säulen „Ökologie, Ökonomie und Soziokulturelles“. Dieses Konzept dient seit Jahren als allgemein anerkannte Leitlinie für eine zukunftsfähige Entwicklung, welche den heutigen Bedürfnissen gerecht wird und den Erhalt einer intakten Umwelt sowie gleicher Lebenschancen zukünftiger Generationen gewährleistet. Insbesondere im Bauwesen ist dies im Hinblick auf die Ressourcennutzung und die resultierenden Umweltwirkungen essenziell und erfordert eine ganzheitliche Betrachtung der ökologischen, ökonomischen und soziokulturellen Aspekte (Beckel et al., 2004; BMUB, 2014; Stahr et al., 2022). Im Rahmen dieser Arbeit und der Untersuchung einer nachhaltigen Sanierung wird der Schwerpunkt des nachhaltigen Bauens auf die ökologische Nachhaltigkeit gelegt. Zu den Schutzziele in diesem Bereich zählen die Ressourcenschonung durch den optimierten Einsatz von Baumaterialien sowie die Minimierung des Energieverbrauchs, mit dem Ziel einer Reduktion von

Umweltbelastungen über den gesamten Lebenszyklus (BMI, 2019; Fouad, 2023; Stahr et al., 2022).

Für die Erreichung nachhaltiger Ziele basiert die praktische Umsetzung auf drei zentralen Strategien: Effizienz, Konsistenz und Suffizienz. Die Integration dieser Strategien in alle Aspekte der Nachhaltigkeit ist entscheidend für eine langfristig nachhaltige Entwicklung. In Bezug auf eine ökologisch nachhaltige Sanierung umfasst das Effizienzprinzip insbesondere im Bereich der energetischen Sanierung den optimierten Einsatz von Ressourcen und die Minimierung des Energieverbrauchs. Ergänzend findet die Konsistenz Berücksichtigung bei den ökologischen Aspekten hinsichtlich der Verwendung erneuerbarer Ressourcen sowie umweltschonender Baustoffe. Die Suffizienz beinhaltet dabei die Einsparung von Ressourcen durch eine Veränderung der ursprünglichen Notwendigkeit sowie eine Anpassung des Nutzerverhaltens. Eine ganzheitliche Betrachtung sowohl der Kriterien als auch der Strategien ist für eine nachhaltige Sanierung essenziell (Gonzalo, 2009; Krüger, 2010; Scharke, 2023).

In diesem Kapitel werden im Hinblick auf die ökologische Nachhaltigkeit von Sanierungsmaßnahmen die Effizienz- und Konsistenzstrategie mit den übergeordneten Aspekten der Energieeffizienz und Ökologie beleuchtet. Gonzalo (2009) hebt die Bedeutung dieser Aspekte ebenfalls als zentrale Ziele einer Schulbausanierung hervor (Gonzalo, 2009). Bei der Kombination von sowohl ökologischen als auch energetisch effizienten Sanierungsmethoden spielt die Serielle Sanierung eine bedeutende Rolle und wird aufgrund ihres großen Potenzials ergänzend in diesem Kapitel behandelt.

2.1.1 Energetische Aspekte der nachhaltigen Sanierung

Angesichts der anzustrebenden Klimaziele der Bundesregierung und vor dem Hintergrund des hohen Energiebedarfs der Baubranche liegt seit einigen Jahren der Schwerpunkt sowohl beim Neubau als auch beim Bauen im Bestand auf der energieeffizienten Bauweise bzw. Gebäudesanierung (Giebeler et al., 2008; Stahr et al., 2022), dies gilt auch für den Schulbau (Giebeler et al., 2008; Haselsteiner et al., 2010; MSJG, 2017; Reiß et al., 2017). Die energetische Sanierung der Bestandsgebäude stellt hierfür nicht nur eine zentrale, sondern auch dringlichste Maßnahme zur Reduzierung der Umweltwirkungen dar. Die Effizienzsteigerung im Gebäudebestand zählt als wichtiger Aspekt der Energiewende (Krötsch et al., 2024). Insbesondere der

Gebäudebestand, welcher vor der ersten Wärmeschutzverordnung 1977 errichtet wurde, bietet hier großes Potenzial für Einsparungen (Giebeler et al., 2008). Ziel der energetischen Sanierung ist es, mittels unterschiedlicher Maßnahmen den Energiebedarf zu reduzieren, die Energieeffizienz zu verbessern und den Einsatz erneuerbarer Energien zu fördern. Eine Kombination dieser Maßnahmen trägt nicht nur zur Reduktion der CO₂-Emissionen und zur Schonung fossiler Ressourcen bei, sondern auch zur Senkung der Betriebskosten sowie der Verbesserung des Innenraumkomforts. (BBSR & BMI, 2020; Giebeler et al., 2008; Gonzalo, 2009)

Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz

Für eine langfristig nachhaltige Steigerung der Energieeffizienz ist es entscheidend, die einzelnen Maßnahmen im Gesamtkontext zu betrachten. Dies schließt neben Maßnahmen an der Gebäudehülle zudem die Anlagentechnik, die Nutzung sowie das Gebäudemanagement ein (Haselsteiner et al., 2010). Insbesondere die ersteren beiden Aspekte bieten erhebliches Potenzial zur Energieeinsparung (Eßmann et al., 2022). Eine ganzheitliche Herangehensweise stellt sicher, dass mit einem innovativen und integralen Ansatz den neuen Herausforderungen effektiv begegnet werden kann (Österreicher, 2015).

Reduktion des Energiebedarfs: Maßnahmen an der Gebäudehülle

Der erste Schritt zur nachhaltigen Sanierung ist die Reduktion des Heizenergiebedarfs der bestehenden Gebäude. Aufgrund der hohen Effektivität von Dämmmaßnahmen in diesem Bereich, erhält die Gebäudehülle hier eine bedeutende Rolle. Insbesondere Schulgebäude verfügen diesbezüglich bedingt durch einen veralteten und mangelhaften Zustand über enorme Einsparpotenziale (Haselsteiner et al., 2010; Reiß et al., 2017). Diese werden in Kapitel 2.2.3 im Rahmen des Schulgebäudebestandes in Deutschland detaillierter aufgezeigt.

Als wesentliches Ziel zählt die Reduzierung der Wärmeströme zwischen dem Innen- und Außenbereich (Giebeler et al., 2008). Neben Dämmmaßnahmen zählt zudem die Optimierung der Hüllfläche durch das Erzeugen einer luftdichten Gebäudehülle und dem Vermeiden von konstruktiven Wärmebrücken als relevante Maßnahme (Eßmann et al., 2022; Haselsteiner et al., 2010). Eine erhöhte Luftdichtheit verhindert den Wärmeverlust durch unkontrollierte Luftströmungen und umfasst das Abdichten von Fugen und den Einsatz luftdichter Konstruktionen. Darüber hinaus ist der Einbau neuer Fenster sowie das Anbringen eines sommerlichen Wärmeschutzes essenziell (Eßmann et al., 2022).

Die spezifisch geltenden bauphysikalischen Anforderungen an die Konstruktion werden im nachfolgenden Abschnitt aufgezeigt.

Im Bereich der Fassadendämmung gibt es eine Vielzahl an möglichen Sanierungsmaßnahmen. Das Anbringen eines Wärmedämmverbundsystems (WDVS) stellt seit den 1970er Jahren bis heute die in Deutschland meist verbreitete Konstruktion der energetischen Außenwandsanierung dar. Dies ist zum Großteil in den deutlich geringeren Herstellungskosten im Vergleich zu anderen Maßnahmen, wie die vorgehängte, hinterlüftete Fassade, begründet. Hinsichtlich der ökologischen und technischen Qualität schneiden andere Systeme jedoch besser ab (Krötsch et al., 2024). Eine innovative Methode der Gebäudesanierung stellt beispielsweise das Serielle Sanieren dar, welches in Kapitel 2.1.3 erläutert wird.

Verbesserung der Effizienz: Gebäudetechnische Anlagen und Integration erneuerbarer Energien

Ergänzend zu den Maßnahmen der Gebäudehülle besteht großes Verbesserungspotenzial hinsichtlich der Effizienzsteigerung gebäudetechnischer Anlagen (Eißmann et al., 2022). Die Maßnahmen umfassen alle technischen Systeme, die zur Versorgung eines Gebäudes dienen. Dazu zählen sowohl Heizungs- und Kühlungssysteme als auch Lüftungsanlagen zur Wärmerückgewinnung (Baunetz Wissen, 2024e).

Darüber hinaus ist die Integration von erneuerbaren Energien vor dem Hintergrund der internationalen und nationalen Klimaziele essenziell. Die Technologien umfassen dabei beispielsweise den Einsatz von Solarenergie, entweder elektrisch (Photovoltaik) oder thermisch (Solarthermie), Umgebungswärme mittels Wärmepumpen sowie biogene Brennstoffe (Stahr et al., 2022). Aufgrund der steigenden CO₂-Abgaben wird die Verwendung erneuerbarer Energien zunehmend an Bedeutung gewinnen. Dies reduziert den Sanierungsdruck bezüglich der Dämmung der Gebäudehülle, da bereits der Energieträger für ein verbessertes Gesamtergebnis der Primärenergie und CO₂-Emissionen sorgt (Stahr et al., 2022). Dennoch werden Dämmmaßnahmen am Gebäudebestand zum einen aufgrund bautechnischer Verbesserungen benötigt. Des Weiteren sind auch die Ressourcen erneuerbarer Energien nicht kostenlos verfügbar. Die Integration von Solarenergie kann bei unsanierten Gebäuden lediglich einen kleinen Anteil der notwendigen Energie erzeugen. Nur eine effiziente Kombination aus der Integration erneuerbarer Energien, moderne Anlagentechnik und verbesserter Gebäudehülle führen langfristig zur nachhaltigen Entwicklung (dena, 2022).

Die beiden Maßnahmenkategorien stehen in engem Zusammenhang. Beispielsweise wird der Heizbedarf durch eine verbesserte Gebäudehülle grundsätzlich reduziert mit folglich Auswirkungen auf die Heizungsanlagen (Botzler et al., 2017; Eßmann et al., 2022). Eine optimale Abstimmung ist bedeutend für den Erfolg einer energetischen Sanierung.

Nutzungsoptimierung

Zusätzlich zu den baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen ist der Einfluss des Nutzerverhaltens als entscheidender Faktor zu nennen, um mittels der Suffizienzstrategie maximale Einsparungs- und Effizienzpotenziale zu erreichen. Insbesondere das Lüftungs- und Heizverhalten der Nutzenden ist für die Energieeinsparung von Bedeutung, da es sich erheblich auf den tatsächlichen Verbrauch auswirkt (Eßmann et al., 2022). Schulungen und Informationskampagnen bieten wichtige Methoden zur Sensibilisierung der Nutzenden (Krüger, 2010). Am Beispiel von Schulgebäuden könnte dies in den Verantwortungsbereich der Lehrkräfte fallen.

Bauphysikalische Anforderungen/ Grundlagen

Neben den gesetzlichen Anforderungen durch das Gebäudeenergiegesetz, welche im Anschluss aufgezeigt werden, sind in Rahmen einer energetischen Sanierung zudem die geltenden bauphysikalischen Anforderungen zu berücksichtigen (Botzler et al., 2017; Giebeler et al., 2008; Stahr, 2019).

Folgende Normen definieren die Bauteilanforderungen (Botzler et al., 2017):

- Wärme- und Feuchteschutzanforderungen nach DIN 4108-2/ -3
- Luftdichtheitsanforderungen nach DIN 4108-7
- Schallschutzanforderungen nach DIN 4109-1
- Brandschutzanforderungen nach DIN EN 13501-1/ -2 bzw. DIN 4102-1.

Wärme- / Feuchteschutz und Luftdichtheit

Die bauphysikalischen Untersuchungen stehen bezüglich der Anforderungen an den Wärme- sowie Feuchteschutz in engem Zusammenhang zueinander und werden zum Vermeiden von Baumängeln gemeinsam betrachtet. Mit den Vorgaben werden bauliche Mindestanforderungen festgelegt, um einen angemessenen Schutz hinsichtlich Wärme- und Feuchtetransport sicherzustellen. Hierdurch wird auf die Minimierung von Wärmeverlusten und das Vermeiden von Kondenswasserbildung abgezielt, um ein behagliches Innenraumklima zu gewährleisten (Stahr, 2019). Darüber hinaus umfasst der Wärmeschutz zudem Anforderungen an die Luftdichtheit der Bauwerksanschlüsse

sowie die Wärmebrückenbetrachtung. Ersteres ist entscheidend zur Reduzierung der Lüftungswärmeverluste und wird mittels dem Blower-Door-Test überprüft (Diedrich, 2018; Scharte, 2016). Zu den wichtigen Kenngrößen des Wärmeschutzes zählen die Wärmeleitfähigkeit, der Wärmedurchgangswiderstand und der U-Wert (Stahr, 2019). Letzterer dient zur Vergleichbarkeit der wärmeschutztechnischen Qualität von Bauteilen (Giebeler et al., 2008) und spielt bei den weiterführenden Untersuchungen in dieser Arbeit eine entscheidende Rolle. Die Anforderungen des Feuchteschutzes sind essenziell für die Vermeidung von eindringender Feuchtigkeit in das Gebäude, den Regenschutz der Fassade sowie die Tauwasserbildung an Oberflächen oder im Inneren von Bauteilen (Stahr, 2019). Ein rechnerischer Nachweis von Tauwasserausfall erfolgt anhand des Glaser-Verfahren (Baunetz Wissen, 2024f).

Im Hinblick auf den Klimawandel sind die Anforderungen an den sommerlichen Wärme- und Sonnenschutz besonders zu berücksichtigen. Neben den Anforderungen der DIN 4108-2 fordert ebenfalls das Gebäudeenergiegesetz (GEG) 2023 den Nachweis eines ausreichenden sommerlichen Wärmeschutzes. Die Einflusskriterien sind im Wesentlichen abhängig von gebäudespezifischen Gegebenheiten wie der Fassadenorientierung, der Fensterflächenanteile, der Lüftung und der Speichermasse sowie der Klimaregion (Baunetz Wissen, 2024k).

Schallschutz

Im Wesentlichen ist der Aufgabenbereich des Schallschutzes in zwei Bereiche zu gliedern. Zum einen ist die Integration von Baumaßnahmen hinsichtlich dem Luftschall zur Reduktion des Schalldurchgangs durch die Bauteile. Dies umfasst den Einfluss von äußeren Lärmquellen, wie beispielsweise Straßenlärm, sowie dem Schutz vor Innenlärm der angrenzenden Umgebungsflächen. Zum anderen dienen Raumakustikmaßnahmen zur Verringerung des Schalls im Raum selbst für eine bessere Akustik. Ergänzend der Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle beinhaltet dies zudem die einzelnen Geschosdecken hinsichtlich einer Erneuerung des Fußbodenaufbaus, um eine Verbesserung des Trittschalls zu erreichen (Diedrich, 2018; Haselsteiner et al., 2010; Stahr, 2019). Die gesetzlichen Mindestanforderungen hierzu werden in DIN 4109 definiert. Das Beiblatt 2 umfasst dabei Anwendungsbeispiele zur Verbesserung des Schallschutzes (Stahr, 2019). Insbesondere in Schulgebäuden stellt Lärm einen großen Stressfaktor für die Nutzenden dar. Maßnahmen zur Verbesserung des äußeren Schallschutzes und der Raumakustik spielen eine wichtige Rolle (Ecophon Saint-Gobain).

Brandschutz

Der Brandschutz steht sowohl mit dem Schall- als auch dem Wärmeschutz in Zusammenhang und stellt neben den bisher genannten Aspekten eine weitere bauphysikalische Anforderung dar. Neben der Sicherstellung von gesetzlichen Flucht- und Rettungswegen zählt die Verhinderung der Entstehung und Ausbreitung von Feuer innerhalb des Gebäudes zu den wesentlichen Aufgaben des Brandschutzes. Grundsätzlich werden Baustoffe nach DIN 4102-1 hinsichtlich ihrer Brennbarkeit klassifiziert. In dem europäischen Klassifizierungssystem erfolgt die Einteilung in Euroklassen A bis F nach DIN EN 13501 mit zusätzlichen Angaben der Brandnebenerscheinungen (Stahr, 2019). Die Anforderungen an den Brandschutz ergeben sich aus der Musterbauverordnung (MBO) sowie in Abhängigkeit sowohl länder- als auch gebäudespezifisch Vorgaben (Djahanschah et al., 2017). Bei Schulgebäuden handelt es sich gemäß der MBO §2 (4) um geregelte Sonderbauten. Für den Bau und Betrieb von allgemeinbildenden und berufsbildenden Schulen regelt die Muster-Schulbau-Richtlinie (MSchulbauR) besondere Anforderungen und Erleichterungen bezüglich dem Brandschutz (Baunetz Wissen, 2024j).

Eine ganzheitliche Berücksichtigung der bauphysikalischen Anforderungen ist für die nachhaltige Qualität der Gebäude von hoher Bedeutung. Insbesondere hinsichtlich der zunehmenden wärmetechnischen Maßnahmen, der Minderung von Bauschäden sowie der Sicherstellung der thermischen Behaglichkeit ist die bauphysikalische Beurteilung relevant (Baunetz Wissen, 2024a).

Gesetzlicher Rahmen zur energetischen Gebäudesanierung

In Bezug auf das Nachhaltigkeitskriterium ‚Energie‘ bestehen eine Vielzahl an Vorschriften auf verschiedenen Gesetzesebenen. Während auf EU-Ebene die Regulierung primär durch die EU-Gebäuderichtlinie erfolgt (Großmann et al., 2023), stellt auf nationaler Ebene das GEG die ordnungsrechtlichen Anforderungen hinsichtlich der energetischen Qualität von Gebäuden. Das GEG ist im November 2020 in Kraft getreten und löste damit die seit 2002 geltende Energieeinsparverordnung (EnEV) ab. Es führt die Anforderungen der drei bis dahin separaten Regelwerke EnEV, Energieeinspargesetz (EnEG) und Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) zusammen (Stahr et al., 2022). Ergänzend zu Letzterem setzen einzelne Bundesländer den Einsatz erneuerbarer Energien teilweise mit spezifischeren Regelungen fest (Großmann et al., 2023). Letztes Jahr erfolgte eine Novellierung des GEG, welche im Januar 2024 wirksam wurde (Tuschinski, 2024).

Die nationale Gesetzgebung betrifft sowohl Neubauten als auch bestehende Wohn- und Nichtwohngebäude (GEG 2024, Abschnitt 3, §§ 46 bis 51). Neben dem verpflichteten Effizienzstandard von Gebäuden zählen die Vorgaben hinsichtlich dem Energieausweis sowie dem Einsatz erneuerbarer Energien zum Aufgabenbereich des GEG. Für Maßnahmen an bestehenden Gebäuden fordert die Gesetzgebung die Einhaltung vorgegebener Mindestwerte für Transmissionswärmeverluste und Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) von Bauteilen, die im Zuge einer Sanierung verändert werden (GEG 2024 Anlage 7). Zudem existieren weitere Anforderungen bezüglich dem Primärenergiebedarf für der technischen Anlagen. Die Bewertung erfolgt durch das Referenzgebäudeverfahren (GEG 2024 Anlage 2 (NWG)) (Tuschinski, 2024). Für die Ermittlung des Primärenergiebedarfs von Nichtwohngebäuden ist die Berechnungsmethode nach DIN EN 18599 zu verwenden (Diedrich, 2018).

Für die weiterführende Arbeit hat dieses Verfahren keine Relevanz und wird daher nicht weiter erläutert. Grundsätzlich ermöglicht die DIN EN 18599 eine detaillierte und umfassende Bewertung der energetischen Performance von Gebäuden. Allerdings wird die Ermittlung der grauen Energien von Bauprodukten und -prozessen bislang nicht im Rahmen der energetischen Bewertung berücksichtigt. Aufgrund der Nachhaltigkeit sollte diese jedoch bei einer Planung integriert werden und ergänzend über eine Ökobilanz (vgl. Kapitel 2.1.2) erfolgen (Bayerische Architektenkammer).

Energetische Gebäudestandards

Für die Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden, werden in der Literatur unterschiedliche Energiestandards festgesetzt. Insgesamt bestehen eine Vielzahl an verschiedenen Standards in Deutschland, welche sich unter anderem hinsichtlich der Bilanzierungsmethodik, spezifischer Kennwerte oder dem Energiebedarf unterscheiden können. Aufgrund der Vielfalt an Variationen ist ein direkter Vergleich der einzelnen Standards in der Regel nicht möglich. Zusätzliche Anforderungen über den gesetzlichen Mindeststandard hinaus werden individuell festgelegt. Daher existieren nicht für alle Energiestandards einheitliche Definitionen oder verbindliche Kennwerte (Bayerische Architektenkammer; Stahr et al., 2022). Im Kontext von Schulgebäuden werden die für die nachfolgende Untersuchung relevanten Standards im Folgenden kurz erläutert.

Der GEG-Standard definiert, wie bereits zuvor erwähnt, den gesetzlichen Mindeststandard an den energetischen Wärmeschutz von Gebäuden, einschließlich Anforderungen an den Primärenergiebedarf sowie die U-Werte der Außenbauteile. Zukunftsorientiert ist es jedoch meist empfehlenswert darüber hinaus ambitioniertere

Energieziele zu verfolgen (Sprengard et al., 2014). Im Gegensatz hierzu werden bei anderen Energiestandards, wie beispielsweise dem Passivhaus, Anforderungen an den Heizwärmebedarf oder beim Effizienzhaus Plus-Standard an den Endenergiebedarf gestellt (Bayerische Architektenkammer). Letzterer bezieht sich auf das Effizienzhaus der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW), welcher basierend auf den Anforderungen des GEG die unterschiedlichen Effizienzniveaus (40 bis 100) definiert. Je nach Niveau weisen die Effizienzhäuser jeweils einen entsprechend prozentual verminderten Primärenergiebedarf und Transmissionswärmeverlust auf. Auf der Grundlage eines Effizienzhauses 40 benötigt das Gebäude beispielsweise nur 40% des Primärenergiebedarfs und der Transmissionswärmeverlust liegt bei nur 55%, im Vergleich zum Referenzgebäude (BBSR & BMI, 2020). Der Effizienzhaus Plus-Standard wurde zusätzlich zu Wohngebäuden speziell für Bildungsbauten entwickelt und wird ebenfalls in der BMWi-Begleitforschung „EnEff: Schule“ im Bereich von Schulgebäuden als anzustrebendes Energieziel formuliert (Reiß et al., 2017). Der Standard umfasst eine Weiterentwicklung des klassischen KfW Effizienzhauses und zielt darauf, in der Jahresbilanz mehr Energie aus lokalen erneuerbaren Energiequellen zu erzeugen als wie für den Verbrauch notwendig. Abgesehen der gesetzlichen Mindestanforderungen bestehen keine festen Vorgaben hinsichtlich der energetischen Qualität der Gebäudehülle (Fisch et al., 2018). In einer Studie der Deutschen Energieagentur (dena) wird deutlich, dass für das Erreichen der Klimaschutzziele, im Bereich der öffentlichen Gebäude nach einer Sanierung ein Effizienzgebäudestandard 55 ungenügend ist. Für viele Gebäude ist diesbezüglich daher der EG-40-Standard erforderlich (dena, 2023). Dieser Standard wird ebenfalls im Rahmen der folgenden Untersuchungen berücksichtigt. Die Praxis zeigt, dass die hohen Energieeffizienzanforderungen des Passivhausstandards bei der Sanierung von Schulgebäuden aufgrund der strengen energetischen Rahmenbedingungen und der Vielzahl an Anforderungen eine komplexe Aufgabe ist (Djahanschah et al., 2017; Haselsteiner et al., 2010). Einige Referenzprojekte, wie die Polytechnische Schule in Schwanenstadt oder das Gymnasium Baesweiler, stellen jedoch erfolgreiche Umsetzungen dar (Djahanschah et al., 2017; Reiß et al., 2017).

Darüber hinaus existieren eine Vielzahl an weiterer Energiestandards. Im Rahmen der oben genannten BMWi-Begleitforschung wurde bei einem Vergleich von einzelnen Energiekonzepten beispielsweise das energetische Ziel der Plus-Energie- und 3-Liter-Haus-Schule betrachtet. Für diese Standards gibt es keine spezifischen Vorschriften bezüglich den U-Werten der Gebäudehülle, sondern lediglich bezüglich des Energiebedarfes (Diedrich, 2018; Reiß et al., 2017).

2.1.2 Ökologische Aspekte der nachhaltigen Sanierung

Neben der bislang häufig im Fokus stehenden Energieeffizienz der Gebäude gewinnt die ökologische Qualität von Baumaßnahmen im Kontext des nachhaltigen Bauens insbesondere im Hinblick der steigenden Umweltauswirkungen und des Klimawandels zunehmend an Bedeutung (Krötsch et al., 2024). Die ökologische Qualität einer Sanierung betrifft insbesondere die Schutzgüter „Schutz der globalen und lokalen Umwelt“ und „Natürliche Ressourcen“. Folglich zielen die Sanierungsmaßnahmen auf eine Minimierung der Umweltbelastungen und die Schonung der natürlichen Ressourcen ab (BMUB, 2014). Für eine langfristig nachhaltige Umsetzung ist eine Betrachtung und Bewertung dieser Maßnahmen vor dem Hintergrund des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes unabdingbar (Beckel et al., 2004; BMUB, 2014). In diesem Kontext spielt die Ökobilanz von Gebäuden eine entscheidende Rolle und wird nachfolgend detaillierter erläutert.

Ökobilanz

Die Ökobilanzierung stellt im Bauwesen eine Berechnungsmethodik zur Bewertung der stofflichen und energetischen Input-, Betriebs- und Outputflüsse sowie aller potenziellen Umweltwirkungen, die im Zusammenhang mit den verwendeten Baumaterialien und Bauprozessen im Verlauf des Lebenszyklus entstehen. Die Normen DIN EN ISO 14040/44 bzw. DIN EN 15978 definieren die Systematik der Ökobilanzierung. Die Betrachtung eines Produktsystems umfasst die Stoff- und Energieströme von der Rohstoffgewinnung über die Verarbeitung und Nutzung bis hin zur Entsorgung der Baustoffe. Darüber hinaus sollte ebenfalls die Berücksichtigung der Betriebsenergie, sprich der Energiebedarf des Gebäudes in der Nutzungsphase, erfolgen (BMUB, 2017a).

Der Rahmen und die Durchführung der Gebäude-Ökobilanzen ist gemäß der DIN EN ISO 14040/44 in vier Hauptschritte zu unterteilen (vgl. Abbildung 2-1).



Abbildung 2-1: Vier Schritte einer Ökobilanzierung (eigene Darstellung gemäß DIN EN ISO 14040/44)

Zu Beginn sind neben einer klaren Zielsetzung, präzise Systemgrenzen und Anforderungen an die Datenqualität zu definieren. Dies setzt den Fokus der Untersuchung fest. Die Sachbilanz umfasst die Datensammlung, Bilanzierung und

Zusammenstellung aller relevanten Stoff- und Energieströme. Im folgenden Schritt werden die potenziellen Umwelt- und Gesundheitswirkungen auf Grundlage der Sachbilanzdaten bewertet und softwaregestützt quantifiziert. Abschließend erfolgen die Auswertung der Ergebnisse sowie die Bewertung im Kontext der definierten Ziele. Zusätzlich werden Verbesserungspotenziale identifiziert und Empfehlungen formuliert. Die Erarbeitung der einzelnen Schritte erfolgt in einem iterativen Prozess (Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 2024).

Die systematische Durchführung stellt eine fundierte Grundlage für die Bewertung und Optimierung der Nachhaltigkeit von Produkten dar. Einen wesentlichen Bestandteil der Ökobilanz stellt zudem die Festlegung der Systemgrenzen dar, deren Umfang nachstehend umrissen wird.

Systemgrenzen

Nach DIN EN 15804 werden vier Lebenszyklusphasen in Form der Module von A bis D definiert. Die berücksichtigten Phasen im Rahmen einer Sanierung nach BNB sind in Abbildung 2-2 farblich markiert (BMI, 2019). Hierbei erfolgt eine Differenzierung zwischen den neu eingebauten Bauteilschichten im Zuge der Sanierungsmaßnahmen (grün) und dem Rückbau vom Bestandsschichten (orange).

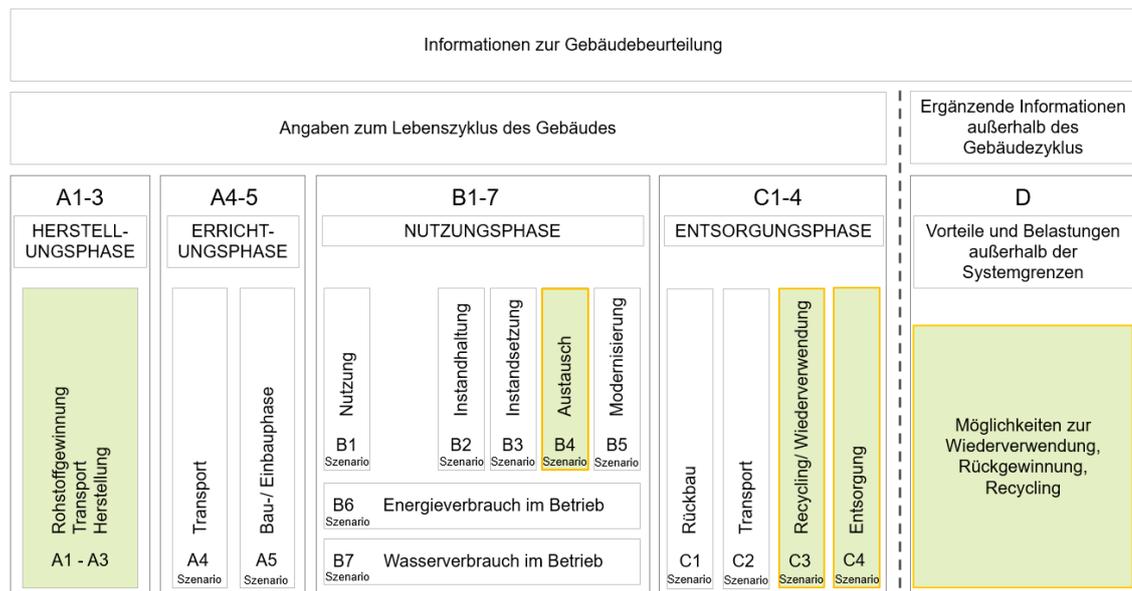


Abbildung 2-2: Lebenszyklusphasen eines Gebäudes mit Angaben der berücksichtigten Phasen (eigene Darstellung nach DIN EN 15978:2012-10, DINEN ISO 14040:2009-11)

Die Herstellungsphase A1-3 beinhaltet die Rohstoffgewinnung, den Transport und die Baustoffherstellung. Sie wird für die Bauteilschichten, die während der Sanierung eingebaut werden, berücksichtigt. Die bei der Erstellung aufgetretenen Umwelt-

wirkungen der Bestandskonstruktionen können rückwirkend nicht mehr ermittelt werden. Darüber hinaus wird die Lebenszyklusphase B4, der Austausch und Ersatz einzelner Bauteilschichten in den kommenden 50 Jahren, hinsichtlich der Nutzung der Konstruktion ab der Gegenwart ebenfalls in die Betrachtung mit einbezogen (BMI, 2019). Die entsprechende Bewertung erfolgt nach den Standardaustauschzyklen gemäß den durchschnittlichen Nutzungsdauern nach (BBSR, 2017b). Am Ende des Lebenszyklus eines Gebäudes folgt die Entsorgungsphase. Diese wird sowohl für den im Zuge der Sanierungsmaßnahme notwendigen Rückbau einzelner Bauteilschichten der Bestandsaufbauten als auch für die komplette Entsorgung der Konstruktion am Ende des Lebenszyklus berücksichtigt. Die Phase D ist formell nicht mehr im Lebenszyklus enthalten und erfolgt daher als separate Ausweisung (BMI, 2019). Sie gibt Auskunft über Wiederverwendungs- und Recyclingpotenziale der verwendeten Materialien und beinhaltet mögliche Gutschriften beispielsweise aus der thermischen Verwertung (Botzler et al., 2017; Krötsch et al., 2024). Die Relevanz der definierten Systemgrenzen wird am Beispiel des Baustoffs Holz deutlich. Liegt der Fokus ausschließlich auf der Herstellung, ergeben sich bei biogenen Baustoffen aufgrund der CO₂-Speicherung im Gebäude negative Emissionen. Wird der gesamte Lebenszyklus einschließlich des End-of-Life-Szenarios betrachtet, neutralisiert sich die Gesamtbilanz aufgrund der Freisetzung des gebundenen CO₂ durch eine thermische Verwertung (Krötsch et al., 2024).

Des Weiteren beinhalten die Systemgrenzen zudem die Festlegung der räumlichen und zeitlichen Systemgrenze. Ersteres bezieht sich dabei auf die funktionelle Einheit, wie beispielsweise den m² Bauteilfläche. Zweiteres umfasst in der Regel ein Betrachtungszeitraum von 50 Jahren (BMI, 2019; Krötsch et al., 2024).

Wirkungskategorien

Ein weiterer wichtiger Aspekt zur Quantifizierung der Auswirkungen auf das Ökosystem betrifft die Wahl der Wirkungskategorien. Insgesamt werden in der Norm eine Vielzahl an Kategorien aufgelistet. Aufgrund des direkten Einflusses auf den globalen Treibhauseffekt und die resultierende Klimaerwärmung ist das GWP besonders hervorzuheben. In Anbetracht der Baustoffproduktion fällt die Hauptursache der CO₂-Emissionen auf die Nutzung fossiler Energiequellen. Daher wird häufig ergänzend der PENRT ausgewiesen (Krötsch et al., 2024), welcher die zur Herstellung erforderliche Energiemenge aus fossilen Energiequellen beinhaltet (Sprengard et al., 2014). Die Relevanz dieser Wirkungskategorien wird ebenfalls bei Gewichtung der BNB-Kriterien zur Bewertung der ökologischen Qualität deutlich (BBSR, 2017a).

Grundsätzlich ist bei der Bewertung der Ökobilanzen zu beachten, dass die Ergebnisse bedingt durch unterschiedliche Bilanzierungsumfänge und Baustoffdatensätze nicht immer in direkten Vergleich zueinander gebracht werden können. Eine Betrachtung im Kontext des Bilanzierungsrahmens ist daher essenziell (Krötsch et al., 2024).

Umweltschonende Baustoffe

Die ökologische Qualität einer Sanierungsmaßnahme hängt maßgeblich von der Beschaffenheit der verwendeten Baustoffe ab und rückt im Sinne einer Reduzierung der Umweltbelastungen sowie einer Steigerung des Wohlbefindens der Nutzenden zunehmend in den Fokus (Stahr et al., 2022). Zu den ökologischen Grundsätzen der Baustoffe zählen eine schadstofffreie Herstellung des Baustoffes mit möglichst geringem Energieaufwand, die Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen sowie das Recycling- oder Wiederverwendungspotenzial der Baustoffe (Fouad, 2023). Einen weiteren, zentralen Aspekt, insbesondere auch im Bereich des Schulbaus, stellt die Auswirkung des Baustoffes auf das Wohlbefinden und die Gesundheit der Nutzenden dar. Das „Gesunde Bauen“ zählt als wesentlicher Bestandteil der ökologischen Sanierung (Stahr et al., 2022).

Vor dem Hintergrund des Wandels zu einem kreislauffähigen Bauwesen stellt die Verwendung biogener Baustoffe aus ökologischer Sicht eine optimale Ergänzung bei der Gebäudesanierung dar. Baumaterialien aus biogenen Rohstoffen, wie Holz oder Kork, stellen gegenüber mineralischen und fossilen Baustoffen aufgrund der Gewinnung aus erneuerbaren Quellen einen ökologischen Vorteil dar. Einerseits entlasten sie durch die stoffliche Einsparung von CO₂ das Klima und können zudem am Ende ihrer Nutzungsdauer als Energiequelle genutzt oder weiterverwendet werden (Krötsch et al., 2024). Voraussetzung hierfür ist, dass die jeweiligen Materialien weitgehend unbehandelt bleiben (Stahr et al., 2022) sowie im Fall des Baustoffes Holz zudem eine nachhaltige Materialgewinnung ohne Zerstörung und Degradierung von Wäldern (BMUB, 2014).

Dämmstoffe

Insbesondere bei der Wahl des Dämmstoffes, welcher einen großen Anteil der Materialien von Sanierungsmaßnahme einnimmt, geht es vor diesem Hintergrund dabei um Mehr als nur die Energieeffizienz. Im Rahmen der Planung erhalten Dämmstoffe im Allgemeinen und vor allem der Einsatz von nachwachsenden Dämmstoffen eine zunehmende Bedeutung (Stahr, 2019).

Im Wesentlichen lassen sich die Dämmstoffe in anorganische und organische Dämmstoffe aus synthetischen und natürlichen Rohstoffen unterteilen. Daraus folgt eine grobe Gliederung in drei Kategorien: Dämmstoffe aus nachwachsenden (NaWaRo), mineralischen und synthetischen Rohstoffen (Fouad, 2023). Für sogenannte „ökologische“ Dämmstoffe gibt es in der Literatur derzeit keine einheitliche Definition. Die Dämmstoffe sind als solche zu bezeichnen, wenn sie während der gesamten Lebensdauer möglichst geringe Belastungen der Umwelt erzielen (Deutsche Umwelthilfe e.V., 2020). Grundsätzlich müssen Dämmstoffe den geltenden Normen und Qualitätsstandards entsprechen sowie für den Einsatz im Bauwesen zugelassen sein. Je nach Einsatzbereich sind für die Auswahl eines passenden Dämmstoffes sowohl die physikalischen als auch ökonomischen, ökologischen und gesundheitlichen Kriterien zu beachten (Fouad, 2023; Stahr, 2019). Die Defizite im Brandschutz stellen hierbei einen entscheidenden Nachteil von Dämmmaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen dar (Fouad, 2023).

Nach einer Marktanalyse aus dem Jahr 2020 (vgl. Abbildung 2-3) dominieren in Deutschland derzeit nach wie vor konventionelle Dämmstoffe aus synthetischen Rohstoffen, wie Polystyrol und Polyurethan, mit 48% die Anwendung. Diese weisen nicht nur eine hervorragende Dämmleistung auf, sondern sind insbesondere hinsichtlich ihrer Kosteneffizienz konkurrenzlos und daher weit verbreitet. Mit einem Marktanteil von 43% folgen unmittelbar dahinter Dämmstoffe aus mineralischen Rohstoffen, wie Glas- und Steinwolle. Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (NaWaRo) machen hingegen weniger als zehn Prozent des Marktanteils aus.

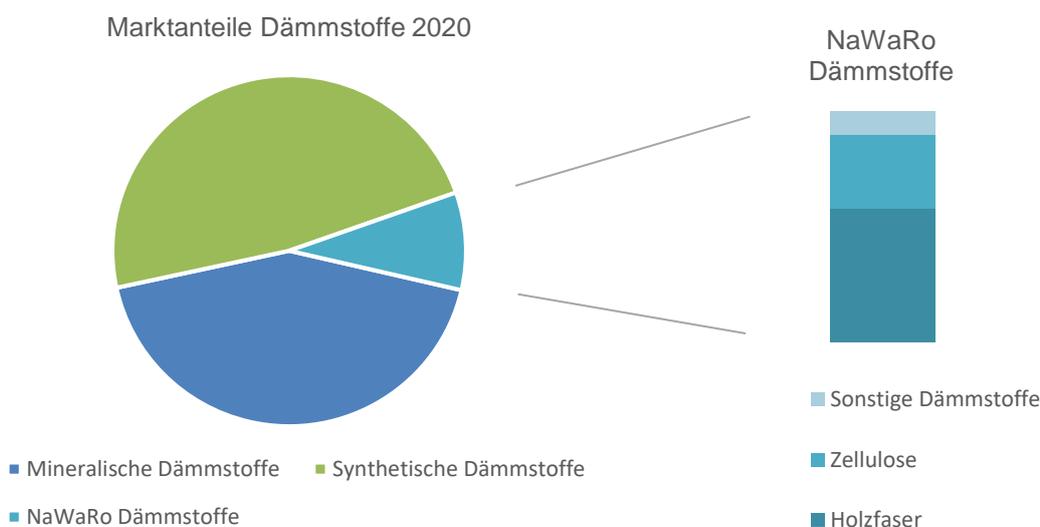


Abbildung 2-3: Übersicht Marktanteile Dämmstoffe im Jahr 2020; eigene Darstellung in Anlehnung an Fouad (2023)

Innerhalb dieses Bereichs sind primär Produkte aus Holzfasern (58%) und Zellulose (32%) vertreten. Andere Dämmstoffe wie Hanf, Flachs, Stroh und ähnliche Materialien ergeben gemeinsam die verbleibenden zehn Prozent und stellen damit insgesamt weniger als ein Prozent des gesamten Dämmstoffmarktes dar (Fouad, 2023). Trotz des derzeit noch geringen Anteils ist mit einem Anstieg am Gesamtmarkt um zwei Prozent zwischen 2011 und 2019 eine positive Entwicklung der NaWaRo-Dämmstoffe zu verzeichnen. Auch für die Zukunft wird in der Branche aufgrund einer zunehmend nachhaltigeren Bauweise von weiteren Steigerungen ausgegangen (Fouad, 2023).

Die Forschung und Entwicklung im Bereich der Dämmstoffe findet hinsichtlich der Effizienzsteigerung stetig statt. Neben den konventionellen und nachwachsenden Dämmstoffen gibt es auf dem Markt bedeutende innovative Materialien, darunter beispielsweise Vakuumisulationspaneele (VIPs), Aerogele und Phasenwechselmaterialien (PCM) (Fouad, 2023; Sprengard et al., 2014). Die Entwicklung dieser innovativen Dämmstoffe trägt durch ihre energetische Effizienzsteigerung schließlich zum nachhaltigen Bauen bei.

Umweltkennzeichnungen

Für die Bewertung von ökologischen Dämmstoffen liegt derzeit kein allgemein gültiges Prüfzeichen vor. Zur Orientierung von umweltschonenden und gesundheitlich unbedenklichen Produkten dienen daher unabhängige Umweltsiegel wie „natureplus“ oder „Blauer Engel“. Ersteres Gütezeichen zertifiziert eine Großzahl der am deutschen Markt erhältlichen NaWaRo-Dämmstoffe, welche einen Anteil von mindestens 85% organischer oder mineralischer Ressourcen aufweisen und bezüglich ihrer Umwelt- und Gesundheitsrelevanz über den gesamten Lebenszyklus geprüft wurden. Zweiteres Siegel zeichnet umweltfreundliche Dämmstoffe aus, die gesundheitlich unbedenklich und schadstoffarm sind (Deutsche Umwelthilfe e.V., 2020; Haselsteiner et al., 2010; Kaiser et al., 2019).

Datenbanken und Softwaretools

Zur Bestimmung der ökologischen Qualität von Sanierungsmaßnahmen bzw. Gebäuden über den gesamten Lebenszyklus dienen fundierte Datenbanken als wichtiges Werkzeug. Hierzu existieren regionale, nationale und internationale Datensätze mit Unterschieden hinsichtlich Umfang und Zugänglichkeit. In Deutschland vertreten sind beispielsweise die Ecoinvent, Gabi-Datenbank sowie Ökobaodat (Meier-Dotzler, 2023). Letztere stellt im Rahmen der Arbeit die wesentliche Grundlage in der Version 2023-I nach DIN EN 15804+A2 dar und wird im Folgenden näher beschrieben.

Die Ökobaudat ist eine standardisierte Datenbank des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat (BMI) für die Ökobilanzierung von Bauwerken in Deutschland. Sie enthält nach DIN EN 15804:2020-03 sowohl generische als auch herstellerspezifische Datensätze zu verschiedenen Baumaterialien und -produkten sowie Transport-, Energie- und Entsorgungsprozesse. Insgesamt umfasst die Datenbank über 1400 Datensätze, welche strengen Qualitätsmerkmalen unterliegen. (Figl et al., 2019; Meier-Dotzler, 2023) Für Bauprodukte, die keine Datensätze aufweisen, wie beispielsweise Vakuumisulationspaneele, kann eine Bewertung der Umweltwirkungen anhand herstellerspezifischer Umweltdeklarationen (EPDs) nach DIN EN 15804+A2 erfolgen (Meier-Dotzler, 2023). Die Ökobaudat wird von der öffentlichen Hand betrieben, ist frei zugänglich und seit 2009 stetig weiterentwickelt und aktualisiert. Aufgrund der umfassenden Änderungen der Berechnungsvorschriften zwischen den unterschiedlichen Versionen, bedingt durch die Aktualisierung der Normen, gilt es die Berechnungen einheitlich nach einer Ökobaudat-Version zu ermitteln und die Versionen nicht zu vermischen (BMWSB, 2023).

Neben Datenbanken dienen webgestützte Bilanzierungstools zur Erzeugung und Erfassung Daten im richtigen Datenformat (Figl et al., 2019). Die eLCA-Software ist hierfür ein vom Bund frei zur Verfügung gestelltes Online-Ökobilanzierungstool für Gebäude, welches die Bemessung der Kenndaten unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus ermöglicht (BBSR, 2024). Die Berechnungen und Bewertungen der Software basieren auf den Richtlinien des BNB-Systems (Figl et al., 2019).

Zusammenfassend stellen die fundierten Datenbanken und geeignete Softwaretools ein wesentliches Instrument zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Bauwerken dar (Figl et al., 2019; Krötsch et al., 2024). Mittels dieser Grundlagen finden Ökobilanzierungen mittlerweile regelmäßig bei diversen Bewertungsverfahren Anwendung (Krötsch et al., 2024; Meier-Dotzler, 2023).

Bewertungs- und Zertifizierungssysteme

Die Notwendigkeit, den aktuellen Herausforderungen zu begegnen und den Anforderungen an nachhaltige Gebäudesanierung gerecht zu werden, führte zu der Entwicklung internationaler und nationaler Bewertungs- und Zertifizierungssysteme (BMVBS, 2013; Scharke, 2023). Diese stellen eine Unterstützung bei der praktischen Umsetzung von Bauvorhaben über den gesamten Lebenszyklus dar. Zudem bieten sie strukturierte Bewertungsansätze unter einer ganzheitlichen Betrachtung der

ökologischen, ökonomischen und sozialen Kriterien. In Deutschland dient der Leitfaden „Nachhaltiges Bauen“ des BMUB als verbindliches Instrument hinsichtlich der Qualitäten des nachhaltigen Bauens. Darauf basieren ebenfalls die nationalen Bewertungssysteme des BNB und DGNB. Der Leitfaden beinhaltet eine separate Berücksichtigung der Thematik Bauen im Bestand (BMUB, 2014).

Die beiden Zertifizierungsstrukturen weisen im Grundsatz, durch die Berücksichtigung derselben Kategorien, eine große Ähnlichkeit auf (BMWSB, 2024b; DGNB, 2024). Während sich das DGNB auf die Zertifizierung von privaten Bauvorhaben fokussiert, bezieht sich das BNB auf die Beurteilung von öffentlichen Baumaßnahmen von Nichtwohngebäude (Scharke, 2023), weshalb die Grenzen dieses Bewertungssystems im Rahmen dieser Arbeit relevanter sind. Im Fokus des BNB steht die Nachhaltigkeitszertifizierung von Bundesbauten mit Hilfe von Kriterien-Steckbriefe. Diese umfassen neben Büro- und Verwaltungsgebäude auch explizit Unterrichtsgebäude. Die Einzelkriterien werden quantitativ bewertet, wobei die Bewertungspunkte nach festen Regeln und unterschiedlichen Gewichtungen vergeben werden. Insgesamt können bei der Erfüllung der Kriterien maximal 100 Punkte erzielt werden. Hierfür verwendet das BNB eine lebenszyklusorientierte Betrachtung, sodass die Lebenszyklusanalyse (Ökobilanz) ein zentrales Berechnungselement im System darstellt (BMI, 2019; BMWSB, 2024b).

In Ergänzung der beiden Systeme findet zudem das Zertifizierungssystem ‚Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude‘ (QNG) vom Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) in Deutschland Anwendung. Das QNG baut auf den zuvor genannten Bewertungssystemen auf und richtet sich sowohl an private als auch öffentliche Bauvorhaben. Es stellt ein einheitliches Nachhaltigkeitsverständnis dar und schafft eine rechtssichere Grundlage für die Vergabe von Fördermitteln (BMWSB, 2024a; Großmann et al., 2023).

Als internationale Bewertungssysteme sind LEED und BREEAM zu nennen (Ebert et al., 2010; Meier-Dotzler, 2023), welche im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht detaillierter beschrieben werden.

2.1.3 Serielle Sanierung

Vor dem Hintergrund der energetischen Effizienzsteigerung von Bestandsgebäuden unter Berücksichtigung einer ökologischen Bauweise hat sich in den letzten Jahren die Entwicklung der Seriellen Sanierung als innovative Methode und interessanten Alternative zu herkömmlichen Verfahren erwiesen. Im Grundsatz basiert das Konzept auf dem Einsatz vorgefertigter Module im Bereich der Fassade, des Daches, der Geschossdecke und sogar der Haustechnik und wurde aus dem Neubau adaptiert. Die bewährte Methode des vorgefertigten Holzbaus bietet die Möglichkeit den Gebäudebestand im Rahmen einer Modernisierung auf einen mit dem Neubau vergleichbaren Energiestandard zu bringen sowie einer räumlichen Erweiterung als Anbau oder Aufstockung (Krötsch et al., 2024; Lattke et al., 2023).

Ein wesentliches Merkmal der Seriellen Sanierung ist eine geschlossene digitale Prozesskette. Der Ablauf umfasst vier wesentliche Schritte (vgl. Abbildung 2-4). Die Grundlage bildet das digitale Aufmaß des bestehenden Gebäudes unter dem Einsatz moderner Messtechnik, wie dem 3D-Laserscan. Anschließend erfolgt die digitale Planung der einzelnen Module vor dem Hintergrund der Erstellung eines BIM-Modells. Eine sorgfältige Detailplanung ist aufgrund der notwendigen, präzisen Ausführung essenziell. Hilfreich hierfür sind standardisierte Verfahren und Lösungsprozesse. Nach der automatisierten, modularen Vorfertigung im Werk können die Sanierungselemente letztlich, im Anschluss an geringe Vorarbeiten, auf der Baustelle in kürzester Zeit montiert werden. Durch diesen Prozess wird eine hohe Qualität des Gesamtsystems gewährleistet.



Abbildung 2-4: Planungsprozess Serielle Sanierung, (Lattke et al., 2023)

Mit Hilfe der Digitalisierung hinsichtlich dem Aufmaßverfahren und der Fertigungstechniken ist eine serielle Vorfertigung der einbaufertigen Elemente im Werk möglich. Dieses Herstellungsverfahren zieht den Rückschluss auf die Begrifflichkeit der Maßnahme. Daher stellt sich die Serielle Sanierung als besonders effizient bei Gebäuden mit typenähnlicher Struktur, wie beispielsweise der Typenschulbauten aus dem Bestand der Neuen Bundesländer der 1950er bis 1980er Jahre (Krötsch et al., 2024; Lattke et al., 2023).

Konstruktion

Die einzelnen Module zur Sanierung der Fassade, der Decke oder des Daches werden in der Regel als vorgefertigte Holztafel- bzw. Holzrahmenbauweise ausgeführt. Dies gewährleistet eine qualitätsvolle und insbesondere hinsichtlich der Fassade, auch gestalterisch vielfältige Methode. Ein beispielhafter Konstruktionsaufbau des Fassadenelements ist Abbildung 2-5 zu entnehmen. Die Konstruktion besteht im Wesentlichen aus einem Ständerwerk und einer aussteifenden Beplankung. Die Dämmung liegt dabei in einer Ebene mit dem Tragwerk. Der äußere Abschluss der Elemente bietet eine Vielzahl an gestalterischen Möglichkeiten. Neben einer kompakten Konstruktion mit Verputz, kann die Bekleidung zudem als hinterlüftete Fassadenkonstruktion mit den üblichen Materialien der Außenwandbekleidung zum Einsatz kommen. Das bietet einerseits die Chance einer architektonischen Aufwertung der Gebäude, andererseits bringt es stets eine Veränderung des äußeren Erscheinungsbildes und folglich einen potenziellen Verlust der Baukultur mit sich. Neben den konstruktiven Anforderungen an Wärme-, und Schallschutz sind insbesondere die gebäudespezifisch geltenden Brandschutzanforderungen bei der Konstruktion sowie der Bekleidung zu berücksichtigen (Krötsch et al., 2024; Lattke et al., 2023).

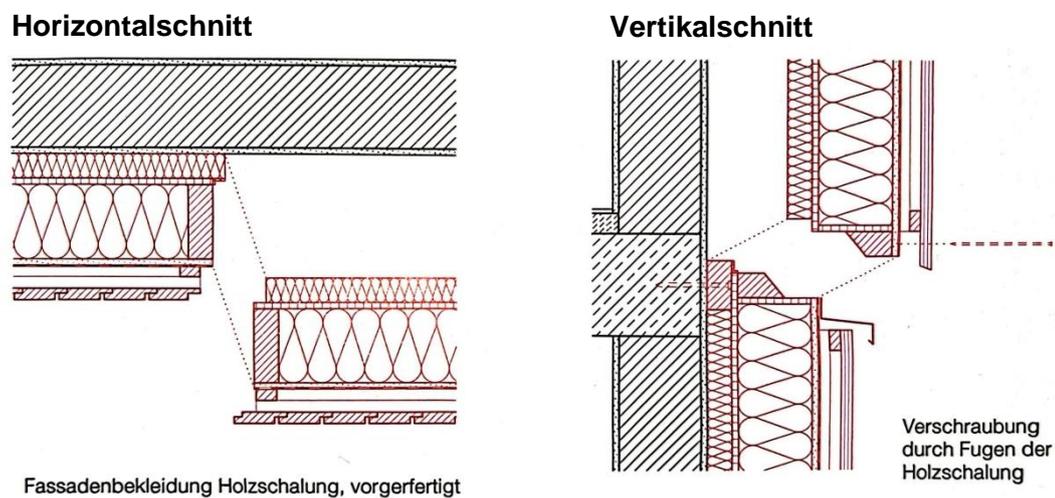


Abbildung 2-5: Konstruktionsaufbau und Montage eines Fassadenelements; (Krötsch et al., 2024)

Die Lastabtragung der vor dem bestehenden Gebäude angebrachten Konstruktion erfolgt über die Gebäudehülle und eine Befestigung meist über die Geschosdecke des Bestandsgebäudes (siehe Abbildung 2-5) (Lattke et al., 2023). Die Größe der Module wird primär durch die Transportmittel sowie die Baustellenlogistik vorgegeben (Krötsch et al., 2024).

Vorteile der Seriellen Sanierung

Die Serielle Sanierung erweist sich aufgrund einer Vielzahl an Faktoren gegenüber herkömmlichen Sanierungsmethoden als vorteilhaft. Ein entscheidender Aspekt ist die Verwendung des Baustoffes Holz. Die guten wärmetechnischen Eigenschaften, das geringe Eigengewicht, der hohe Vorfertigungsgrad sowie die Verwendung eines nachwachsenden Rohstoffes sind bedeutende Vorteile der Holzbauweise (Krötsch et al., 2024; Lattke et al., 2023).

Der hohe Grad an Vorfertigung stellt einen wesentlichen Vorteil des Seriellen Sanierens dar. Die montagefertigen Sanierungselemente minimieren nicht nur die Baustellenzeit erheblich, sondern auch die Beeinträchtigung der Nutzenden sowie der Umgebung. Dies ist besonders bei zeitkritischen Projekten wie der Schulsanierung von bedeutendem Vorteil, wodurch eine Umsetzung der Maßnahmen häufig im laufenden Betrieb während der Sommerferien möglich ist. Darüber hinaus ergeben sich aus ökologischer Sicht weitere Vorteile der Seriellen Sanierung. Zum einen reduziert die Verwendung von Holz und überwiegend biogenen Dämmstoffen die CO₂-Emissionen eines Gebäudes. Zum anderen stellen die mechanischen Verbindungen eine einfache partielle Demontage sowie eine sortenreine Trennbarkeit der einzelnen Bestandteile am Ende der Lebensdauer sicher. (IEMB, 2005; Krötsch et al., 2024; Lattke et al., 2023)

Zusätzlich bietet die Serielle Sanierung die Möglichkeit aktive Systeme in die Module zu integrieren. Dadurch lassen sich beispielsweise solaraktive Bauteile in den Konstruktionsaufbau der Fassade einfügen. Einen weiteren Faktor stellt die potenzielle Verbesserung der Raumgestaltung und -funktionalität dar. Anpassungen an Belichtung, Belüftung und Raumakustik können im Rahmen der Seriellen Sanierung berücksichtigt werden, das ist insbesondere im Schulbau ein wichtiger Aspekt. Die Anpassung der Fensterflächen sowie beispielsweise das Anbringen tiefer Fensterbänke als Sitzmöglichkeit, wertet die Qualität des Innenraums enorm auf. Herkömmliche Sanierungsmethoden der Gebäudehülle setzen meist lediglich auf eine Reduzierung der Transmissionswärmeverluste. Im Vergleich hierzu ist die Methode der Seriellen Sanierung deutlich umfassender.

Zusammenfassend stellt die Serielle Sanierung mit ihrer Kombination aus Effizienz, Nachhaltigkeit und hoher Bauqualität eine zukunftsweisende Methode der Gebäudesanierung dar (Krötsch et al., 2024). Insbesondere im Bereich der Schulgebäude zeigt sich ein erhebliches Potenzial, das für die Kommunen nicht nur Zeit und Kosten spart, sondern auch zur Erreichung der Klimaschutzziele beiträgt.

Forschungen im Bereich der Seriellen Sanierung

Im Neubau findet der Einsatz vorgefertigter Bauteile aus Holz, wie beispielsweise beim Holzfertigbau, bereits standardisierte Anwendung. Aufgrund der bereits zuvor erwähnten herausragenden Eigenschaften des Baustoffes Holz ist der Holzbau im Rahmen des ‚TES Forschungsprojekts‘ bereits seit 2010 als eine geeignete Methode der Sanierung etabliert und wird derzeit unter dem Begriff der Seriellen Sanierung weiterentwickelt.

TES Forschungsprojekt

In einem europäischen Forschungsprojekt an der Technischen Universität München wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „TES (timber based element system) EnergyFacade“ Prozesslösungen zu einem ganzheitlichen Fassaden-Modernisierungssystem aus vorgefertigten Holzbauelementen als innovative Sanierungsmethode erforscht und entwickelt. Die Untersuchungen umfassten die Analyse verschiedener Anwendungsmöglichkeiten, das Potenzial einer geschlossenen digitalen Prozesskette und die technischen Rahmenbedingungen der Ausführung. Das Projekt zeigte damit bereits 2010 die Vorteile des vorgefertigten Holzbaus auf die energetische Modernisierung der Gebäudehülle und machte das Konzept europaweit bekannt. Im Grundsatz zielte die Forschung auf eine Verbesserung der Energieeffizienz eines Gebäudes sowie der folglich Minderung von Treibhausgasemissionen im Betrieb vor dem Hintergrund der überwiegenden Verwendung von Baumaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen (Krötsch et al., 2024; Lattke et al., 2011).

„Energiesprong“ und Deutsche Energie-Agentur (dena)

Eine bewährte Praktik im Bereich der Seriellen Sanierung wurde 2010 mit dem „Energiesprong“- Projekt der niederländischen Regierung entwickelt, welche sich mithilfe der Deutschen Energie-Agentur seit 2017 auch bereits in Deutschland etabliert hat. Die vorgefertigten Bauteile werden um das Bestandsgebäude gesetzt und bilden eine neue Gebäudehülle. Die Sanierung zum Null-Energie- Haus beinhaltet zudem eine PV-Anlage auf dem Dach und eine vorinstallierte Anlage zur Haustechnik. Der hohe Vorfertigungsgrad und eine optimierte Logistik ermöglicht eine kostengünstige und schnelle Umsetzung (Oehler, 2018). Bisher konzentrierte sich das Vorhaben dabei im Wesentlichen auf Wohngebäude. Aktuell wird es anhand von Pilotvorhaben auch auf andere Bereiche, wie Schulgebäuden, ausgeweitet (energiesprong de, 2023).

Parallel zu der derzeitigen Entwicklung und Forschung im Bereich der Seriellen Sanierung mit vorgefertigten Holzelementen zeigen im Bereich der Schulgebäude bereits einige Beispiele die Umsetzung und hohe Akzeptanz dieser Systeme. Das erste Projekt in Deutschland stellt die Generalsanierung der Mittelschule Buchloe, durchgeführt von dem Marktoberdorfer Architekturbüro e3 Architekten, im Jahr 2010 dar. Der weitgehende Einsatz vorgefertigter Holztafelbauelemente machte die Modernisierung der ca. 4000 m² große Fassadenfläche während den Sommerferien und somit ohne Störung des Schulbetriebs möglich (Djahanschah et al., 2017; Krötsch et al., 2024).

Bundesförderung

Für die Förderung der energetischen Gebäudesanierung mit vorgefertigten Fassaden- und Dachelementen hat die Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) als Anreiz seit Januar 2023 den Bonus ‚Serielles Sanieren‘ mit einer maximalen Förderung von 40 bis 45 Prozent eingeführt. Mit dieser Vorgehensweise wird die Steigerung der Sanierungsraten aufgrund einer schnelleren und effizienteren Sanierung, durch vorgefertigte Elemente im Vergleich zur herkömmlichen Bauweise, erzielt (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, 2024; Lattke et al., 2023). Das Ziel des Förderprogramms liegt in der Entwicklung und Einführung innovativer Sanierungsverfahren sowie neuer Komponenten für die Serielle Sanierung (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, 2024).

2.2 Schulgebäudebestand in Deutschland

Die Bildungsinfrastruktur sowie die Zuständigkeit zur Erhebung und Sicherung von Datenmaterial bezüglich der Schulbautätigkeiten liegt in der Verantwortung der einzelnen Bundesländer und jeweiligen Kommunen. Die Dezentralisierung, bedingt durch kommunal unterschiedliche Vorgehensweisen, bringt Herausforderungen in der einheitlichen Auswertung sowie bundesweiten Bestandserfassung der Daten über den Schulgebäudebestand mit sich. Hierdurch entsteht ein erheblicher Forschungsbedarf bezüglich der Zusammenfügung des Bestandes hinsichtlich der Gebäudemerkmale (Beckel et al., 2004; Gertis & Sedlbauer, 2010; Reiß et al., 2017).

Dieses Kapitel umfasst zunächst eine quantitative Erfassung des deutschen Schulgebäudebestands mit einer anschließenden geschichtlichen Darstellung der Entwicklung der Schulbauten. Darüber hinaus wird die aktuelle Situation zum Schulgebäudebestand bezüglich des bestehenden Investitionsrückstands und Sanierungsbedarfs, sowie die politischen Rahmenbedingungen beschrieben.

2.2.1 Quantitativer Überblick des Schulbaubestands

Nach (Gertis & Sedlbauer, 2010), (Hebel et al., 2011) sowie (Reiß et al., 2017) beläuft sich die Gesamtzahl der Schulen in Deutschland auf ca. 40.000 bis 45.000 Einrichtungen. Dies beinhaltet sowohl allgemeinbildende als auch berufsbildende Schulen. Laut eine Auswertung des Statistischen Bundesamtes (Destatis) beträgt die Zahl der allgemeinbildenden Schulen im Jahr 2022/ 2023 deutschlandweit 32.666 Institutionen (Statistisches Bundesamt [Destatis], 2023). Allerdings ist die Anzahl der Institutionen nicht gleich zusetzen mit der tatsächlichen Gebäudeanzahl. (Hebel et al., 2011) spezifiziert diesen Wert bis 2011 auf eine Gebäudeanzahl von 53.500 aller Schulen. Damit fällt den Schulgebäuden ein Anteil von ca. 18% aller öffentlicher Gebäude zu (Diedrich, 2018).

Schulgebäude nach Baualtersklassen

Die Erfassung des Schulgebäudebestandes nach Baualtersklassen dient der Einschätzung des energetischen Ausstattungszustandes (Hebel et al., 2011). Eine einheitliche Zusammenstellung vollständiger, statistischer Angaben zum Schulgebäudebestand mit einer Zuordnung der Bauperioden sind in der Literatur nur vereinzelt verfügbar (Beckel et al., 2004; Hebel et al., 2011; Scharte, 2014; ZNWB, 1999).

(Scharte, 2016) führte im Rahmen Ihrer Dissertation zur Untersuchung des energetischen Potenzials von Schulgebäuden die unterschiedlichen Literaturangaben des Schulgebäudebestandes hinsichtlich einer Unterteilung nach Baualtersklassen zusammen. Die Ergebnisse der prozentualen Aufteilung werden in Abbildung 2-1 dargestellt. Daraus wird deutlich, dass der Höhepunkt der Schulbautätigkeit mit einem Anteil von 40% in den 1960er und 1970er lag. Gemeinsam mit den Bauten der Nachkriegszeit vertreten sie über die Hälfte des heutigen Bestandes. Die Sanierung der Gebäude aus dieser Zeit gewinnt zunehmend an Bedeutung, denn nur ca. 8% des heutigen Bestandes wurden nach Inkrafttreten der dritten Wärmeschutzverordnung im Jahr 1995 bis zum Jahr 2010 errichtet.

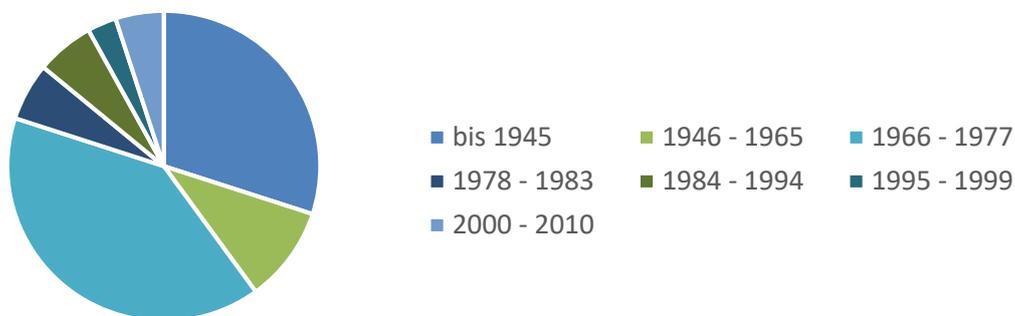


Abbildung 2-1: Prozentuale Aufteilung der bestehenden Schulgebäude; eigene Darstellung nach (Scharte, 2016)

Grundsätzlich ist der Hauptanteil des gegenwärtigen Gebäudebestandes dem 20. Jahrhundert zuzuordnen. Die Entwicklung der Schulgebäude in dieser Zeit wird im Folgenden näher beschrieben. Bauten aus dem 18. Und 19. Jahrhundert stellen nur einen geringen Anteil am Gesamtbestand dar und unterliegen in der Regel dem Denkmalschutz, weshalb sie meist gut dokumentiert sind (Beckel et al., 2004).

2.2.2 Entwicklung von Schulgebäuden im 19. Und 20. Jahrhundert

Michael Zinner beschreibt die Geschichte der Schulhausentwicklung mit dem folgenden Satz (Djahanschah et al., 2017; Zinner, 2014): „*Vom lebendigen Einraum zur gleichförmigen Gangschule (1700-1850) zur neutralen Flächenschule (um 1970) zum lebendigen Raumgefüge (ab 2000).*“ (vgl. Abbildung 2-2). Diese Aussage umschreibt die Entwicklungen der Schulgebäude im 19. und 20. Jahrhundert sehr prägnant. Geprägt durch gesellschaftliche, pädagogische und architektonische Einflüsse wird die Entwicklung im Folgenden detaillierter aufgezeigt.

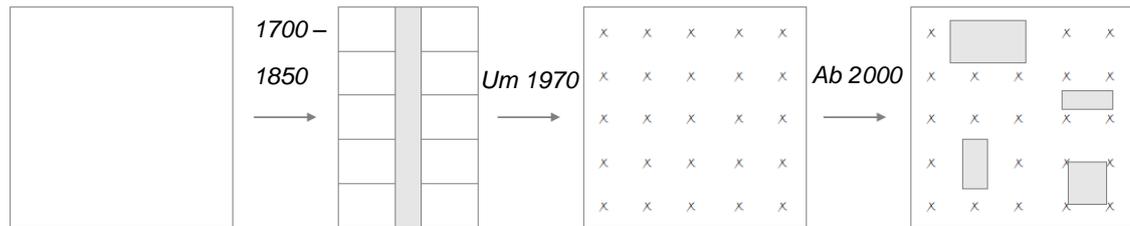


Abbildung 2-2: Skizzenhafte Darstellung der Schulhausentwicklung; eigene Darstellung nach (Zinner, 2014)

Bis in das 19. Jahrhundert wurden häufig noch keine speziell für den Schulbetrieb errichteten Räumlichkeiten für den Unterricht verwendet. Dieser wurde meist in improvisierten Räumen wie dem Gemeindesaal abgehalten (Djahanschah et al., 2017). Im Zuge der Sozialreform zu Beginn dieses Jahrhunderts rückte das Bildungswesen und damit auch die Bautätigkeit im Schulbereich dann verstärkt in den Fokus. Zu dieser Zeit entstanden Schulbauten häufig in urbanen Gebieten als imposante Repräsentationsbauten an öffentlichen Plätzen (Beckel et al., 2004). Die Gebäude waren aufgrund der Geschlechtertrennung in Form von Doppelschulen aufgebaut (Reiß et al., 2017). Ab der zweiten Hälfte des Jahrhunderts fand im Gegensatz hierzu eine Entwicklung der Bauten hin zu einem modernen, ein funktionalen Schulhaus statt (Freyer, 1998). Die strengen und schlichten Schulgebäude (Reiß et al., 2017) erinnern mit ihrer kompakten Gebäudetypologie an militärische Kasernenbauten. Das Erschließungskonzept erfolgte zunehmend als Gangschule (vgl. Abbildung 2-2, zweite Skizze von links) (Djahanschah et al., 2017), sodass bereits die Architektur ein diszipliniertes und geordnetes Schulwesen verkörpert (Reiß et al., 2017). Dieses Konzept beinhaltete großzügig geschnittene Klassenräume mit Platz für bis zu 70 Schülern und die Einführung des Frontalunterrichts (Djahanschah et al., 2017). Hinsichtlich der Bauweise der Gebäude wurde die bis dahin häufig verwendete Bruchsteinbauweise im Laufe des Jahrhunderts zunehmend von der Ziegelbauweise abgelöst (Freyer, 1998). Aufgrund ihrer massiven Bauweise nach den Prinzipien des langfristigen Handelns profitieren die Gebäude von einer soliden und dauerhaften Bausubstanz (Beckel et al., 2004; Reiß et al., 2017).

Die zur Jahrhundertwende eintretende Reformpädagogik brachte eine wesentliche Entwicklung des Schulsystems mit sich. VertreterInnen wie Maria Montessori und Rudolf Steiner, Begründer der Waldorfpädagogik, forderten einen Umschwung des Schulsystems im Sinne einer Berücksichtigung des sozialen Miteinanders und der Bedürfnisse der SchülerInnen. Während neue Gebäudetypologien als ein- bis zweigeschossige Flächenbauten im Grünen, wie die Freiluftschule nach Ernst May in den 1920er Jahren, eine wesentliche Änderung der Schultypologie beinhaltete, fand trotz

der Einführung neuer pädagogischer Methoden auch hier das Konzept des Frontalunterrichts weiterhin Anwendung (Beckel et al., 2004; Djahanschah et al., 2017). Die Umsetzung solcher Gebäudetypologien begrenzte sich auf einzelne Beispielschulen. Während der Zeit des Nationalsozialismus rückte die Schulbautätigkeit im Vergleich zur Propaganda der nationalsozialistischen Erziehungsideale in den Hintergrund (Beckel et al., 2004).

Nach dem zweiten Weltkrieg war der Bedarf an neuen Schulgebäuden aufgrund der massiven Zerstörung erheblich. Diese Zeit prägt die Entwicklung des Schulbaubestandes sowohl im Ausmaß als auch in der baulichen Umsetzung enorm. Im Zuge des Wiederaufbaus stand eine schnelle und günstige Wiederherstellung im Vordergrund, welche häufig zu Lasten der Bauqualität erfolgte. Die Schulbauarchitektur der frühen 1950er Jahre zeichnet sich durch schlichte und sparsame Konstruktionen, minderwertige Baustoffe und eine nicht ausgereifte Bautechnik aus. Dies brachte in Folge dessen langfristig bauliche Probleme aufgrund konstruktiver und bauphysikalischer Mängel mit sich (Beckel et al., 2004). Die Gebäudetypologie weist in dieser Zeit zwei sehr unterschiedliche Entwicklungen auf. Zum einen wurden in Anlehnung an die 1920er Jahre eingeschossige, pavillionartige Schulen errichtet. Andererseits wurden im Gegensatz hierzu unter Berücksichtigung der ökonomischen Aspekte zudem größere, nüchterne Bauten aus Stahlbeton erstellt (Beckel et al., 2004; Djahanschah et al., 2017). Im Hinblick auf die Bauweise erscheinen mit der Einführung der DIN 4108 im Jahr 1952 erste Anforderungen an den Wärmeschutz, welche jedoch bedingt durch die Materialknappheit nicht umfänglich umgesetzt werden können (Scharte, 2016).

In Folge von geburtenstarken Jahrgängen steigt die Schulbautätigkeit in den 1960er Jahren weiter an und prägt den Bestand bis heute. Bedingt durch ökonomische Aspekte entstanden größere Schulbauten in Form von Schulzentren und Gesamtschulen (Beckel et al., 2004). Neben dem Konzept der Gangschule kam das Prinzip der Großraumschule mit komplexeren Grundrisstypen (vgl. Abbildung 2-2, dritte Skizze von links) (Djahanschah et al., 2017). Die Bauweise ist überwiegend charakterisiert durch eine standardisierte Fertigbauweise auf Basis von Stahlkonstruktionen, mit dem Ziel sowohl Baukosten als auch die Bauzeit zu reduzieren (Beckel et al., 2004). Ab dem Inkrafttreten der ersten Wärmeschutzverordnung 1977 erhalten die Gebäude einen erhöhten Wärmeschutz. Die entsprechenden Anforderungen werden 1982 angehoben (Scharte, 2016).

In den 1980er Jahren erfolgt aufgrund geringer Schülerzahlen eine Stagnation der Schulbautätigkeiten (Beckel et al., 2004; Djahanschah et al., 2017). Die umzusetzenden Baumaßnahmen umfassen erstmals die Modernisierung älterer Schulgebäude. Neubauten erfolgen primär lediglich im Umfang von Erweiterungsbauten bestehender Schulen (Beckel et al., 2004). Der Fokus der Planung rückt auf die künstlerische Gestaltung (Beckel et al., 2004), bisherigen Konzepte werden neu gedacht und bringen die Konzepte der 20er und 60er Jahre wieder hervor (Reiß et al., 2017).

Während dem Zeitraum der Teilung Deutschlands von 1949 bis 1989/90 ist die Entwicklung der Schultypologie sowie der daraus vorhandene Schulbaubestand der neuen Bundesländer im Wesentlichen von dem Gebäudebestand Westdeutschlands zu differenzieren. Die Schulbauten in diesem Gebiet entstanden in den 1950er Jahren in Ziegelbauweise, während in den 1960er und 1970er Jahren eine Serienproduktion sogenannter „Typenserien“ als Atrium-, Schuster- oder Gangtyp in Fertigbauweise erfolgte (Beckel et al., 2004; ZNWB, 1999).

Mit der Wiedervereinigung Deutschlands entsteht in den unterschiedlichen Regionen eine recht heterogene Entwicklung der Schulgebäude. Neben Schulschließungen und -zusammenlegungen erfolgen Neubauten und Sanierungsmaßnahmen schlecht instandgehaltener Bestandsgebäude. Nach den ersten Ergebnissen der PISA Studie um 2000 wurde aufgrund der festgestellten Defizite nicht nur hinsichtlich des Zustands der Schulgebäude, sondern auch der schulischen Ausbildung, ein Umdenken der pädagogischen Konzepte gefordert. Entgegen der vorherigen Großschulen entwickeln sich zunehmend wieder kleinere Schulen mit lebendigen Raumgefügen (vgl. Abbildung 2-2, rechte Skizze) und neuen Trends wie Lernlandschaften, welche auch heute noch umgesetzt werden (Beckel et al., 2004; Djahanschah et al., 2017).

Die Vorgaben der Wärmeschutzverordnung und damit die Qualität des baulichen Wärmeschutzes der Gebäude bilden sich in diesem Zeitraum ebenfalls weiter aus und wurden zunächst 1995 weiter verschärft. Ab 2002 wird diese von der Energieeinsparverordnung abgelöst, welche in den folgenden Jahren regelmäßig mit steigenden Anforderungen der Effizienzstandards novelliert wurde und schließlich im Jahr 2020 mit Einführung des Gebäude-Energie-Gesetzes außer Kraft tritt (Eßmann et al., 2022; Lorbek, 2020; Stahr et al., 2022).

2.2.3 Aktuelle Situation von Schulgebäuden

Der Zustand der schulischen Infrastruktur in Deutschland steht seit Jahren im Fokus bildungspolitischer Diskussionen und stellt die jeweiligen Länder und Kommunen vor erhebliche Herausforderungen. Etwa die Hälfte aller Schulen befinden sich in einem sanierungsbedürftigen Zustand und entspricht nicht mehr den heutigen Anforderungen (Gertis & Sedlbauer, 2010; Reiß et al., 2017), trotz der Dringlichkeit besteht jedoch ein erheblicher Investitionsrückstand (Brand & Salzgeber, 2023).

Nach aktuelle Vorausberechnungen ist bis zum Jahr 2035 ein Anstieg der SchülerInnen- Anzahl um rund eine Millionen, das entspricht in etwa 9,2%, zu erwarten (KMK, 2023). Der Anstieg ist zum einen durch die demografische Entwicklung begründet und zum anderen auf die ausländische Zuwanderung zurückzuführen (Kalusche & Deutschmann, 2017; Statistisches Bundesamt, 2023). Entlang des anhaltenden Rückgangs der letzten Jahre ist zudem ein Abbau der Einrichtungszahlen zu verzeichnen. Die aktuelle Situation erfordert bedingt durch den erhöhten Platzbedarf jedoch eine Umkehr dieser Entwicklung (Maaz et al., 2022).

In diesem Kontext wird nachfolgend der Investitionsrückstand sowie die Notwendigkeit des Sanierungsbedarfs und die Herausforderungen an die Planung aufgezeigt.

Investitionsrückstand bei Schulgebäuden in Deutschland

Die Finanzierung der notwendigen Sanierungen stellt in Anbetracht des Investitionsrückstandes bei Schulgebäuden ein drängendes Problem dar. Die Verantwortung für den baulichen Unterhalt der Schulen tragen die jeweiligen Kommunen. Aufgrund der über die Jahre anhaltenden Finanznot der kommunalen Haushalte hat sich ein enormer Rückstand an dringend notwendigen Instandsetzungen bzw. Sanierungsmaßnahmen gebildet (Beckel et al., 2004).

Nach aktuellem Stand umfasst der Sanierungsstau an Schulgebäuden insgesamt einen wahrgenommenen Investitionsrückstand in Höhe von 47,44 Milliarden Euro und stellt mit 28,6 % den größten Sanierungsposten der kommunalen Infrastruktur dar. Diese Zahl macht den enormen Handlungsbedarf deutlich. Von dem geplanten Jahresinvestitionsvolumen in Höhe von 41,3 Milliarden Euro im Jahr 2022, entfiel rund ein Viertel der Summe (12,1 Milliarden Euro) auf Schulen (Brand & Salzgeber, 2023).

Die primäre Ursache des Rückstands liegt in den engen finanziellen Spielräumen der öffentlichen Haushalte. Einer Vielzahl der Kommunen fehlen häufig die ausreichenden finanziellen Mittel, um die notwendigen Investitionen bei den Schulgebäuden

vorzunehmen (Beckel et al., 2004; Berlo et al., 2006; Reiß et al., 2017). Die Untersuchungen im Rahmen des aktuellen KfW- Kommunalpanels 2022 ergaben, dass die Unterschiede bei den Investitionsrückständen zwischen den Kommunen weiter zunehmen. Dies führt zu einer zunehmenden Polarisierung in der Qualität der Schulinfrastruktur und belasten die kommunalen Haushalte zusätzlich. Darüber hinaus verschärfen die in den letzten Jahren erheblich gestiegenen Bau- und Energiekosten die finanziellen Herausforderungen der Kommunen. Die Schulgebäude entsprechen einem Großteil der kommunalen Gebäudefläche und sind für einen hohen Anteil der Energiekosten verantwortlich (Kreditanstalt für Wiederaufbau [KfW], 2022). Aus diesem Grund ist die Steigerung der ökonomischen Effizienz der Schulgebäude von hoher Bedeutung (MSJG, 2012).

Zur Bewältigung des Investitionsrückstands werden verschiedene Förderprogramme in Deutschland in Bezug auf die Sanierung und Verbesserung von Schulgebäuden angeboten. Als Beispiele ist das Kommunalinvestitionsförderungsgesetz (KInvFG) zu nennen, mit welchem der Bund die Investition von finanzschwachen Kommunen unterstützt (Bundesamt für Justiz, 2015). Häufig bleiben diese Möglichkeiten aufgrund des Aufwands für die Kommunen zur Beantragung von Fördergeldern des Bundes jedoch ungenutzt (Grewe, 2020). Des Weiteren bietet die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) spezifische Programme für öffentliche Gebäude zur Förderung der energetischen Sanierung an. Diese unterstützen Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz der Gebäude wie beispielsweise die Verbesserung der wärmedämmenden Gebäudehülle (Kreditanstalt für Wiederaufbau [KfW], 2022).

Der Abbau des Investitionsrückstandes ist für eine intakte schulische Infrastruktur und ein leistungsfähiges Bildungssystem von hoher Bedeutung (Kreditanstalt für Wiederaufbau [KfW], 2022). Die weitreichenden Auswirkungen auf den Schulbestand werden anhand des erheblichen Sanierungsbedarfs verdeutlicht.

Sanierungsbedarf

Infolge des Investitionsrückstands weist der Schulgebäudebestand in Deutschland einen enormen Sanierungsbedarf auf, dies verdeutlichen die insgesamt ca. 20.000 sanierungsbedürftigen Schulgebäude. Damit ist etwa jede zweite Schule von Sanierungsrückständen betroffen ist (Gertis & Sedlbauer, 2010; Reiß et al., 2017). Die Notwendigkeit ergründet sich aus einer Kombination von Faktoren wie einer baufälligen Gebäudesubstanz, Anpassungen an strengere Sicherheitsstandards sowie sich ändernde pädagogische Anforderungen.

Mangelnder Gebäudezustand

Zu einem der dringlichsten Gründe für die Sanierung von Schulgebäuden zählt der allgemein schlechte Zustand der Bauten. Dies betrifft neben veralteten und ineffizienten technischen Anlagen insbesondere auch die mangelnde Bausubstanz. Die bestehenden Gebäudehüllen sind häufig in Folge einer ungenügenden Wärmedämmung sowie Undichtigkeiten durch bauphysikalische Mängel und eine schlechte Qualität des baulichen Wärmeschutzes charakterisiert. Die Bauteile entsprechen weder den bauphysikalischen Anforderungen noch den energetischen Standards der heutigen Zeit (Berlo et al., 2006; Gertis & Sedlbauer, 2010; Hebel et al., 2011; Le et al., 2021). Dies beeinträchtigt nicht nur den Innenraumkomfort und die Leistungsfähigkeit der Gebäudenutzenden (Diedrich, 2018; Gonzalo, 2009), sondern resultiert ebenso in einem hohen Energiebedarf und folglich einem Anstieg der Betriebskosten (Berlo et al., 2006; Gertis & Sedlbauer, 2010; Hebel et al., 2011; Le et al., 2021). Darüber hinaus weisen die Schulgebäude ein Defizit in den Bereichen der Akustik, Belichtung, Belüftung sowie der sommerlichen Überhitzung auf (MSJG, 2017). Eine energetische Sanierung der betroffenen Schulgebäude bietet nicht nur die Möglichkeit zur Entlastung der Umwelt durch eine CO₂-Minderung, sondern reduziert zudem die Betriebshaushalte der Kommunen (Berlo et al., 2006; Reiß et al., 2017).

Darüber hinaus bestehen Leerstände aufgrund der Schulschließungen der letzten Jahre in vorwiegend ländlichen Regionen. Diese Leerstände stellen nicht nur ungenutzte Flächenressourcen dar (Leerstandskonferenz, 2015), sondern machen die Gebäude auch besonders anfällig für Verfall und benötigen umfassende Sanierungsmaßnahmen (Bundesstiftung Baukultur [BSBK], 2018). Als Beispiel erfolgreicher Reaktivierungen hat die Stadt Berlin in den vergangenen Jahren bereits eine Vielzahl an leerstehenden Schulgebäuden grundsaniert und wieder in Betrieb genommen (Senatsverwaltung für Bildung, Jugend und Familie, 2023).

Das Projekt „Schule statt Leerstand“ der Montag Stiftung Jugend und Gesellschaft umfasst sich darüber hinaus mit der Entwicklung innovativer Schulbaukonzepte für die schulbetriebliche Weiternutzung vorhandener, leerstehender Gebäude jeglicher Art. In Anbetracht des erheblichen Sanierungsstaus sowie dem steigenden Bedarf an Schulplätzen in wachsenden Regionen zielt das Konzept darauf ab, die vorhandenen Ressourcen effizient zu nutzen. Angesichts der Klimakrise ist es auch in der Schulinfrastruktur essenziell, vorhandene Leerstände effektiv weiter zu nutzen (Montag Stiftung Jugend und Gesellschaft, 2023).

Sicherheitsanforderungen

Ein weiterer zentraler Aspekt der Sanierung von Schulgebäuden ist die Verbesserung der Sicherheitsanforderungen. Viele der Schulbauten stammen aus der Zeit, in der die Sicherheitsvorschriften weniger regelorientiert waren. Aufgrund der steigenden Anforderungen ist es daher notwendig, die Gebäude an die aktuellen Sicherheitsstandards, wie beispielsweise des Brandschutzes, anzupassen (Haselsteiner et al., 2010; ZNWB, 1999).

Pädagogische Konzepte

Eine umfassende Schulsanierung bedeutet neben einer baulichen Erneuerung ebenfalls die Berücksichtigung des pädagogischen Wandels (Dürheimer & Seyffert, 2009). Wie bereits beschrieben, haben sich die pädagogischen Konzepte im Laufe der Jahre stetig weiterentwickelt und verändert. Pädagogische Konzepte moderner Bildungseinrichtungen erfordern, im Gegensatz zum traditionellen monofunktionalen Raum, flexible Raumstrukturen für offene Lernlandschaften, um unterschiedliche Lernsituationen wie Gruppenarbeit oder Stillarbeit zu ermöglichen (Bahner, 2017; BMUB, 2014; Grewe, 2020). Der Sanierungsstau der Schulgebäude kann als Chance angesehen werden, entsprechende Anpassungen der pädagogischen Konzepte in die bauliche Sanierung zu integrieren (Grewe, 2020). Dass eine solche Adaptierung auch mit den häufig starren und funktionellen Strukturen des Bestands möglich ist, zeigen bereits gelungenen Umsetzungen (Bahner, 2017; Grewe, 2020; MSJG, 2017), wie bei der Heinrich-Nordhoff-Gesamtschule in Wolfsburg. Für das kompakte Bestandsschulgebäude aus den 1970er-Jahren wurden in einem partizipativen Prozess aller Mitwirkenden neue Raumkonzepte entwickelt. Die Umstrukturierung der Innenräume mit neuen Zonierungen und Funktionsmischungen revitalisieren das bestehende Gebäude als einladende Lernlandschaft (baupiloten, 2024).

Der dringende Bedarf an flexiblen Raumstrukturen wird insbesondere durch die Einführung der geplanten Bildungskonzepte wie Ganztagsbetreuung und Inklusion verstärkt. Hierdurch werden die Anforderungen an die Konzepte nochmals verschärft. Während Ganztagschulen als Lern- und Lebensort für vielfältige Aktivitäten auch außerhalb des Lernens geeignet sein müssen, bedarf ein inklusives Schulsystem weitreichende pädagogische und räumliche Anpassungen aufgrund der unterschiedlichen Förderungsbedarfen der SchülerInnen (Bahner, 2017; Grewe, 2020). Darüber hinaus ermöglicht Sanierung eine Ausschöpfung der räumlichen Potenziale durch eine Anpassung an ein mehrfunktionales Gebäude. Derzeit sind Schulen durch

einen hohen temporären Leerständen ausgezeichnet und stellen eine ineffiziente, unökologische und unwirtschaftliche Nutzung dar (MSJG, 2017).

Grundsätzlich ist bei der nachhaltigen Sanierung von Schulgebäuden eine ganzheitliche Betrachtung von hoher Bedeutung. Neben der bautechnischen Sanierung der Gebäude ist eine Integration der pädagogischen Konzepte in den Sanierungsprozess essenziell, um umfassend bessere Lernort zu schaffen (Haselsteiner et al., 2010; MSJG, 2012).

Herausforderung bei der Sanierung von Schulgebäuden

Die Sanierung von bestehenden Schulgebäuden begegnet einer Vielfalt an Herausforderungen. Eine Vielzahl resultiert aus dem Konflikt mit heutigen Anforderungen der Bauordnungen und Richtlinien. Wie bereits in Bezug auf den Sanierungsbedarf erläutert, entsprechen die Schulgebäudebestände weder baulich noch pädagogisch den aktuellen Normen und Vorstellungen. Die Vielzahl der im Schulbau geltenden Regelwerke, welche sich noch immer an der Typologie der klassischen Gangschule orientieren, schränken die Möglichkeiten für Umbau- und Sanierungsmaßnahmen erheblich ein. Ein häufiger Konflikt umfasst den Brandschutz der Gebäude. Die bestehenden Vorschriften stehen im Widerspruch der modernen Konzepte mit dem Wunsch nach Transparenz, offenen Lernbereichen und dem Verzicht der klassischen Flure als reine Erschließungsfläche (Djahanschah et al., 2017; Haselsteiner et al., 2010; Schulbau Open Source, 2024). Diese Flächen stellen bis zu 50% des gesamten Flächenanteils dar (Leerstandskonferenz, 2015) und bieten ein enormes Potenzial zur pädagogischen Nutzung im Sinn von Aufenthalts-, Arbeits- und Kommunikationsorten. Mit den strikten brandschutztechnischen Anforderungen ist dies jedoch kaum vereinbar (Djahanschah et al., 2017; Haselsteiner et al., 2010; Schulbau Open Source, 2024). Die Konflikte erfordern eine umfassende Überarbeitung der Schulbaurichtlinien an die modernen pädagogischen und energetischen Anforderungen, um zukunftsfähige Schulgebäude zu gestalten (Djahanschah et al., 2017).

Eine weitere Herausforderung bei der Sanierung von Schulgebäuden stellt die Gewährleistung der architektonischen Qualität dar. Eine erfolgreiche Sanierung erfordert nicht nur die Berücksichtigung der Energie- und Kosteneffizienz, sondern auch von architektonischen Aspekten. Denn durch energetische Sanierungsmaßnahmen wie das Dämmen der Hüllfläche oder der Austausch der Fenster wird das architektonische Erscheinungsbild verändert und die Architektursprache der jeweiligen Epoche geht vielfach verloren. Neben der materiellen Beständigkeit, ist die gesellschaftliche

Akzeptanz und Wertschätzung für eine langfristige Nutzung im Sinne der Nachhaltigkeit essenziell. Ein respektvoller Umgang und eine umfassende Auseinandersetzung mit dem Bestand sind bei der Sanierung entscheidend, um sowohl die energetischen Anforderungen als auch die architektonische Integrität der Schulgebäude zu gewährleisten (Djahanschah et al., 2017; Haselsteiner et al., 2010; Krötsch et al., 2024).

Schulbau als partizipativer Prozess + Integrale Planung

Neben den baulichen Herausforderungen stellt die Sanierung von Schulgebäuden auch aus planerischer Sicht Besonderheiten dar. Für das Errichten nachhaltiger und zukunftsfähiger Schulgebäude ist eine enge Abstimmung der Bereiche von Architektur und Pädagogik unerlässlich. Die Planung sollte als partizipativer Prozess gestaltet werden, um die Bedürfnisse aller Beteiligten zu berücksichtigen. Die sogenannte „Phase Null“ ist im Schulbau ein wesentlicher Bestandteil des Konzepts. Sie sieht die frühzeitige Einbindung aller Mitwirkenden in den Planungsprozess vor und schafft eine solide Grundlage für das gesamte Projekt (Djahanschah et al., 2017; MSJG, 2017). Insbesondere die Ziele hinsichtlich der Nachhaltigkeit gilt es bereits zu Beginn zu definieren, um eine umfassende Anwendung zu gewährleisten (Djahanschah et al., 2017). Ergänzend zum partizipativen Planungsprozess ist für eine ganzheitliche Betrachtung von Schulgebäudesanierungen eine integrale Planung zu berücksichtigen. Das Konzept zielt auf eine frühzeitige Integration und Zusammenarbeit der relevanten Disziplinen und umfasst ArchitektInnen, IngenieurInnen, Fachplanende sowie ebenfalls Bauherrn und zukünftige Nutzende. Hierdurch wird die Berücksichtigung aller technischen, funktionalen, ökologischen und wirtschaftlichen Anforderungen sichergestellt (Djahanschah et al., 2017).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass zum Erzielen eines optimalen Ergebnisses bei der Sanierung von Schulgebäuden die Interdisziplinarität und synergetische Integration aller Planungsbereich von hoher Bedeutung ist.

Sanierungspotenziale

Die Bundesregierung verfolgt im Rahmen der Energieeffizienzstrategie das Ziel, den Gebäudebestand bis 2050 klimaneutral zu gestalten. Besonders bei der Vielzahl an Altbauten in Deutschland, die vor der Einführung der ersten Wärmeschutzverordnung 1979 errichtet wurden, besteht mittels umfassender Sanierungsmaßnahmen großes Potenzial für energetische Verbesserungen und Erreichung des Ziels. Als Indikator für den Fortschritt der energetischen Gebäudesanierung dient die Sanierungsrate (Nagel & Rukschcio, 2018). Im Wesentlichen zählt die Erhöhung der Sanierungsrate von

Altbauten von bislang ca. 1% auf 2% seit Jahren zu den Zielen der Bundesregierung. Der öffentliche Sektor erhält auch hier seine Vorbildfunktion, indem den öffentlichen Gebäuden eine anzustrebende Sanierungsrate von 3% zugeschrieben wird (BuVEG, 2023). Die Umsetzung bleibt bisher jedoch weit entfernt, derzeit erreicht die Sanierungsrate in Deutschland mit nur 0,7% einen aktuellen Tiefpunkt (DENEFF, 2024).

Im Rahmen Ihrer Dissertation untersuchte (Scharte, 2016) die Potenziale der Sanierungsmaßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz bei Schulgebäuden in Deutschland. Die Untersuchung erfolgte hinsichtlich des Primärenergiebedarfs sowie der Treibhausgasemissionen im Vergleich zwischen einer Sanierungsrate von 1%/a zu 2%/a. Dabei wurde in einem Untersuchungszeitraum von 2012 bis 2030 die zukünftige Entwicklung des Schulgebäudebestandes berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen bei einer Sanierungsrate von 1%/a eine Reduktion des Primärenergiebedarfs von 24% und bei 2%/a eine Verminderung von 36%. Diese Werte beinhalten lediglich die auf die Energieeffizienzmaßnahmen zurückzuführenden Einsparungen. Grundsätzlich haben neben den Maßnahmen der energetischen Sanierung ebenso die Reduzierung der Anzahl sowie die Dynamik der Zu- und Abgänge von Gebäuden Einfluss auf die Reduktion. Inkludiert man diese Anteile steigen die Werte auf 43% bzw. 55%. Hinsichtlich der Treibhausgasemissionen beträgt die Senkung 41% und 53% und verläuft somit annähernd analog der ermittelten Primärenergiebedarfe (Scharte, 2016).

2.2.4 Politische und rechtliche Rahmenbedingungen

Die Sanierung von Schulgebäuden wird in Deutschland durch eine Vielzahl an politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen bestimmt. Neben im Hochbau gängigen Normen und Vorschriften, welche teilweise bereits in Kapitel 2.1.1 genannt wurden, stehen sowohl der Neubau als auch die Sanierung von Schulgebäuden einer Vielzahl an Regelungssystemen gegenüber (Bahner, 2017). Aufgrund der föderalen Struktur des Bildungssystems fällt die Bildungspolitik analog zur Finanzierung in die Zuständigkeit der Bundesländer. Dementsprechend variieren sowohl die jeweiligen Schulbaugesetzgebungen als auch die politischen Vorstellungen und Herangehensweisen bezüglich der derzeitigen Herausforderungen. Zudem entwickeln einzelnen Städte teilweise für spezifische Anforderungen eigene Konzepte und Vorgaben für die Planung von Schulen (Bahner, 2017; Beckel et al., 2004; Lederer & Pampe, 2011). Neben den Bauordnungen der Länder, Schulbaurichtlinien und Sonderbauverordnung umfassen die Anforderungen unter anderem §79 SchulG, Vorschriften des Brandschutzes sowie die Arbeitsstättenverordnung (Djahanschah et al., 2017). Darüber

hinaus sind ebenfalls Vorschriften der Unfallversicherungsträgern, welche primär die Sicherheitsaspekte des Schulbaus beinhalten, ein Bestandteil (Bahner, 2017). Um die Anforderungen an entsprechende Umgebungsbedingungen zu gewährleisten, müssen alle räumlichen Funktionsbereiche bestimmte Mindeststandards, betreffend der Akustik, Lufthygiene, Beleuchtung sowie klimatische Bedingungen, erfüllen (Bahner, 2017; Lederer & Pampe, 2011).

Die verschiedenen Regelungssysteme haben einen hohen Einfluss auf die Qualität von Schulgebäuden. Die unterschiedlichen Ausprägungen der länderspezifischen Richtlinien werden anhand des Umgangs mit Bestandsgebäuden sichtbar. Trotz der drängenden Notwendigkeit der Schulgebäudesanierung findet dieser kaum Berücksichtigung. Lediglich in Bremen lassen sich Angaben zum Umgang mit Klassenräumen im Bestand finden. In Bezug auf Nachhaltigkeit ist ein ressourcenschonender Einsatz von Baumaterialien und Heizenergien vorgeschrieben. Ergänzend existieren Empfehlungen zur Minimierung des Energieverbrauchs und Nutzung erneuerbarer Energien, konkrete Handlungsanweisungen fehlen jedoch (Lederer & Pampe, 2011).

Darüber hinaus variieren zudem die Schulförderungssysteme zwischen den einzelnen Bundesländern bzw. Kommunen. Politische Initiativen oder Programme zur Förderung von innovativen Schulbaukonzepten können hierfür eine wichtige Rolle spielen. Die Stadt Freiburg belohnt beispielsweise innovative Sanierungsprojekte von Schulgebäuden hinsichtlich der Nachhaltigkeit mit der Finanzierung aus einem Klimaschutzfonds (Lederer & Pampe, 2011).

Zusammenfassend wird deutlich, dass die Sanierung von Schulgebäuden in Deutschland einer Vielzahl politischer und rechtlicher Rahmenbedingungen vorangestellt ist, welche je nach Bundesland und Kommune zu unterscheiden sind. Eine ganzheitliche Betrachtung unter Berücksichtigung der Bauvorschriften, lokalen Bedürfnisse und Umweltaspekte ist bei der Planung unerlässlich.

2.3 Studien zur Schulgebäudesanierung

Aufgrund der Notwendigkeit im Bereich der Schulgebäudesanierung tätig zu werden, gibt es einige Studien und Forschungsarbeiten zu möglichen Sanierungskonzepten, sowie Endberichte der Deutschen Bundesstiftung Umwelt zu diversen Pilotprojekten. Eine umfassende Darstellung zu Sanierungsmaßnahmen der Gebäudehülle von bestehenden Schulgebäuden bieten sie jedoch nicht. Vielmehr stellen sie aber eine wichtige Datengrundlage zur Entwicklung einer Schulgebäudetypologie und der Ermittlung von Sanierungsmaßnahmen dar.

Für die Recherche der vorliegenden Arbeit ist das Forschungsprojekt Energieeffiziente Schule (EnEff: Schule), eine Begleitforschung gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, hervorzuheben. Das Projekt beinhaltet die Untersuchung und Auswertung von 12 Demonstrationsgebäuden in Deutschland, von denen 7 Sanierungsprojekte darstellen. Dies erfolgt unter Berücksichtigung eines integralen Sanierungsansatzes. Neben den unterschiedlichen Energiekonzepten werden ebenso die Kosten verglichen und die Optimierung der Nutzungsbedingungen berücksichtigt (Reiß et al., 2017). Darüber hinaus besteht eine Vielzahl an Untersuchungen von Referenzprojekten, die als Best-Practice-Beispiele aufgezeigt werden (BMW, 2013). Im Rahmen der Arbeit waren insbesondere diese für den Transfer auf den Gebäudebestand sowie künftige Sanierungsmaßnahmen bedeutend. Ergänzend hierzu bietet auch die Datengrundlage des internationalen Softwaretools „Energy Concept Adviser – Annex 36“ eine hilfreiche Grundlage für die vorliegende Arbeit. Diese umfasst eine Vielzahl an Referenzprojekten zum Gebäudebestand sowie zu umfassenden Sanierungsmöglichkeiten. Jedoch erfolgte seit 2004 keine Novellierung des Tools, weshalb weiteres tendenziell vernachlässigt werden kann (Annex 36, 2004).

Ein Großteil der aktuellen Forschung im Bereich der allgemeinen sowie der schulspezifischen Sanierung fokussiert sich auf die energetische Sanierung (Stahr et al., 2022). Dies wird ebenfalls bei den beiden zuvor genannten Forschungsprojekten verdeutlicht. Die ökologischen Aspekte finden hier keine Berücksichtigung bei der Untersuchung.

Für eine ganzheitliche Bewertung der Sanierungsmaßnahmen sowie der Entwicklung eines Sanierungskatalogs liefert das Forschungsprojekt HoEff-CIM wertvolle Erkenntnisse. Das Projekt bezieht sich hierbei nicht auf den Schulgebäudebestand, sondern auf die Gebäudesanierung von Hochschulgebäuden der Liegenschaft

München. Ziel des Projektes liegt darin anhand des Beispiels der LMU München den Beitrag von großen, heterogenen Gebäudebeständen zu einem klimaneutralen Gebäudebestand aufzuzeigen. Ein zentraler Aspekt der Forschung für die vorliegende Arbeit liegt in der Entwicklung einer Methode zur einfachen Abschätzung und Bewertung von energetischen, ökologischen und ökonomischen Einspar- und Sanierungspotenzialen. Hierzu werden die Sanierungsmaßnahmen der Gebäudehülle betrachtet und bewertet. Zur ökologischen Bewertung wurden mittels der Methodik der Ökobilanzierung die Umweltindikatoren GWP, PET, PERT der Sanierungsmaßnahmen herangezogen. Die Ökonomie wurde anhand der Amortisationszeit nach Holm (2015) ermittelt. Als letzteres erfolgt die energetische Bewertung durch die Simulation eines Modellgebäudes. Hiermit wird die prozentuale, auf Nettogrundfläche bezogene Heizenergieeinsparung, welche mit der Sanierung eines Bauteils erreicht wurde, ermittelt (Betzler et al., 2017).

Zusammenfassend geben die durchgeführten Studien zur Schulsanierung bzw. Bewertung von Sanierungsmaßnahmen für die vorliegende Arbeit wesentliche Erkenntnisse für die nachhaltige Sanierung von Schulgebäuden.

3 Entwicklung einer Typologie des Schulgebäudebestandes

Die umfangreiche Anzahl von Schulgebäuden erfordert eine systematische Einteilung mittels spezifischer Kriterien (Beckel et al., 2004; Lorbek, 2020; Scharte, 2016). Der Begriff des Typus findet in der vorliegenden Arbeit als ein Instrument für die Klassifizierung und Abstrahierung des untersuchten Schulgebäudebestandes Anwendung. Das Ziel der Differenzierung besteht darin, eine vorläufige Klassifizierung des Gebäudebestandes für die Untersuchung potenzieller Sanierungsmaßnahme zu erstellen. Dadurch bleibt ein bestimmter Bautypus trotz gebäudespezifischer Modifizierung und Anpassung stets erkennbar (Lorbek, 2020).

Im Folgenden werden die relevanten Gebäudetypologien anhand der ausgewählten Klassifizierungsmerkmale unterschieden. Hierbei werden baukonstruktive Ausgangssituationen für die anschließende Untersuchung der Sanierungsmaßnahmen festgelegt.

3.1 Methodik

Die Methodik zur Entwicklung einer Gebäudetypologie des Schulgebäudebestandes basiert auf der Definition von Klassifizierungsmerkmalen. Diese haben einen erheblichen Einfluss auf den Detaillierungsgrad der nachfolgenden Auswertung und setzen die Anzahl der Gebäudetypen fest. Meist werden zwei bis drei Hauptmerkmale ausgesucht, um eine zielgerichtete Klassifizierung zu gewährleisten. Für eine präzise Zuordnung des realen Gebäudebestandes zu den Gebäudetypen ist es wichtig, dass die entsprechenden Merkmale für eine große Anzahl an Gebäuden bekannt sind (Scharte, 2016). Die Herausforderungen der Klassifikation liegen darin, sowohl der Vielfalt des Gebäudebestands als auch der notwendigen Abstraktion für den spezifischen Anwendungsfall gerecht zu werden.

Es ist entscheidend, dass die ausgewählten Merkmale den Einfluss auf die baukonstruktiven Eigenschaften der Gebäudehülle berücksichtigen, um das Ziel der Klassifizierung mit einer entsprechenden Einteilung des Schulgebäudebestandes zu erreichen. Durch diese methodische Herangehensweise wird eine fundierte Grundlage für die weitergehenden Untersuchung hinsichtlich der Sanierungsmaßnahmen des Gebäudebestands geschaffen.

3.2 Klassifikation des Schulgebäudebestandes

Die Klassifikation des Schulgebäudebestandes erfordert zunächst die Bestimmung relevanter Klassifikationskriterien. Für eine fundierte Einteilung können hierzu verschiedene Parameter wie der Standort, die Nutzungsprozesse sowie bauliche Merkmale und die technische Gebäudeausrüstung herangezogen werden. Ein zentrales Kriterium stellt die Baualtersklasse dar. Diese gibt entscheidende Informationen über weitere, in Abhängigkeit stehende Einflussfaktoren wie die Eigenschaften der baulichen Ausführung und den Zustand der Gebäude (Lorbek, 2020; Scharte, 2016). In den Arbeiten von Scharte und Österreicher erfolgte die Einteilung der Merkmale insbesondere im Hinblick auf die Energieeffizienz von Gebäuden (Österreicher, 2015; Scharte, 2016). Aufgrund der weiterführenden Untersuchung des Gebäudebestands auf Bauteilebene bleiben spezifische, energiebezogene Parameter wie die Gebäudegröße in der Klassifizierung unberücksichtigt. Als mögliche Klassifikationskriterien werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die folgenden Faktoren identifiziert und festgesetzt: Baualtersklasse, Bauweise, Standort.

3.2.1 Einteilung der Klassifikationskriterien

Im Folgenden werden die festgesetzten Klassifikationskriterien zur Entwicklung einer Gebäudetypologie des Schulgebäudebestandes detaillierter beschrieben.

Baualtersklasse

Die Baualtersklasse stellt basierend auf ihren Einfluss auf die baulichen Merkmale und Eigenschaften der Gebäude eine wesentliche Grundlage in der Einteilung des Schulgebäudebestandes dar (Beckel et al., 2004). Die Festlegung der Baualtersklassen erfolgt in Deutschland nicht normiert (Lorbek, 2020). Während die IWU-Gebäudetypologie hinsichtlich dem Wohngebäudebestand in Deutschland in zwölf Baualtersklassen differenziert (Loga et al., 2015), bezieht sich die Einteilung im Bereich der NWG-Typologie in Deutschland nach dem IWU in drei Baualtersklassen (Hörner et al., 2022). Darüber hinaus variieren die Angaben weiterer Literatur, welche in der Arbeit von Scharte teilweise zur quantitativen Bestandsanalyse (vgl. Kapitel 2.2.1) herangezogen wurden, zwischen vier und zehn Baualtersklassen (Giebeler et al., 2008; Haselsteiner et al., 2010; Lorbek, 2020; Scharte, 2016; Schwarz et al., 2022).

Nach Scharte ist bei der Festlegung der Baualtersklassen zu berücksichtigen, dass die Änderungen hinsichtlich der Bauweise und Architektur der Gebäudeentwicklung sowie eine eindeutige Zuordnung des Gebäudebestandes durch die jeweiligen Bauklassen gewährleistet ist (Scharte, 2016). Im Hinblick auf diese Anforderungen sowie den bereits in Anlehnung an Scharte aufgezeigten quantitativen Schulgebäudebestand, wird die Einteilung der Baualtersklassen nach Scharte auf die vorliegende Arbeit übertragen. Ergänzend hierzu integriert die Baualtersklasseneinteilung von Hassler et al. in Lorbek (2020) sowohl baugeschichtliche Ereignisse, als auch weitere Rahmenbedingungen zur wirtschaftlichen Entwicklung und politischen Merkmalen (Lorbek, 2020). Unter Berücksichtigung dieser Literaturangaben sowie der verwendeten Datengrundlage aus Kapitel 2.2.2, werden die Baualtersklassen in Tabelle 3-1 zusammengeführt und aufgezeigt.

Tabelle 3-1: Baualtersklassen und baugeschichtliche Besonderheiten; eigene Darstellung nach (Scharte, 2016), (Lorbek, 2020) und (Klauß et al., 2009)

Baualters- klasse	Zeitraum	Baukonstruktive, soziale, politische und ökonomische Besonderheiten
BAK 1	Vor 1945	Gründerzeitbauten bis 1919, Zwischenkriegsbauten Dominanz Mauerwerksbauten; ab 1920: Stahlbeton; Etablierung industrialisierter Elemente der Eisenerzeugung 1929: Weltwirtschaftskrise mit rückläufiger Produktion
BAK 2	1945 - 1965	Wiederaufbau; Nachkriegszeit mit Mangelwirtschaft; einfache Bauweise (überwiegend Mauerwerksbau); 1952: Einführung DIN 4108 „Wärmeschutz im Hochbau“
BAK 3	1966 - 1977	Neue industrielle Bauweise; Fertigteilproduktion mit Vorfertigung; neue Materialien; erste Vorhangfassaden und Leichtbauversuche 1973: erste Ölkrise
BAK 4	1978 - 1995	1978: Erste Wärmeschutzverordnung (WSchVO) als Folge der Ölkrise; 1982/84: Zweite WSchVO 1989: Wiedervereinigung der DDR/ BRD
BAK 5	Ab 1995	1995: Dritte WSchVO wird wirksam + 2002: EnEV tritt erstmals in Kraft, wesentliche Reduzierung des Energiebedarfs; stetige Weiterentwicklung und Förderungen der Energiestandards

Bauweise

Aus der Einteilung der Baualtersklassen wird bereits der Zusammenhang zwischen dem Baualter und der Entwicklung der Bauweise deutlich (Beckel et al., 2004; Scharte, 2016). Es besteht nicht nur ein direkter Einfluss auf die architektonische Gestaltung, sondern auch auf die baukonstruktiven, -stofflichen sowie energetischen Eigenschaften der Gebäude. Letzteres wird beispielsweise anhand der Entwicklung der Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauteilen in Abhängigkeit des Baualters sichtbar (Bundesanzeiger, 2020; Reiß et al., 2017; Scharte, 2016). Vor dem Hintergrund der weiterführenden Untersuchung zu Sanierungsmaßnahmen der Gebäudehülle auf Bauteilebene ist die baukonstruktive Substanz der Schulgebäude ein entscheidendes Klassifizierungsmerkmal der Gebäudetypologie und wird daher separat zur Baualtersklasse aufgeführt.

Im Wesentlichen lässt sich die Entwicklung der Bauweise und Baustoffe in Abhängigkeit des Baualters für die vorliegende Analyse in Massivbauweise Mauerwerk sowie Stahlbeton als Fertigteil- oder Massivbauweise differenzieren (Beckel et al., 2004; Reiß et al., 2017; Scharte, 2016). Dies ist ebenfalls der Literaturlauswertung aus Kapitel 2.3.2 zu entnehmen. Eine genauere Darstellung der Bestandsgebäude erfolgt anschließend in Kapitel 3.3.

Standort

Die Entwicklung der Schulgebäude ist, wie bereits in Kapitel 2.2.2 erwähnt, während der Teilung Deutschlands innerhalb der Jahre 1949 bis 1989 zwischen West- und Ostdeutschland bzw. Alte und Neue Bundesländer zu unterscheiden. Neben einer Differenzierung der Schultypologie prägt diese Entwicklung zudem die verwendete Bauweise von Gebäuden in den Neuen Bundesländern. Standortbedingte Unterschiede über diese Einteilung hinaus sind nicht bekannt. Diese gilt es jedoch angemessen in der Entwicklung der Schulgebäudetypologie zu berücksichtigen (Beckel et al., 2004; Reiß et al., 2017). Daher erfolgt in den betroffenen Baualtersklassen 2 – 4 eine separate Betrachtung der Neuen Bundesländer.

3.2.2 Definition der Gebäudetypen

Basierend auf den zuvor genannten, festgelegten Klassifizierungskriterien der Schulgebäudetypologie lassen sich insgesamt 13 verschiedene Gebäudetypen identifizieren (vgl. Tabelle 3-2).

Tabelle 3-2: Übersicht der Schulgebäudetypologie

Baualter- klasse	Massivbauweise Mauerwerk	Skelett-/ Fertigteil- Bauweise Stahlbeton	Bauweise der Neuen Bundesländer
BAK 1 <i>vor 1945</i>	1 A	1 B	–
BAK 2 <i>1945 – 1965</i>	2 A	2 B	2 O
BAK 3 <i>1966 – 1977</i>	3 A	3 B	3 O
BAK 4 <i>1978 – 1995</i>	4 A	4 B	4 O <i>(1978 – 1989)</i>
BAK 5 <i>ab 1995</i>	5 A	5 B	–

3.3 Baukonstruktive Eigenschaften der Gebäudetypen

Für Schulgebäude in Deutschland existieren keine spezifischen, systematischen Erfassungen sowie umfassende Betrachtung typischer Bauteilaufbauten (Thiel & Riedel, 2011). Die Untersuchung der verschiedenen Bauweisen und Baustoffe von Schulgebäuden basiert auf einer umfänglichen Literaturrecherche, ergänzt durch Informationen aus der Analyse von Referenzgebäuden im Rahmen von Forschungsprojekten wie der Begleitforschung EnEff: Schule. Hierdurch wurden typische Bestandsgebäude und Bauteilaufbauten mit repräsentativem Charakter für die weiterführenden Untersuchungen im Rahmen der Arbeit identifiziert.

Neben den vorliegenden Studien bietet die einschlägige Literatur allgemeine Angaben zu Baukonstruktionen der entsprechenden Zeiten. Ohne einen spezifischen Bezug auf Schulgebäude liefern Giebeler et al. (2008) mit dem Atlas Sanierung in einer Einteilung

von vier Bauzeitphasen umfassende Beschreibungen zeittypischer Bauausführungen und Materialverwendungen (Giebeler et al., 2008). Ahnert und Krause (1993) zeigen zudem eine Vielzahl an typisierten Detailaufbauten der verschiedenen Bauteile aus den Jahren 1860 bis 1960 (Ahnert & Krause, 1993). Ergänzend hierzu bildet die Publikation des ZNWB eine fundierte Datengrundlage hinsichtlich der Typenschulbauten der neuen Bundesländer aus den 1950er bis 1980er Jahren sowie der Schulgebäude der Gründerzeit (Zentralstelle für Normungsfragen und Wirtschaftlichkeit im Bauwesen [ZNWB], 2002; ZNWB, 1999).

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen sowohl die unterschiedlichen baukonstruktiven Eigenschaften der Gebäude als auch Erkenntnisse über typische Mängel der Bauteile. Dies bietet eine fundierte Grundlage zur Untersuchung zukünftiger Sanierungsmaßnahmen im Zuge der folgenden Arbeit.

3.3.1 Bauweisen

Eine Zusammenstellung der aus der Recherche gewonnenen Erkenntnisse erfolgt in Tabelle 3-3. Diese ermöglicht ein fundiertes Verständnis der gebräuchlichen Baupraktiken und Materialien der jeweiligen Epochen und bildet die Grundlage für eine Kategorisierung der Gebäudeeigenschaften der verschiedenen Gebäudetypen.

Tabelle 3-3: Ergebnisse der Literaturrecherche zu der Bauweise von Schulgebäuden

Baualters- klasse	Bauweise	Beschreibung
BAK 1 <i>vor 1945</i>	Massiv (Beckel et al., 2004)	Massive, solide Bauweise; wenig Mängel (Beckel et al., 2004) Außenwände: Ziegelmauerwerk 38-51cm, ab 1920 Einsatz von Stahlbeton (Ahnert & Krause, 1993; Djahanschah et al., 2017; Giebeler et al., 2008) Decke: Holzbalkendecken, Massivdecken vereinzelt über Kellergeschoss (Ahnert & Krause, 1993)
BAK 2 <i>1945 – 1965</i>	Massiv (Reiß et al., 2017; ZNWB, 1999)	Außenwände: Mauerwerk; Stahlbeton-Skelettbauweise (Reiß et al., 2017); Kellerwände: Mauerwerk oder Stampfbeton (Giebeler et al., 2008); Decke: fast ausschließlich Massivdecken, große Vielfalt (Ahnert & Krause, 1993; Giebeler et al., 2008); Fenster: Holzverbundfenster, Holz Ein-/ Zweifachverglasung (Reiß et al., 2017)

<p>BAK 3 1966 – 1977</p>	<p>Fertigteil (Beckel et al., 2004; Reiß et al., 2017; ZNWB, 1999)</p>	<p>Decke/Außenwand: Montagebauweise aus Fertigteilen; Stahlbeton mit geringer Dämmung Dach: überwiegend Flachdach; Fenster: Ein- bzw. Zweifachverglasung (Djahanschah et al., 2017; Reiß et al., 2017; ZNWB, 1999)</p>
<p>BAK 4 1978 – 1995</p>	<p>Massiv (Reiß et al., 2017)</p>	<p>Außenwand: Massivbau aus Mauerwerk, Stahlbeton, Porenbeton (Bayern / Staatsministerium für Unterricht, Kultus, Wissenschaft und Kunst, 1995; Reiß et al., 2017)</p>
<p>BAK 5 ab 1995</p>	<p>Massiv / Leicht (Reiß et al., 2017)</p>	<p>Vielfalt an Bauweisen; Außenwand: Massiv: Stahlbeton mit Dämmung, Holz-Leichtbau; Fenster: 3-Scheiben- Wärmeschutzverglasung (Reiß et al., 2017)</p>

Ergänzend zu dieser Grundlage erfolgt in dem nächsten Abschnitt eine detaillierte Beschreibung der gebäudeumschließenden Bauteilaufbauten der BAK 2 und 3. Die Betrachtung dieser beiden Baualtersklassen ist für die nachfolgende Untersuchung der Sanierungsmaßnahmen, welche sich aufgrund der vorherrschenden Notwendigkeit ausschließlich auf die Gebäudehülle dieser Baualtersklassen fokussieren, essenziell.

3.3.2 Bestandskonstruktionen der BAK 2 und BAK 3

Nachfolgend werden die typischen Bauteilaufbauten sowie vorherrschende Schadensbilder der Baualtersklassen 2 und 3 basierend auf der zuvor genannten Datengrundlage vorgestellt. Es ist wichtig zu beachten, dass im Rahmen der Gebäudetypologie für die nachfolgende Erstellung eines Sanierungskatalogs auf eine allgemeingültige Darstellung und Umsetzung abstrahiert wird. Einzelnen Gebäude können daher spezifischere atypische Konstruktionen aufweisen. Eine detaillierte Bestandsaufnahme der vorhandenen Baukonstruktion vor einer Sanierung ist unerlässlich (Eßmann et al., 2022; Giebeler et al., 2008; Haselsteiner et al., 2010).

Alle Bestandskonstruktionen sind der Excel-Tabelle im Anhang II zu entnehmen.

Außenwand

Die Außenwände der Schulgebäude der BAK 2 und 3 zeichnen sich durch unterschiedliche Konstruktionsweisen aus, welche häufig die Einsparung von Material, Erstellungs- und Betriebskosten fokussieren (Giebeler et al., 2008). Um die 1950er Jahre bestehen eine Vielzahl an Schulgebäuden sowohl in West- als auch in

Ostdeutschland aus Mauerwerk (Beckel et al., 2004; Reiß et al., 2017; ZNWB, 1999). Hierbei wurde der Vollziegel durch den Lochziegel ersetzt. Dieser ermöglichte bei gleichem Wärmeschutz eine geringere Wandstärke sowie einen reduzierten Materialbedarf (Giebeler et al., 2008). Einzelne Gebäude, wie die Uhland Schule in Stuttgart, wurden bereits als Stahlbetonskelettbauten errichtet (Reiß et al., 2017). Ab Mitte der 1960er Jahre überwog der Einsatz von Stahlbeton (Annex 36, 2004; Reiß et al., 2017). Es kamen Betonfertigteile in ein- oder zweischaligem Aufbau oder als Sandwichelement mit ca. 5cm Kerndämmung zum Einsatz (Giebeler et al., 2008). Bei den Typenschulbauten der DDR war ausschließlich die vorgefertigte Montagebauweise vertreten (ZNWB, 1999). Bereits zur BAK 2 wurden natürliche Dämmstoffe wie Kork und Kokosmatten zunehmend durch künstliche Baustoffe ersetzt (Giebeler et al., 2008).

Die Konstruktion der Außenwände von den Schulgebäuden weist einige Schwächen auf und stellt, insbesondere bei der BAK 3, das größte Schadensbild der Gebäudehülle dar. Der sparsame Materialeinsatz zeichnet sich durch eine mangelhafte Wärmedämmung sowie eine erhöhte Durchfeuchtungsanfälligkeit aus. Hinzu kommt eine Vielzahl an unzureichenden Wärmebrücken. Insbesondere die für die BAK 3 typischen Sichtbetonfassaden sind häufig von Oberflächenschäden betroffen. Zudem stellen sich die Fertigteilbauelemente aufgrund der undichten Fugenausführungen und Schadstoffe des Fugenmaterials als besonders problematisch heraus (Annex 36, 2004; Giebeler et al., 2008; Reiß et al., 2017; ZNWB, 1999).

Kelleraußenwand

In der Errichtung der Kelleraußenwände ist zum Vergleich der vorherigen Bauzeit eine deutliche Weiterentwicklung zu erkennen. Während die Wände in der BAK 2 typischerweise aus Mauerwerk oder Stampfbeton mit einer Stärke von 30 bis 40 cm errichtet wurden, ersetzen diese ab Mitte der 1960er Jahre analog zur Außenwand Stahlbetonaufbauten. Abdichtungsarbeiten wurden zunehmend auf Bitumen- oder Asphaltbasis durchgeführt, sodass der Schutz gegen Feuchtigkeit weiter verbessert wurde. Insbesondere bei Bauten der 1950er Jahre sind jedoch häufig noch mangelhafte Abdichtungen und folglich feuchte Kellerwände sowie -böden zu verzeichnen (Diedrich, 2018; Giebeler et al., 2008).

Boden gegen Erdreich

Eine ähnliche Entwicklung ist bei der Bodenplatte und den Fundamenten zu erkennen. Beide wurden in der BAK 2 als unbewehrte Stampfbeton-Bauteile ausgeführt und wurden im Zuge der 1960er Jahre zunehmend durch bewehrte Stahlbetonaufbauten

hinsichtlich einer höheren Stabilität abgelöst. Die Stärke der Bodenplatten betrug in der Regel zwischen 10 und 15 cm. Insbesondere in BAK 3 gewann der Einsatz von Bitumen- und Kunststoffbahnen an Bedeutung, um die Feuchtigkeitsprobleme in den Kellern zu minimieren. Der Bodenbelag bestand meist aus einer dünnen Schicht Verbundestrich (Diedrich, 2018; Giebeler et al., 2008).

Geschossdecken

Die Geschossdecken, sowohl des Kellergeschosses als auch die oberste Geschossdecke, zeigt baualtersklassenübergreifend eine Vereinheitlichung in der Verwendung von massiven Flachdecken aus Stahlbeton (Diedrich, 2018; Giebeler et al., 2008; Reiß et al., 2017). Der Fußbodenaufbau variiert hinsichtlich der Dämmstärken von mindestens 8 bis 30 mm. Als Fußbodenbelag wurde in Schulen beispielsweise Linoleum verwendet, da es als keimtötend und pflegeleicht gilt. Zu den typischen Schadensbildern der Decken zählt insbesondere die schlechten Schalldämmwerte. Zudem müssen bei einer Sanierung die schadstoffhaften Baustoffe berücksichtigt werden, da unter Umständen asbesthaltige Klebmassen im Fußbodenaufbau verwendet wurden (Giebeler et al., 2008).

Dach

In der BAK 2 überwiegen Steildächer als ausführende Konstruktion bei Schulgebäuden (Reiß et al., 2017). Diese werden entweder aus Holzkonstruktionen (Giebeler et al., 2008) oder, in der DDR, aus vorgefertigten Betonsparren (Ahnert & Krause, 1993; ZNWB, 1999). Flachdächer aus Stahlbeton mit außenliegender Entwässerung fanden vereinzelt Anwendung. Die Durchsetzung von Flachdachkonstruktionen, als Kalt- und Warmdächer, erfolgte in den 1960er Jahren und dominiert ab diesem Zeitpunkt das Erscheinungsbild der Schulgebäude. Größtenteils weisen diese Dächer jedoch eine ungenügende Dämmschicht von 4 bis 6 cm auf. Darüber hinaus umfassen typische Mängel Undichtigkeiten der wasserführenden Schicht, defekte Dachentwässerungen sowie unzureichende Dachanschlüsse (Reiß et al., 2017). Ebenso zu beachten sind die möglichen Asbestfasern der damals verwendeten Bitumenklebmassen (Giebeler et al., 2008).

Fenster

In den beiden Baualtersklassen erfolgt primär die Ausführungen von Holzfenstern. Neben dem Holz-Einfachfenster mit Einfachverglasung kommen Verbundfenster aus Holz mit einer doppelten Einfachverglasung zum Einsatz (Giebeler et al., 2008; Reiß et

al., 2017). Letztere erzielen durch die doppelte Verglasung eine deutliche Verbesserung des U-Werts (Bundesanzeiger, 2020), welcher jedoch nach wie vor längst nicht den heutigen Standards entspricht. In den 1970er Jahren setzten sich die Zweischeiben-Isolierverglasung sowie Kunststoff- und Metallrahmen zunehmend durch (Diedrich, 2018). Die Fensterkonstruktionen weisen häufig Undichtheiten an den Anschlüssen mit Auswirkungen auf den thermischen Komfort sowie unzureichende Zustände durch enorme Abnutzungen auf (Diedrich, 2018; Giebeler et al., 2008; Reiß et al., 2017).

3.3.3 Wärmedurchgangskoeffizient der Bauteile

Die Bekanntmachung der Regeln der Datenaufnahme im Nichtwohngebäudebestand (Bundesanzeiger, 2020) bietet eine wesentliche Grundlage zur Bestimmung der U-Werte opaker und transparenter Bauteile in Abhängigkeit des Baualters sowie der Bauweise. Darüber hinaus erfolgt in (Thiel & Riedel, 2011) eine Präzisierung der in (Bundesanzeiger, 2020) aufgezeigten typisierten Bauteilaufbauten. Auf Basis dieser Datengrundlage werden die U-Werte der Bauteile im Urzustand ermittelt. Tabelle 3-4 stellt die entsprechende Zuordnung der U-Werte nach den kategorisierten Baualtersklassen der Bekanntmachungen zu den Baualtersklassen der klassifizierten Gebäudetypen des Schulbestandes dar.

Tabelle 3-4: Zuordnung der U-Werte aus den Bekanntmachungen zu den Baualtersklassen

Baualtersklasse	Zuordnung der U-Werte aus den Bekanntmachungen
BAK 1	Mittelwerte der U-Werte bis 1918 und 1919 – 1948
BAK 2	Mittelwerte der U-Werte von 1949 – 1957 und 1958 – 1968
BAK 3	U-Werte der Baualtersklasse 1969 – 1978
BAK 4	Mittelwerte der U-Werte von 1979 – 1983 und 1984 – 1994
BAK 5	U-Werte der Baualtersklasse ab 1995

Eine umfassende Übersicht der jeweiligen U-Werte der entsprechenden Bauteile ist Anhang II zu entnehmen.

4 Entwicklung eines Sanierungskatalogs

Der beträchtliche Investitionsstau von etwa 47 Milliarden Euro bei Schulgebäuden (Brand & Salzgeber, 2023) verdeutlicht den dringenden Bedarf an einem gezielten Sanierungskatalog. Dieser soll dazu beitragen, den mangelhaften Zustand der bestehenden Schulgebäude in Deutschland zu verbessern. Der Sanierungskatalogs konzentriert sich auf Schulgebäude, die den Baualtersklassen der Nachkriegszeit sowie der 60er- und 70er- Jahre angehören. Diese Gebäude stellen gemeinsam einen Großteil der Bestandsbauten dar und sind häufig in einem schlechten Zustand. Im Gegensatz dazu weisen die Bauten aus den Jahren vor 1945, wie bereits beschrieben, aufgrund ihrer einfachen, aber robusten Massivbauweise in der Regel einen besseren energetischen Zustand auf.

4.1 Ziel und Methodik

Basierend auf der Datenerhebung des Schulgebäudebestandes in Kapitel 3 werden im Folgenden Sanierungsmaßnahmen entwickelt, analysiert und bewertet, um sie anschließend in einem Maßnahmenkatalog zusammenzuführen. Vor der detaillierten Erläuterung der Sanierungsmaßnahmen und den einzelnen Bewertungskriterien wird zunächst das Ziel und die angewandte Methodik des Sanierungskatalogs beschrieben. Die Methodik zur Erstellung des Katalogs und zur Bewertung der Sanierungsmaßnahmen orientiert sich an der verwendeten Vorgehensweise des Forschungsprojektes HoEff-CIM für die Erstellung eines Sanierungsrankings von Hochschulgebäuden (Botzler et al., 2017).

4.1.1 Ziel des Sanierungskatalogs

Unter Berücksichtigung sowohl energetischer als auch ökologischer und ökonomischer Aspekte liegt das Ziel des Vorhabens zunächst in der Identifikation nachhaltiger Sanierungsmaßnahmen. Mittels einer standardisierten Bewertungsmethode, basierend auf spezifischen Kennwerten, sollen die Wirkungspotenziale verschiedener Sanierungsstrategien übersichtlich dargestellt werden und miteinander vergleichbar gemacht werden. Dieser Ansatz ermöglicht den EntscheidungsträgerInnen,

entsprechend der gesetzten Schwerpunkte und Zielsetzungen der Sanierung, die am besten geeignete Maßnahme zu ermitteln.

Der entwickelte Katalog zielt darauf ab, die Kommunen als Orientierungshilfe bei der Auswahl geeigneter Sanierungsmaßnahmen zu unterstützen und soll als Leitfaden für künftige Sanierungsprojekte dienen. Er bietet den Entscheidungsträgern einen umfassenden Überblick über die Möglichkeiten der energetischen, ökologischen und ökonomischen Sanierung. Die Identifikation von möglichen Potenzialen der jeweiligen Baualtersklassen und Bauteile strebt eine schnellere Bewertung und Einschätzung der Auswirkungen von den durchgeführten Maßnahmen an.

Die im Katalog zusammengefassten Sanierungsmaßnahmen erzielen somit einen Beitrag zur Etablierung eines nachhaltigen und klimaneutralen Gebäudebestandes der Kommunen. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass der Katalog lediglich als erste Orientierung für die Kommunen gedacht ist und eine detaillierte Bauplanung nicht ersetzen kann. Jede energetische Sanierung stellt einen individuellen Fall dar, der im Einzelfall eine gründliche Analyse und Prüfung der zu sanierenden Gebäude und ihrer spezifischen Bauteilkonstruktionen erfordert.

4.1.2 Methodik

Basierend auf einer umfassenden Daten- und Literaturrecherche im Bereich der Sanierung wurden im Anschluss an die vorgestellte Kategorisierung typischer Bestandskonstruktionen von Schulgebäuden in Kapitel 3.3 diverse Sanierungsmaßnahmen auf Bauteilebene definiert. Die ermittelten Maßnahmen konzentrieren sich ausschließlich auf die Sanierung der Gebäudehülle und umfassen die Regelaufbauten der folgenden Bauteile: Flachdach bzw. oberste Geschoßdecke, Außenwand, Kelleraußenwand, Bodenplatten bzw. Kellerdecke und Fenster. Obgleich die Betrachtung von spezifischen Anschlussdetails und Wärmebrücken kein Bestandteil im Rahmen der vorliegenden Untersuchung sind, wird deren gebäudespezifische Berücksichtigung vor einer Implementierung der Maßnahme dringend empfohlen.

Die Maßnahmen wurden in Abhängigkeit der konstruktiven und bauphysikalischen Rahmenbedingungen festgelegt. Grundlage für die Entwicklung der Maßnahmen bildet ein Vergleich der ermittelten U-Werte von bestehenden Bauteilaufbauten der jeweiligen Baualtersklassen mit den Anforderungen des GEG-Standards sowie eines Energiestandards in Anlehnung an das Effizienzhaus-40 Plus. Zusätzlich zeichnen sich die Sanierungsmaßnahmen durch die Verwendung unterschiedlicher Materialien aus,

wodurch ein Materialvergleich zwischen konventionellen und nachwachsenden Dämmstoffen im Kontext ökologischer Gesichtspunkte herangezogen wird.

Die resultierenden Bauteilaufbauten werden hinsichtlich dreier Hauptkriterien – Energieeinsparpotenzial, Ökologie und Ökonomie – eingehend analysiert und bewertet. Die entsprechend angewandten Methoden sind den jeweiligen Unterkapiteln zu entnehmen. Aufgrund der Fokussierung auf die Bauteilebene erfolgt die Analyse, Quantifizierung und Bewertung der Sanierungsmaßnahmen anhand der m²- Bauteilfläche. Diese Bewertung wird im Rahmen eines Vergleichsverfahrens durchgeführt, entweder übergreifend oder bauteil- bzw. baualtersklassenbezogen. Die Sanierungsmaßnahmen werden entsprechend fünf Wirkungskategorien zugeordnet, die mit ihrer Einteilung in „sehr gut“, „gut“, „befriedigend“, „ausreichend“ und „mangelhaft“ dem Schulnotensystem ähnelt.

Die spezifische Einteilung der Kategorien sowie die jeweiligen Bewertungskriterien werden im Anschluss an die Darstellung der untersuchten Sanierungsmaßnahmen in den nachfolgenden Kapiteln ausführlich erläutert.

4.2 Beschreibung der Sanierungsmaßnahmen

Für die Entwicklung und nachfolgende einheitliche Bewertung von Sanierungsmaßnahmen an Schulgebäuden ist es von essentieller Bedeutung, vorab die Randbedingungen klar zu definieren. Bereits in Kapitel 3.3 wurden hierzu die Bestandskonstruktionen von Schulgebäuden erläutert. Anhang II zeigt die spezifischen bauphysikalischen Gegebenheiten auf. Angesichts der Vielfalt potenzieller Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle werden im Folgenden die einzelnen betrachteten Sanierungsmaßnahmen im Detail beschrieben. Eine umfassende Dokumentation sämtlicher Sanierungsmaßnahmen an den Bestandskonstruktionen, einschließlich Angaben zu den verwendeten Materialien sowie dem detaillierten Schichtaufbau, ist den Tabellen im Anhang V zu entnehmen.

Vor der Durchführung von Sanierungsmaßnahmen ist eine sorgfältige statische Aufnahme und Prüfung des gesamten Bestandsgebäudes dringend erforderlich. Dies ist auf eine potenzielle zusätzliche Belastung bedingt durch die Sanierungsmaßnahmen zurückzuführen.

4.2.1 Außenwand

Gemäß Eßmann et al. (2022) werden die Dämmmaßnahmen für Außenwände in drei Ausführungsvarianten unterteilt: Außen-, Hohlraum- und Innendämmung. Im Rahmen dieser Untersuchung wird lediglich zwischen Maßnahmen zur Außen- und Innendämmung differenziert, wobei ein Rückbau von Bauteilschichten der bestehenden Konstruktionen in der Regel nicht notwendig ist. Insbesondere in Bezug auf die bestehenden Waschbeton- sowie Dreischicht-Fassadenelemente gilt dies jedoch im Einzelfall zu prüfen. Unsicherheiten hinsichtlich der Verankerungen der Elemente erfordern möglicherweise einen Teilrückbau bis zur Tragebene (Kalleja & Flämig, 1999). Das Gebäudeenergiegesetz (GEG, Anlage 7) sowie die DIN 4108-2 legen Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz der Außenwände fest, die in Kapitel 4.3.1 unter dem Aspekt der bauphysikalischen Anforderungen näher erläutert werden.

Außendämmung

Das Anbringen einer Außendämmung ermöglicht die Umhüllung des gesamten Gebäudes, einschließlich der vorhandenen Wärmebrücken. Daher ist die Variante aus thermischer Sicht einer Innendämmung vorzuziehen. Ein zusätzlicher Vorteil liegt in dem stabilen und behaglichen Raumklima, erzeugt durch die Speichermasse der innenseitig liegenden, massiven Wand (Eßmann et al., 2022). Es ist jedoch zu beachten, dass das Vergrößern der Wandstärke nach außen hin nicht nur das Erscheinungsbild verändert, sondern möglicherweise auch planerische Richtlinien wie die Abstandsflächen verändern kann (Richarz & Schulz, 2013). Abbildung 4-1 zeigt die drei Möglichkeiten, welche im Rahmen der untersuchten Sanierungsmaßnahmen betrachtet werden.

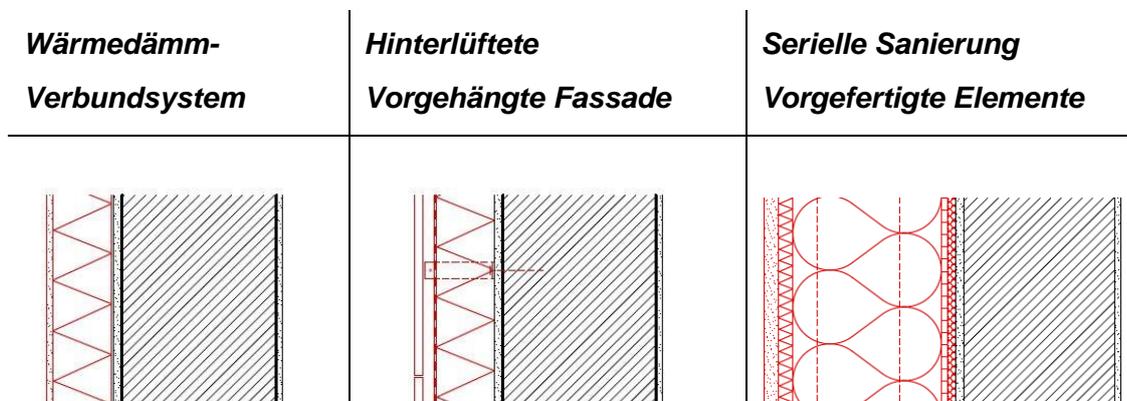


Abbildung 4-1: Sanierungsvarianten Außenwand; eigene Darstellung

Wärmedämmverbundsystem

Das Anbringen eines Wärmedämmverbundsystems wird in den meisten Fällen zur wärmetechnischen Sanierung von Außenwänden angewendet und hat sich als einfachste und kostengünstigste Form bewährt (Eßmann et al., 2022; Stahr, 2017). Bei dieser Dämmmaßnahme wird die Wärmedämmung direkt auf die bestehende Außenwand aufgebracht (vgl. Abbildung 4-1) und je nach verwendetem System entsprechend verputzt (BauNetz). Die Anwendung eines Wärmedämmverbundsystems ist gesetzlich geregelt und in Normen wie der DIN 55699 und DIN EN 13499 festgelegt. Es dürfen nur aufeinander abgestimmte Systeme eines Herstellers verwendet werden. Derzeit fällt die Auswahl des Materials meist auf Hartschaum- oder Mineralfaserplatten, jedoch eignen sich auch nachwachsende Rohstoffe wie Holzfaser oder Kork (BauNetz).

Vorgehängte hinterlüftete Fassade

Aufgrund ihres Konstruktionsprinzips eignet sich diese Variante gut für die nachträgliche Ertüchtigung von Bestandsgebäuden. Bei einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade befindet sich eine Luftschicht zwischen dem gedämmten Gebäude und der schützenden Bekleidung. Diese gewährleistet eine kontinuierliche Hinterlüftung der Außenhaut und isoliert sie in Bezug auf Feuchtigkeit und Wärme von der gedämmten Tragstruktur. Bei der Gebäudesanierung ist diese Variante zwar konstruktiv aufwendiger, stellt jedoch bauphysikalisch eine günstige Bauweise für Gebäudehüllen dar (Baunetz Wissen, 2024m). Einen großen Vorteil bietet die Vielzahl an einzusetzenden Dämmmaterialien. Die Auswahl an schützender Bekleidung ist ebenfalls umfangreich und enthält mit Materialien wie Holz, Keramik, Alu, Ziegel oder Zementplatten eine hohe Gestaltungsvielfalt (Stahr, 2017). Im Hinblick auf die Nachhaltigkeit und das Verwenden von nachwachsenden Rohstoffen wird im Rahmen der Sanierungsmaßnahmen als Bekleidung eine vorgehängte Holzfassade betrachtet.

Vorgefertigte Sanierungselemente

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung werden vorgefertigte Sanierungselemente, im Sinne einer Seriellen Sanierung, als eine weitere Option für die Außendämmung einbezogen. Die Vorzüge einer seriellen Sanierung wurden bereits in Kapitel 2.1.3 erläutert. Besonders erwähnenswert für den Schulbetrieb ist die durch den Vorfertigungsprozess verkürzte Arbeitszeit auf der Baustelle. Die vorgefertigten Fassadenelemente können während der Schulzeit im Werk hergestellt und innerhalb der Schulferien montiert werden (Reiß et al., 2017). Aufgrund von möglichen Unebenheiten der Bestandswand wird eine flexible Dämmschicht als Ausgleichsschicht

zwischen der neuen vorgefertigten Holzrahmenkonstruktion und der bestehenden Wandstruktur vorgesehen. Die Sanierungselemente sind an der Geschossdecke des Bestandsgebäudes befestigt und ein in sich statisches System. Analog zu der vorgehängten hinterlüfteten Fassade besteht die außenseitige Bekleidung aus einer Holzfassade. Bedingt durch das Eigengewicht der Fassade und der notwendigen Statik der tragenden Holzrahmenkonstruktion, findet diese Sanierungsmethode lediglich bei dem Energiestandard der Effizienzhaus Plus- Referenz Anwendung. Ergänzend der alternativen Materialien ist ebenso eine verputzte Außenansicht möglich, wodurch das äußere Erscheinungsbild, zumindest hinsichtlich der Materialität, erhalten bleiben kann.

Innendämmung

Wenn eine Außendämmung aufgrund der baulichen Veränderungen der Fassade nicht umsetzbar ist, stellt die Innendämmung eine weitere Möglichkeit zur nachträglichen Verbesserung der Energieeffizienz von Bestandsgebäuden dar. Insbesondere bei Gebäuden unter Denkmalschutz und erhaltenswerten oder stark strukturierten Fassaden, kann die Innendämmung als einzige Möglichkeit zur Reduzierung der Transmissionswärmeverluste der Außenwände dienen. Dennoch wird sie häufig als risikoreich hinsichtlich potenzieller Feuchtigkeitsschäden angesehen. Im Vergleich zur Außendämmung ist die Anwendung von Innendämmung grundsätzlich als bautechnisch anspruchsvoller einzuschätzen (Eßmann et al., 2022; Graefe, 2020). Unter Berücksichtigung einer fachgerechten Umsetzung sowie der Auswahl geeigneter Baustoffe können jedoch positive Ergebnisse erzielt werden. Je nach Dämmmaterial erfolgt der Einbau mittels einem Putzsystem für die Oberfläche oder Ständerwerk mit Dampfsperre und Gipskarton-Bekleidung. Für eine einheitliche Bewertung der Maßnahme erfolgt im Rahmen dieser Arbeit dämmstoffübergreifend die zweite Ausführung. Eine gründliche bauphysikalische Analyse und Simulation der Wärmebrücken sind bei der Innendämmung der Außenwand unerlässlich. Zur Wärmebrückenminimierung bietet sich beispielsweise der Einsatz von Flankendämmung zu den angrenzenden Bauteilen an (Baunetz Wissen, 2024c; Graefe, 2020).

Neben den bauphysikalischen Herausforderungen stellt insbesondere der einhergehende Raumverlust einen erheblichen Nachteil der Innendämmung dar (Graefe, 2020). Es sei darauf hingewiesen, dass gemäß den Bestimmungen des GEG, Anlage 7, keine spezifischen Anforderungen bezüglich einer raumseitigen Dämmung von bestehenden Außenwänden gestellt werden. Die Einhaltung des Mindestwärmeschutzes ist jedoch unabhängig dieser Auflagen erforderlich (Eßmann et al., 2022).

Aufgrund ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit von $0,007 \text{ W/(mK)}$ bieten Vakuum-Isolationspaneele bereits mit geringen Dicken eine effektive Wärmedämmung und stellen diesbezüglich eine innovative Alternative zu herkömmlichen Dämmstoffen mit einer Wärmeleitfähigkeit von $0,035$ bis $0,045 \text{ W/(mK)}$ dar. Die praktische Anwendung ist jedoch bedingt durch ihre hohe Empfindlichkeit und die Gefahr, der Verletzung der Hülle als risikoreich anzusehen. Zudem erfordert der Einsatz einen erhöhten Planungsaufwand, da die Paneele passgenau vorgefertigt werden und ein exaktes Aufmaß sowie detaillierte Verlegepläne benötigen (Jacob-Freitag, 2015). Die Anwendung ist daher als projektspezifische Sonderlösung zu betrachten, wird jedoch für einen Vergleich mit in die Untersuchung einbezogen. Obwohl Kalziumsilikatplatten eine vergleichsweise hohe Wärmeleitfähigkeit ($0,065 \text{ W/(mK)}$) aufweisen, sind sie aufgrund ihrer feuchtetechnischen Eigenschaften besonders bei feuchten Wänden geeignet. Jedoch ermöglichen diese lediglich das Einhalten der hygienischen erforderlichen Mindestdämmung sowie das Unterbinden von Kondenswasser. Eine Dämmung nach GEG-Anforderungen ist aufgrund der notwendigen Dämmstärke nicht umzusetzen (Graefe, 2020). Vor dem Hintergrund des Raumverlustes werden im Rahmen des Sanierungskatalogs Dämmmaterialien mit einer höheren Wärmeleitfähigkeit wie beispielsweise Kork ($0,050 \text{ W/(mK)}$) und Kalziumsilikat nicht betrachtet.

Alternative Fassadensysteme

Ergänzend der zuvor aufgezeigten Sanierungsmaßnahmen, gilt es die Integration von alternativen Fassadensystemen zu berücksichtigen.

Fassadenbegrünung

Die Implementierung von Fassadenbegrünung bei Schulgebäuden bietet eine Vielzahl von Vorteilen, insbesondere im Hinblick auf das Klima und die Umwelt. Sie stellt eine effektive Möglichkeit dar, ungenutzte Flächen, vor allen hinsichtlich der zunehmenden Flächenversiegelung, zu nutzen (Stahr, 2017). Im Kontext von Schulbauten bietet die Integration von Fassadenbegrünung neben positiven gesundheitlichen Auswirkungen und der Verbesserung des Umgebungs- und Raumklimas (Stahr, 2017), eine Möglichkeit zur Sensibilisierung der SchülerInnen und Lehrkräfte für den Klimaschutz. Darüber hinaus ermöglichen sie durch die Förderung der Biodiversität und die Schaffung von Lebensräumen für Flora und Fauna einen praxisnahen Lehransatz (Hollands, 2020). Die integrierte Fassadenbegrünung an Schulgebäuden ermöglicht Kommunen und Schulen ihrer Vorbildfunktion gerecht zu werden.

Trotz der zahlreichen Vorteile der Fassadenbegrünung ist es wichtig, den ganzjährigen technischen Aufwand sowie die regelmäßige Pflege zu berücksichtigen. Letztere lässt sich jedoch auch durch die Integration in den Lehrplan im Rahmen der Schulorganisation bewältigen (Hollands, 2020). Zudem sind bei einer Umsetzung, sowohl die Integration in die Haustechnik und die statischen Anforderungen der Fassade, als auch die bauordnungsrechtlichen Vorgaben, einschließlich des Brandschutzes, zu prüfen (Stahr, 2017).

PV- Fassadenkonstruktionen

Die unverschatteten Bereiche von Fassaden bieten die Möglichkeit der Integration von Photovoltaik an Bestandsgebäude. Sowohl die Sanierungsmaßnahmen der vorgehängten hinterlüfteten Fassade als auch die Methode der seriellen Sanierung ermöglichen das Einbinden von aktiven Solarmodulen in die Fassade, indem sie anstelle der herkömmlichen Verkleidung installiert werden. Im Vergleich zu geneigten Systemen bringen senkrecht angebrachte Module keine optimale Einstrahlungsbedingungen für eine solare Stromerzeugung mit sich. Dennoch können sie eine praktikable Alternative oder Ergänzung darstellen (Baunetz Wissen, 2024h). Die gestalterischen und technischen Auswirkungen sollten bei der Planung dringend berücksichtigt werden.

4.2.2 Kelleraußenwand

Ähnlich zur überirdischen Außenwand besteht bei der Nutzung von Kellerräumen die Möglichkeit, die an das Erdreich grenzenden Wände beheizter Räume sowohl auf der Außen- als auch auf der Innenseite zu dämmen (Eßmann et al., 2022). Diese beiden Maßnahmen sind im Sanierungskatalog enthalten.

Außendämmung

Für die außenseitige Dämmung ist das Freilegen der Kellerwand notwendig. Die Umsetzung hierfür ist projektspezifisch zu prüfen. Grundsätzlich erfordert die Maßnahme einen deutlich höheren konstruktiven sowie resultierend auch finanziellen Aufwand (co2online, 2024). In diesem Fall wird neben einem Abdichtungssystem in Form von einer Feuchtigkeitssperre eine Perimeterdämmung vollflächig an der Außenwand angebracht. Bei der Perimeterdämmung ist auf eine Zulassung für den vorgesehenen Einsatzzweck zu achten. Materialien wie extrudiertes Polystyrol (XPS) und Schaumglas verfügen über eine entsprechende Zulassung (Eßmann et al., 2022)

und werden daher als einzige Alternativen für diese Sanierungsmaßnahme in Betracht gezogen.

Innendämmung

Die wesentliche Durchführung einer innenseitigen Dämmung der Kelleraußenwand erfolgt analog der überirdischen Außenwände. Ergänzend hierzu ist neben einer dampfdiffusionsdichten Schicht bei feuchten Kellerwänden das innenseitige Anbringen einer durchgetrockneten mineralischen Abdichtung zu beachten (Graefe, 2020). Die Auswahl der Materialien wurde hierfür auf je einen konventionellen, innovativen und ökologischen Dämmstoff beschränkt.

4.2.3 Geschosdecke gegen unbeheizte Kellerräume

Wird der Keller eines Gebäudes nicht beheizt, muss die Kellerdecke den entsprechenden Energieanforderungen gerecht werden. Die Sanierungsmaßnahmen der nachträglichen Dämmung der Geschosdecke gegen unbeheizte Kellerräume lassen sich in zwei Möglichkeiten unterteilen, die unterseitige Dämmung und die oberseitige Dämmung im Bereich des Fußbodenaufbaus.

Aufgrund von Wärmebrücken im Bereich des Sockels ist eine ausreichende Sockeldämmung notwendig und zu überprüfen, da andernfalls die Effektivität beeinträchtigt ist und feuchtetechnischen Problemen auftreten können (Eßmann et al., 2022). Gemäß DIN 4108-2 ist die Sockeldämmung bis mindestens 50 cm unterhalb der Oberkante der Geländehöhe zu führen.

4.2.3.1 Unterseitige Dämmung

Sofern die Raumhöhe im Keller dies zulässt, können Kellerdecken einfach, effektiv und kostengünstig von der raumabgewandten Seite saniert werden (KfW, 2024a). Hierfür eignen sich eine Vielzahl an sowohl konventioneller als auch ökologischer Dämmmaterialien, die an der Geschosdecke entweder durch Verklebung, Dübel oder in Form von abgehängten Konstruktionen angebracht werden. Im Rahmen des Sanierungskatalogs erfolgt eine einheitliche Betrachtung letzterer Variante.

4.2.3.2 Oberseitige Dämmung

Analog zur Verringerung der Geschosshöhe im Keller bei der raumabseitigen Dämmung, ist bei der oberseitigen Dämmung der Kellerdecke die Reduzierung der Geschosshöhe im Erdgeschoss aufgrund des erhöhten Fußbodenaufbaus mit

resultierenden Änderungen bei Sturz- und Brüstungshöhen zu berücksichtigen. Aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit und geringen Dämmdicken von Vakuumisoliationspaneelen sind diese auch in diesem Anwendungsbereich von Vorteil.

Es ist zu beachten, dass in Schulgebäuden teilweise schützenswerten Oberflächen wie Terrazzo-Beläge in den Erschließungsbereichen verlegt sind. In solchen Fällen ist die Überlegung von Ausgleichsdämmvarianten erforderlich. Diese benötigen eine Prüfung im Einzelfall mit genauer Berechnung der Wirkung und werden daher bei den Sanierungsmaßnahmen nicht berücksichtigt (Haselsteiner et al., 2010).

Zudem sind die reduzierten Anforderungen gemäß GEG, Anlage 7, bei der Dämmung der Kellerdecke mit dem Einbau eines neuen Fußbodenaufbaus zu berücksichtigen. Im Vergleich zur unterseitigen Dämmung erhöht sich der U-Wert von 0,30 auf 0,50 W/(m²K) (Eßmann et al., 2022).

4.2.4 Erdberührter Boden

Grundsätzlich lassen sich die Sanierungsmaßnahmen der Bodenplatte ebenfalls in auf- und unterseitige Dämmmaßnahmen unterteilen. Aufgrund des hohen konstruktiven und kostentechnischen Aufwands der letztgenannten Variante werden in der Regel bei der energetischen Sanierung und auch im Rahmen des Sanierungskatalogs lediglich die oberseitige Dämmung im Bereich des Fußbodenaufbaus betrachtet. Die Umsetzung erfolgt analog zur oberseitigen Dämmung der Geschossdecke. Daher ist auch in diesem Fall sowohl die Überprüfung einer ausreichenden Geschosshöhe im Voraus als auch die Betrachtung der Wärmebrücken im äußeren Sockelanschluss notwendig.

4.2.5 Geschossdecke zu unbeheizten Dachräumen

Die Dämmung der obersten Geschossdecke stellt eine verhältnismäßig kosteneffiziente und energetisch effektive Maßnahme zur Verbesserung der Energieeffizienz dar (Eßmann et al., 2022). Angesichts der üblicherweise ungenutzten Dachräume von Schulgebäuden (Scharte, 2016) beschränken sich die betrachteten Sanierungsmaßnahmen ausschließlich auf das Anbringen der Wärmedämmung auf der Kaltseite. Die Ausführung der Dämmung hängt von der geplanten Nutzung ab und unterscheidet sich je nachdem, ob die Geschossdecke begehbare ist oder nicht, bzw. nur für Wartungszwecke zugänglich sein soll. Für eine allgemeingültige Betrachtung beinhaltet die untersuchte Sanierungsmaßnahme die Zugänglichkeit der Geschossdecke. Dies erfordert eine vollflächige obere Holzabdeckung und je nach verwendetem

Dämmmaterial gegebenenfalls eine zusätzliche Konstruktion aus Lagerhölzern. Dabei ist eine Luftdichtheit der Geschossdecke sicherzustellen, um einem unerwünschten Feuchtigkeitsanstieg entgegenzuwirken (Eßmann et al., 2022).

4.2.6 Flachdach

Die Errichtung von Flachdächern bietet eine große Vielfalt an Variationen hinsichtlich ihrer Konstruktionsweise, Nutzung und Auflasten, die individuell bei der Umsetzung von energetischen Verbesserungen berücksichtigt werden müssen (Eßmann et al., 2022). Grundsätzlich lassen sich die Konstruktionsweise in Warm- Kalt- und Umkehrdach unterteilen (vgl. Abbildung 4-2). Innerhalb des Rahmens dieser Untersuchung umfassen die Sanierungsmaßnahmen ausschließlich die ungenutzten Flachdachaufbauten von Warm- und Umkehrdach, da diese die Standardausführungen darstellen. Aufgrund der bauphysikalischen Herausforderungen (Eßmann et al., 2022) wird die Möglichkeit einer Innendämmung in der Untersuchung ebenfalls nicht berücksichtigt.

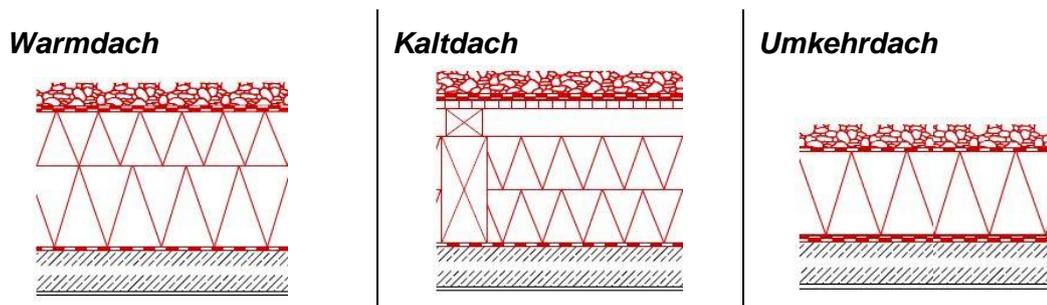


Abbildung 4-2: Übersicht der Flachdachkonstruktionen (eigene Darstellung)

Alle Konstruktionen werden für einen einheitlichen Vergleich mit dem konventionellen Aufbau eines Kiesdaches betrachtet. Alternative Möglichkeiten für die obere Abschlusslage werden im Anschluss zusätzlich erläutert.

Gemäß den Anforderungen des GEG ist zu berücksichtigen, dass der Ersatz der Abdichtung notwendig ist. Angesichts der häufigen Undichtigkeiten der bestehenden Flachdächer sowie potenzielle Schadstoffe bei Dampfsperre und Dämmung sehen die betrachteten Sanierungsmaßnahmen den vollständigen Rückbau der bestehenden Dachabdichtungen vor.

Bei den Sanierungsmaßnahmen ist die Erhöhung des Bauteilaufbaus zu beachten. Neben der Veränderung des Erscheinungsbildes durch veränderte Dachansichten sind auch normgerechte Anpassungen der Attikaausbildung sowie bauordnungsrechtliche Anforderungen wie Abstandsflächen bei der Planung zu berücksichtigen (Eßmann et al., 2022; Haselsteiner et al., 2010). Im Falle einer Begrenzung der Aufbaustärke durch

die vorhandene Dachaufkantung eignen sich insbesondere Materialien mit guten Dämmeigenschaften wie PU-Hartschaum oder Vakuumisulationspaneelen (Baunetz Wissen, 2024i).

Warmdach

Für bestehenden Warmdächer besteht grundsätzlich die Möglichkeit einer Zusatzdämmung auf der vorhandenen Konstruktion, um den Abriss der Altkonstruktion und der damit verbundenen Entsorgungs- und Lohnkosten zu vermeiden. Diese Umsetzung birgt jedoch möglicherweise bauphysikalische Herausforderungen, insbesondere wenn Undichtigkeiten im Flachdach Feuchtigkeit in die Bestandskonstruktion eingebracht haben. Eine detaillierte Untersuchung des vorhandenen Dachaufbaus auf mögliche Feuchteintragungen ist daher unabdingbar (Eißmann et al., 2022). Aufgrund der gebäudespezifischen Gegebenheiten umfassen die untersuchten Sanierungsmaßnahmen in jedem Fall den Rückbau bestehender Abdichtungen und gegebenenfalls Dämmungen sowie den vollständigen Neuaufbau der Dachdämmung oberhalb der Dampfsperre.

Umkehrdach

Die Besonderheit des Umkehrdaches besteht darin, dass sich die Dachabdichtung unterhalb der Dämmebene befindet, sodass Dampfsperre und Dachdichtung in einer Ebene als eine Schicht zusammengefasst werden können (Stahr et al., 2022). Aufgrund des geringen Schutzes vor Feuchtigkeit werden an die Wärmedämmung besondere Anforderungen gestellt. Für diesen Einsatzbereich werden lediglich Dämmstoffe aus extrudiertem Polystyrol und Schaumglas verglichen.

Alternative Aufbauten

Gründach

Ebenso wie die Fassadenbegrünung stellt auch das Dach ein großes Flächenpotenzial zur Begrünung dar. Die Rückgewinnung der Vegetationsfläche bietet eine Vielzahl an ökologischen Vorteilen. Neben einer positiven mikroklimatischen Wirkung, Regenrückhalt und Verbesserung der Luftqualität, bieten Gründächer zudem Lebensräume für Tiere und Pflanzen. Im Wesentlichen gibt es zwei Arten der Dachbegrünung, extensiv und intensiv. Der Unterschied liegt in der Substratstärke und der entsprechenden Vegetation. Der höhere Substrataufbau einer intensiven Begrünung ermöglicht eine höhere Vielfalt von Pflanzen und Tieren sowie eine größere

Wasserspeicherung. Neben dem Nutzen steigert eine zunehmende Substratstärke jedoch auch die Kosten einer Dachbegrünung (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz [StMUV], 2024).

Konstruktiv ist grundsätzlich eine Umsetzung als Gründach bei allen zuvor beschriebenen Dachkonstruktionen möglich. Aufgrund der zusätzlichen Lasten durch das Eigengewicht des Gründachaufbaus sind beim Bauen im Bestand extensive Begrünungssysteme besser geeignet. Diese weisen im Vergleich zur intensiven Dachbegrünung durch einen reduzierten Substrataufbau ein geringeres Eigengewicht auf. Um sicherzustellen, dass sich die Bestandskonstruktion für eine nachträgliche Begrünung eignet, ist eine sorgfältige statische Prüfung im Einzelfall dringend notwendig (Baunetz Wissen, 2024g).

Photovoltaik-Anlage (PV)

Die nachträgliche Installation von PV-Anlagen ist ebenfalls grundsätzlich bei allen Flachdachtypen umsetzbar. Mit Hilfe der Anlagen erfolgt die Erzeugung von Strom durch die Energie der Sonne. Das Dach bietet eine große Fläche für solare Einträge und stellt meist den am wenigsten verschatteten Gebäudeteil dar. Insbesondere bei einem Flachdach ist die Anordnung einer solartechnisch idealen Ausrichtung und Neigung für maximale Einträge möglich. Es gibt eine Vielzahl von verschiedenen Systemen, welche sich im Wesentlichen hinsichtlich ihrer Konstruktion, Leistungsfähigkeit und Gestaltung unterscheiden. Die Auswahl ist im Rahmen der jeweiligen Nutzungsanforderungen sowie den verfügbaren Kosten abzustimmen. Eine gebäudespezifische, statische Prüfung hinsichtlich dem zusätzlichen Gewicht einer PV-Anlage ist auch in diesem Fall im Voraus zu berücksichtigen (Stahr & Hinz, 2011).

Extensive Dachbegrünung mit PV-Anlage

Bei einer Kosten-Nutzen-Bewertung verschiedener Dachsysteme des Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV, 2024) stellte sich die extensive Dachbegrünung mit PV gesamtheitlich als beste Option heraus. Der Vergleich beinhaltete die Systeme Kies, extensive und intensive Dachbegrünung mit und ohne PV-Anlage. Gegenüber einem konventionellen Aufbau mit Kies lohnt sich die Maßnahme sowohl aus ökologischer als auch gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Sicht. Hinsichtlich der ökonomischen Betrachtung anhand der Lebenszykluskosten schneiden die extensive Begrünung und das Kiesdach in etwa gleich ab, wobei das Kiesdach im Gegensatz zur Begrünung innerhalb des Betrachtungszeitraums nach 25 Jahren erneuert werden muss. Dank der Stromerzeugung mit PV amortisieren sich die

Ausgaben bereits nach wenigen Jahren. Der ökologische Nutzen ist bei einer Dachbegrünung jedoch deutlich höher, weshalb es diese zu bevorzugen gilt.

4.2.7 Fenster

Sanierungsmaßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von Bestandsfenstern mit hohem Transmissionswärmeverlust und Undichtigkeiten lassen sich in drei Hauptmaßnahmen unterteilen (Eßmann et al., 2022). Die erste Variante besteht in einem vollständigen Austausch der bestehenden Fenster. Dies ermöglicht eine problemlose Einhaltung der erforderlichen Energiestandards. Insbesondere da hinsichtlich einem erhöhten Energiestandard häufig speziell gefertigte Sonderkonstruktionen zu verwenden sind. Des Weiteren besteht zur Verbesserung der Effizienz die Möglichkeit, ein zusätzliches Vor- oder Innenfensters einzubauen, wodurch das Gesamtsystem nach dem Prinzip eines Kasten- oder Verbundfensters funktioniert. Hierbei bleibt in der Regel das bauzeitliche Fenster erhalten, um das Erscheinungsbild der Außenansicht zu bewahren. Eine weitere Option zur Beibehaltung des äußeren Erscheinungsbildes stellt der Austausch der Verglasung dar. Vorab ist jedoch im Einzelfall zu prüfen, ob der vorhandene Rahmen die Dicke einer Neuverglasung gemäß den GEG-Anforderungen aufnehmen kann. Diese beiden Methoden zur Erhaltung des äußeren Erscheinungsbildes sind insbesondere bei Baudenkmälern von großer Bedeutung. In diesem Fall können bei letzterer Methode die Anforderungen an die Verglasung abweichen (Eßmann et al., 2022).

Aufgrund der zuvor genannten Aspekte wird im Rahmen dieser Arbeit lediglich ein Gesamtaustausch der Fenster betrachtet. Im Hinblick auf die geringeren Energieanforderungen erfolgt ein Vergleich zwischen Holz-, Kunststoff- oder Holz-Aluminium-Rahmen, wobei der Einbau letzterer in den betrachteten Referenzprojekten überwiegt.

Neben dem U-Wert spielt bei der Auswahl der Fenster zusätzlich der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) des Fensterglases eine Rolle. Über den g-Wert kann der Energiegewinn durch die Sonne in kalten Monaten oder die Belastungen im Sommer bei identischer Fenstergröße bestimmt werden (Haselsteiner et al., 2010). Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt ist die Positionierung des Fensters innerhalb der Wandkonstruktion, um das Risiko von Wärmebrücken zu reduzieren (Eßmann et al., 2022). Daher wird bei den untersuchten Sanierungsmaßnahmen das Fenster in der Dämmebene platziert.

4.3 Energetische Bewertung

Die Bewertung der energetischen Qualität der beschriebenen Sanierungsmaßnahmen zu den Bauteilen der Gebäudehülle erfolgt anhand einer Bewertungsmethode mittels dem U-Wert. Darüber hinaus werden ebenso die bauphysikalischen Anforderungen an ein Bauteil berücksichtigt. Nachfolgend werden die einzelnen Anforderungen, welche innerhalb der Untersuchung Anwendung finden, kurz beschrieben.

4.3.1 Allgemeine bauphysikalische Anforderungen

Eine Übersicht der vielzähligen Anforderungen, welche an Bauteile gestellt werden, wurde bereits in Kapitel 2.1.1 aufgezeigt. Für die Luftdichtigkeit nach DIN 4108-7 sowie den Schallschutz nach IDN 4109-1 ist aufgrund der gebäudespezifischen Unterschiede keine allgemeingültige Betrachtung möglich. Daher bleiben die Anforderungen bei der Ermittlung der Sanierungsmaßnahmen unberücksichtigt, sind jedoch im Einzelfall zu prüfen. Die Brandschutzanforderungen nach DIN EN 13501-1/ -2 bzw. DIN 4102-1 wird bei der Erstellung der Sanierungsmaßnahmen ebenfalls nicht genauer betrachtet. Die Anforderungen an den Brandschutz ergeben sich in Abhängigkeit sowohl länder- als auch gebäudespezifisch Aspekte, weshalb eine übergreifende Berücksichtigung bei den Sanierungsmaßnahmen im Rahmen der Arbeit nicht möglich ist.

Die Anforderungen an den Wärme- und Feuchteschutz nach IDN 4108-2/ -3 werden bei der Ermittlung der Sanierungsmaßnahmen hinsichtlich der baulichen Mindestanforderungen grundsätzlich berücksichtigt. Die spezifischen Anforderungen betreffen neben dem sommerlichen Wärmeschutz unter anderem auch den U-Wert und die Dampfdiffusionsdurchlässigkeit von Bauteilen. Die Ermittlung der energetischen Qualität der beschriebenen Sanierungsmaßnahmen erfolgt mit Hilfe dem U-Wert Rechner des Online-Tools Ubakus (*Ubakus.De*, 2024). Hierüber wurde ebenfalls die qualitative Überprüfung des Feuchteschutzes hinsichtlich des Nachweises von Tauwasserausfall nach DIN 4108-3 berücksichtigt. Die Berechnung erfolgt anhand den Schichtdicken (vgl. Anhang V: Übersicht zu den Schichtaufbauten) und der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ nach DIN 4108-4 (Sprengard et al., 2014). Die notwendigen wärme- und feuchtetechnischen Kenndaten der unterschiedlichen Materialien werden ebenfalls im Anhang III aufgelistet. Für die Bestandskonstruktionen wurden zunächst Angaben der baualtersklassenspezifischen Kennwerte nach den Literaturangaben aus Kapitel 3.3 angenommen. Ergänzend hierzu wurde bei fehlenden

Angaben sowie für die Sanierungskonstruktionen die Werte einzelner Baustoffe nach DIN 4108-4:2020-11 und DIN EN ISO 10456 zur Ermittlung der Angaben verwendet.

Die Anforderungen an den sommerlichen Wärme- und Sonnenschutz sind im Hinblick auf den Klimawandel besonders zu berücksichtigen. Aufgrund der unterschiedlichen Rahmenbedingungen ist eine allgemeine Beschreibung schwer umzusetzen und wird daher bei den nachfolgenden Betrachtungen nicht berücksichtigt. Das große Einsparpotenzial ist jedoch zu beachten und sollte im Einzelfall geprüft werden.

4.3.2 Energetisches Anforderungsniveau der Sanierungsmaßnahmen

Für eine Verbesserung der Energieeffizienz ist ein hervorragender Wärmeschutz der Gebäudehülle unabdingbar (Reiß et al., 2017). Die energetischen Anforderungen der Sanierungsmaßnahmen implizieren die Betrachtung von zwei unterschiedlichen Energiestandards. Diese erfolgt unter Berücksichtigung der bautypologischen Gegebenheiten der jeweiligen Bautypen. Die erste Variante beinhaltet die Dämmung der Gebäudehülle nach dem GEG-Mindeststandard, Anlage 7. Wie bereits in Kapitel 2.1.1 erwähnt, sollte laut den Ergebnissen des Forschungsprojekts EnEff: Schule das übergeordnete energetische Ziel von Schulsanierungen die Erreichung des Effizienzhaus Plus-Standards sein. Für einen Vergleich wurden daher als weitere Variante Anforderungen, orientiert an den Werten der Bauteilkomponenten des Effizienzhauses 40 Plus, festgesetzt. In Tabelle 4-1 werden die jeweils zu erzielenden U-Werte aufgeführt und mit den Werten des Bestands gegenübergestellt.

Tabelle 4-1: Gegenüberstellung bestehende und erzielte U-Werte

Bauteil	U-Wert* <i>Bestand (BAK 2 & 3)</i>	U-Wert* <i>GEG</i>	U-Wert* <i>Effizienzhaus 40 Plus¹</i>
Außenwand	1,40 | 1,00	≤ 0,24	≤ 0,15
Decke gegen unbeheizte Kellerräume	1,30 | 1,00	≤ 0,50 (AD*) ≤ 0,30 (UD*)	≤ 0,19
Boden gegen Erdreich	1,30 | 1,00	≤ 0,50 (AD*) ≤ 0,30 (UD*)	≤ 0,19

Oberste Geschossdecke	2,10 | 0,60	≤ 0,24	≤ 0,11
Flachdach	1,70 | 1,30	≤ 0,20	≤ 0,11
Fenster	5,00 | 2,70	≤ 1,30	≤ 0,80 (Ref. Passivhausfenster)

*Einheit: W/(m²K) | AD = Aufdämmung, UD = unterseitige Dämmung | ¹nach (KfW, 2024b) und (Bundesministerium für Justiz, 2020)

4.3.3 Bewertungskriterien

Die Sanierungsmaßnahmen wurden hinsichtlich ihres energetischen Einsparpotenzials durch die Verbesserung der U-Werte bewertet. Hierfür wurden die zur Errichtungszeit typischen Bauteilaufbauten den Anforderungen der zuvor beschriebenen Energiestandards gegenübergestellt. Entscheidend für die Berechnung der durch die Sanierungsmaßnahmen eingesparten Energie ist die Differenz zwischen dem U-Wert des Bestandbauteils und dem erzielten neuen U-Wert nach der Sanierung. Je größer die Differenz zwischen den U-Werten, desto effektiver die Reduzierung des Wärmeverlustes, was wiederum zu einem höheren energetischen Einsparpotenzial führt. Die prozentuale Einsparung basierend auf dem U-Wertvergleich gibt die theoretischen Einsparungen an. Der Wert wird nach der folgenden Gleichung berechnet:

$$\% \text{ Einsparung} = \left(\frac{U_{\text{alt}} - U_{\text{neu}}}{U_{\text{alt}}} \right) \times 100$$

Für die Berechnung der tatsächlichen Einsparung an Heizenergie stellt neben der Gradtagzahl ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor die Bauteilfläche dar. Der Flächenanteil der jeweiligen Bauteile ist abhängig von den gebäudespezifischen Gegebenheiten und variiert stark zwischen den verschiedenen Gebäudetypen (Scharte, 2016). Aufgrund einer gebäudeunabhängigen Bewertung auf Bauteilebene im Rahmen der Arbeit wird die Fläche nicht berücksichtigt. Die unterschiedlichen Flächenanteile der jeweiligen Bauteile an der Gebäudehülle sind jedoch bei der Betrachtung zu beachten.

Die Bewertung der Sanierungsmaßnahmen erfolgt über ein Vergleichsverfahren, welches je Gebäudetyp bauteilübergreifend angewendet wird. Die unterschiedlichen Dämmmaterialien der Ausführungsbeispiele einer Sanierungsmaßnahme beziehen sich jeweils auf den identischen Ausgangs- und Ziel-U-Wert. Daher sind die daraus resultierenden Energieeinsparungen innerhalb der Ausführungsvarianten identisch und

eine Unterscheidung innerhalb der Maßnahme erfolgt lediglich anhand der differenzierten Energiestandards. Die Ergebnisse des energetischen Einsparpotenzials werden nach minimaler und maximaler Einsparung analysiert und wie folgt eingeteilt:

$$\frac{(Einsparung_{SM} - Einsparung_{min.SM})}{(Einsparung_{max.SM} - Einsparung_{min.SM})} \leq 100 [\%]$$

*SM = Sanierungsmaßnahme; min./ max. SM = Sanierungsmaßnahme mit min./ max. Einsparung

Die energetische Einsparung der Maßnahme liegt bauteilübergreifend:

1	bei den höchsten 20%
2	zwischen 60 und 80%
3	zwischen 40 und 60%
4	zwischen 20 und 40%
5	bei den niedrigsten 20%

Ergänzend hierzu wurden die energetischen Einsparungen der Maßnahmen baualtersklassenübergreifend in einen Vergleich gestellt. Die maximale prozentuale Einsparung konnte im Rahmen der Untersuchungen mit der Sanierung von der obersten Geschossdecke der BAK 2 nach Effizienzhaus Plus - Referenz mit 94,76% erreicht werden. Die minimalste energetische Einsparung erzielt eine Sanierung der Decke gegen Erdreich bzw. unbeheizte Kellerräume der BAK 3 bei einer oberseitigen Dämmung mit 50%. Grundsätzlich wird in den Ergebnissen der Untersuchung sichtbar, dass sich das energetische Einsparpotenzial mit zunehmendem Baustandard der Baualtersklasse verringert.

4.4 Ökologische Bewertung

Die ökologische Qualität umfasst die Auswirkungen der Baustoffe auf den Schutz des Ökosystems und den natürlichen Rohstoffen (BMUB, 2014). Zur Analyse der ökologischen Qualität der Sanierungsmaßnahmen wird die Methode der Ökobilanzierung verwendet. Diese wurde bereits in Kapitel 2.1.2 detaillierter beschrieben. Mit Hilfe einer Ökobilanz werden die stofflichen und energetischen Input-, Betriebs- und Outputflüsse sowie die potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebenszyklus erfasst und beurteilt (DIN EN ISO

14040/14044 (DIN e.V, 2021a; DIN e.V., 2021b)). Die Zusammenfassung aller bilanzierten Sanierungskonstruktionen ist Anhang V zu entnehmen. Die Ermittlung der ökologischen Wirkungen im Rahmen dieser Arbeit erfolgt in Anlehnung an die vier Phasen der Ökobilanzierung gemäß IDN EN ISO 14040/ 44. In Abbildung 4-3 wurden die entsprechenden Arbeitsschritte (hellgrau) ergänzt.

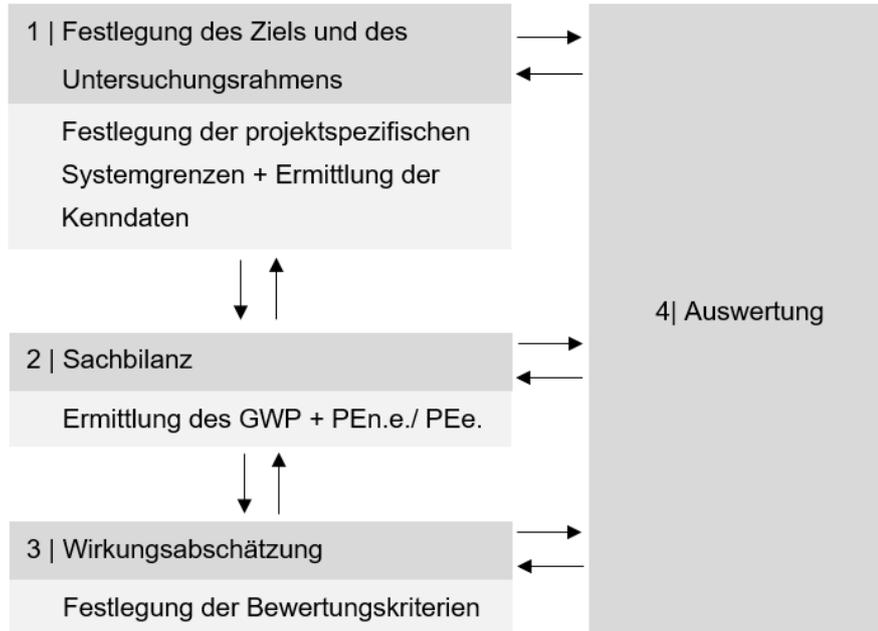


Abbildung 4-3: Phasen einer Ökobilanzierung mit Arbeitsschritten (eigene Darstellung nach DIN EN ISO 14044, 2009 und (Botzler et al., 2017))

4.4.1 Systemgrenzen

Die für die ökologische Betrachtung mit einbezogenen Lebenszyklusphasen nach DIN EN 15804, sowie die zeitlichen und räumlichen Systemgrenzen werden in Tabelle 4-2 zusammenfassend aufgelistet.

Tabelle 4-2: Systemgrenzen der ökologischen Betrachtung der Sanierungsmaßnahmen

<p>Lebenszyklusphasen Sanierungsmaßnahme</p>	<ul style="list-style-type: none"> • A1-3: Herstellung der Bauteilschichten, die im Zuge der Sanierung neu eingebaut werden • B4: Austausch und Ersatz von Bauteilschichten innerhalb der nächsten 50 Jahren nach Standardaustauschzyklen* • C3/ C4: Entsorgung der Konstruktion am Ende des Lebenszyklus • D: separate Ausweisung der Wiederverwendungs- und Recyclingpotenziale der entsorgten Materialien
--	--

Lebenszyklusphasen Rückbau der Bestandsschichten	<ul style="list-style-type: none"> • C3/ C4: Entsorgung einzelner Bauteil-schichten, die während der Sanierung entfernt werden • D
Räumliche Systemgrenze (funktionelle Einheit)	<p>1m² Bauteilfläche</p> <p>Die Zielgrößen ergeben sich aus den erforderlichen Anforderungen hinsichtlich dem U-Wert nach GEG sowie der Referenz des Effizienzhaus Plus-Standards.</p>
Zeitliche Systemgrenze	Betrachtungszeitraum von 50 Jahren

* Die Einteilung erfolgt nach den Standardaustauschzyklen gemäß den durchschnittlichen Nutzungsdauern nach (BBSR, 2017b).

Mit dem Ziel anhand der Ökobilanzierung einen bauteilbezogenen Variantenvergleich verschiedener Sanierungsmaßnahmen zu erreichen, werden die folgenden Kenndaten in Bezug auf das Dämmmaterial und den neuen Schichtaufbau festgesetzt:

- die eingesetzte Primärenergie – erneuerbar (PE_e) / nicht erneuerbar (PE_{ne}) [MJ]
- das Treibhausgaspotenzial (GWP) [kg CO₂-Äquivalent]

Der Primärenergiegehalt beinhaltet die zur Herstellung des Dämmstoffes erforderliche Energiemenge (Sprengard et al., 2014). Für die Bewertung ist auch die Art der Energiebereitstellung relevant (BMUB, 2017b), daher werden die oben genannten Teilkriterien gesondert ermittelt. Das GWP gibt den potenziellen Beitrag eines Stoffes zur Erwärmung der bodennahen Luftschichten an. Je niedriger der GWP-Wert ist, desto geringer ist die potenzielle Wirkung auf die globale Erwärmung und folglich auch der Einfluss auf die Umwelt (BMI, 2017).

4.4.2 Dämmstoffwahl

Die ökologische Qualität einer Sanierungsmaßnahme hängt zu großen Teilen von der ökologischen Qualität des Dämmmaterials ab. Bei der Baustoffwahl ist daher von Beginn an auf ökologischen Auswirkungen zu achten.

Als wesentliche Grundlage der Bewertung wurden die Datensätze der Ökobaudat der aktuellen Version 2023-I nach DIN EN 15804+A2 verwendet. Die berechneten Wirkindikatoren sind einheitlich nach der aktuellen Normenfassung zu ermitteln (BMWSB, 2023). Die Bemessung der Kenndaten der einzelnen Baustoffe erfolgt mit Hilfe des Online-Tools eLCA des BBSR (BBSR, 2024). Für Materialien zu denen keine Datensätze vorhanden sind, wie beispielsweise zu Vakuumisulationspaneelen, wurden die Datensätze von herstellereigenen Umweltproduktdeklarationen (EPDs) verwendet. Diese basieren ebenfalls auf der Berechnungsgrundlage nach der neuen

Norm DIN EN 15804+A2. Dem Anhang IV ist eine Übersicht der verwendeten Datensätze, mit Kennzeichnung der herstellereigenen EPDs, zu entnehmen.

Vergleich von Dämmmaterialien

Die ausgewählten Sanierungsmaßnahmen haben hinsichtlich der ökologischen Betrachtung den Vergleich verschiedener Dämmmaterialien zum Ziel. Daher wurde bei der Untersuchung in Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen bzw. aus recycelten Baustoffen und konventionelle bzw. innovativen Dämmmaterialien unterschieden. Je nach Einsatzbereich wurden jeweils eine Auswahl an entsprechenden Materialien gegenübergestellt. Tabelle 4-3 zeigt eine Auflistung der Repräsentanten der zu vergleichenden Materialien. Die Schichtaufbauten der Sanierungsmaßnahmen wurden bautypen- und baualtersklassenübergreifend hergestellt, wodurch der Einfluss des Dämmmaterials transparenter sichtbar wird.

Tabelle 4-3: Vergleichende Dämmmaterialien nach Einsatzbereich für die ökologische Betrachtung (eigene Darstellung)

Einsatzbereich	Dämmstoffe aus ökologischem Material	Dämmstoffe aus konventionellem Material
Außenwand	Holzfaserdämmung	Mineralwolldämmung
Oberste/ unterste Geschossdecke	Kork	Expandiertes Polystyrol (EPS)
Flachdach	Hanfaserdämmung	PUR-Hartschaum, alukaschiert
Boden gegen Erdreich (Innen)	Zellulose Einblasdämmung	Vakuum-Isolationspaneel (VIP) (innovativ)
Perimeterbereich	Schaumglasdämmung	Extrudiertes Polystyrol (XPS)

Derzeit bilden nach wie vor Ausführungen mit dem Einsatz von konventionellen Dämmstoffen den Standard ab (Fouad, 2023). In Bezug auf diese Materialgruppe ist ein Vergleich zu innovativen Dämmstoffen wie Vakuumisolationspaneelen interessant. Diese sind aufgrund ihrer guten Dämmeigenschaften vor allem hinsichtlich einer platzsparenden Ausführung bei der Innendämmung von Vorteil. Dämmstoffe aus Holzfasern stellen eine vielseitige Alternative aus nachwachsendem Rohstoff dar. Außer im Bereich der Perimeterdämmung ist der Dämmstoff nahezu universell im Innen- und Außenbereich einzusetzen (DIN 4108-10:2021-11). Im Hinblick auf die ökologische Qualität ist eine nachhaltige Materialgewinnung von Holz ohne Zerstörung und Degradierung von Wäldern Voraussetzung (BMUB, 2014). Grundsätzlich gibt es eine große Vielfalt an einzusetzenden ökologischen Dämmmaterialien, insbesondere im Bereich der Innendämmung (Sprengard et al., 2014). Die untersuchte Auswahl wurde

primär anhand des Einsatzbereiches sowie einer fundierten Datengrundlage des Dämmstoffes zur Ermittlung der Kenndaten getroffen. Im Bereich der Perimeterdämmung gibt es derzeit keine Alternative aus nachwachsenden Rohstoffen (DIN 4108-10:2021-11). Hier erfolgt ein Vergleich mit Schaumglas als Alternative zur druckfesten XPS-Dämmung. Die Betrachtung von tierischen Rohstoffen wie Schafwolle wurde im Rahmen der Arbeit nicht integriert.

Nachfolgend werden die gewählten Dämmstoffe hinsichtlich ihrer globalen und lokalen Umweltwirkungen sowie des Ressourceneinsatzes vorgestellt.

Diskussion der Dämmstoffwahl

Um die ökologische Qualität der Dämmstoffe zu bewerten, werden die jeweiligen Dämmstoffe hinsichtlich der unterschiedlichen Wirkungskriterien einer Ökobilanz betrachtet. In Tabelle 4-4 werden hierfür sowohl die lokalen und globalen Umweltwirkungen der ausgewählten Dämmstoffe als auch die Ressourceninanspruchnahme gegenübergestellt. Die angegebenen Werte beziehen sich auf eine Einheit von je einem cm Dicke pro m² Dämmstoff.

Neben generischen Datensätzen bietet die Ökobaudat ebenfalls hersteller- und produktspezifische Datensätze aus Umweltproduktdeklarationen an. Erstere bilden die durchschnittlichen Produktionsverhältnisse repräsentativ für Deutschland ab. Zertifizierungssysteme wie das DGNB fordern aufgrund der präzisen Angaben zu spezifischen Produkten die bevorzugte Verwendung von zweiteren und empfehlen generische Datensätze lediglich, wenn keine spezifischen Datensätze vorhanden sind (DGNB). Im Rahmen dieser Arbeit werden dahingegen im Hinblick auf eine allgemeingültige Anwendung jedoch primär generische Datensätze verwendet. In Tabelle 4-4 werden diese bei einzelnen Dämmstoffen für einen Vergleich mit spezifischen Datensätzen gegenübergestellt. Anhand des Beispiels der Hanffaserdämmung werden die Unterschiede der Datensätze sowie das bilanzielle Einsparpotenzial gegenüber den allgemeinen Daten der OBD_2023_I_A2 deutlich. Die Werte des Datensatzes der Ökobaudat fallen sowohl in Bezug auf das GWP mit 0,96 kg CO₂-Äqu. als auch im Bereich des Primärenergiebedarfs mit einer Verdopplung der Werte deutlich höher aus als der produktspezifische Datensatz von Thermohanf. Im Hinblick auf die weiteren Umweltwirkungen ist dies jedoch umgekehrt. Insbesondere die verstärkte Wassernutzung ist hier auffällig und im Hinblick auf die Nachhaltigkeit nicht zielführend. Eine weitere Herausforderung hinsichtlich der Materialwahl bei der Erstellung einer allgemeingültigen Ökobilanz zeigt sich beispielsweise bei der

Holzfaserdämmung. Die unterschiedlichen Herstellungsverfahren der Holzfaserdämmung weisen einen erheblichen Unterschied der Wirkungen auf. Im Bereich des GWP sowie des Gesamtprimärenergiebedarfs und der Wassernutzung schneidet das Nassverfahren in der Bewertung erheblich schlechter ab. Aufgrund dessen fließen lediglich die Werte des Trockenverfahrens in die Bewertung der Sanierungsmaßnahmen mit ein. Bei einer Erweiterung der Betrachtung um herstellereinspezifische Datensätze (Datengrundlage des Herstellers best wood) im Vergleich zum generischen Datensatz der Holzfaserdämmung im Trockenverfahren wird sichtbar, dass sich zwar das GWP von 0,84 auf 0,82 kg CO₂-Äqu. etwas verbessert, jedoch der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf und der Anteil an erneuerbarem Primärenergiebedarf sowie die Wassernutzung deutlich höher ausfallen.

Aus der Tabelle 4-4 wird deutlich, dass der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf der Dämmstoffe je nach Art und Umfang der Verarbeitungsprozesse stark variiert. Während für die Herstellung weniger bearbeiteter Stoffe wie Zellulosefaser nur in etwa 1,14 MJ aufzuwenden sind, sind für die Produktion von Schaumglas oder XPS bis zu 29 MJ erforderlich. Besonders herausstechend, nicht nur im Bereich des Primärenergiebedarfs, sind die Vakuum-Isolationspaneele (VIP). Insgesamt schneiden sie bei acht von neun Kriterien am schlechtesten ab. Allerdings ist zu beachten, dass ein wesentliches Einflusskriterium zusätzlich die notwendige Dämmstoffdicke darstellt. Aufgrund ihrer besonders geringen Wärmeleitfähigkeit ($\lambda=0,007$ W/mK) ist bei gleicher Dämmqualität im Gegensatz zu anderen Dämmmaterialien eine deutlich geringere Dämmstärke notwendig. Dies ist auch der Grund, weshalb ökologische Materialien trotz besserer ökologischer Qualität häufig aufgrund einer schlechteren Wärmeleitfähigkeit in der Gesamtbewertung schlechter abschneiden.

Tabelle 4-4: Umweltwirkungen und Ressourceninanspruchnahme je Dämmmaterial (eigene Darstellung)

Dämmstoff [je cm Dicke/ m²]	Wirkungen auf globale / lokale Umwelt						Ressourceninanspruchnahme		
	GWP [kg CO ₂ - Äqv.]	ADP [kg Sb-Äqv.]	EP [kg PO ₄ - Äqv.]	ODP [kg CFC11- Äqv.]	POCP [kg NMVOC- Äqv.]	AP [mol H+- Äqv.]	PE n.e. [MJ]	PE e. [MJ]	Wasser- nutzung [kg]
Expandiertes Polystyrol (EPS) - 15 kg/m³	0,97	4,97E-08	5,35E-07	2,63E-15	7,13E-03	7,26E-04	13,73	0,29	0,070
Expandiertes Polystyrol (EPS) - 20 kg/m³	1,27	7,07E-08	7,19E-07	4,43E-15	9,29E-03	9,56E-04	17,66	0,46	0,098
Expandiertes Polystyrol (EPS) - 25 kg/m³	1,61	7,93E-08	9,30E-07	2,45E-15	1,09E-02	1,25E-03	22,36	0,46	0,120
Extrudiertes Polystyrol (XPS)	2,12	4,99E-08	1,90E-06	4,74E-12	3,12E-03	1,59E-03	28,18	2,40	0,180
PUR, alukaschiert	1,49	9,51E-07	3,89E-06	2,40E-12	2,78E-03	2,19E-03	22,47	2,43	0,190
Vakuum-Isolationspaneel	8,91	6,353E-05	4,64E-04	4,18E-06	2,37E-02	4,54E-02	201,33	30,42	6,252
Mineralwolle (Fassade)	0,71	8,51E-08	1,08E-06	3,24E-12	1,55E-03	4,68E-03	8,79	1,78	0,048
Mineralwolle (Boden)	1,34	1,58E-07	2,16E-06	6,52E-12	2,78E-03	8,60E-03	18,32	3,73	0,106
Mineralwolle (Flachdach)	2,12	2,64E-07	2,95E-06	8,78E-12	5,00E-03	1,50E-02	22,22	4,46	0,105
Mineralwolle (Innen)	0,40	4,84E-08	6,26E-07	1,88E-12	8,74E-04	2,66E-03	5,16	1,05	0,029
Kalziumsilikat (Innen)	5,74	2,43E-07	2,41E-05	6,55E-09	6,39E-03	7,56E-03	71,06	5,81	0,890
Schaumglas	1,89	2,68E-07	1,94E-05	9,60E-14	5,06E-03	7,03E-03	28,64	17,32	0,170
Holzfaser (Nassverfahren)	1,30	8,62E-08	2,72E-06	1,13E-11	2,46E-03	1,95E-03	18,7	37,99	0,496
Holzfaser (Trockenverf.)	0,84	7,60E-08	3,77E-06	2,42E-12	3,03E-03	2,35E-03	17,41	11,14	0,008
Holzfaser (best wood)	0,82	3,118E-07	1,3252E-05	5,72E-10	2,60E-03	2,84E-03	39,27	17,91	0,364
Holzfaser (flexible Matten)	0,34	2,36E-08	1,08E-06	5,48E-13	9,85E-04	7,65E-04	7,52	3,33	0,003
Zellulosefaser (Einblasdämmung)	0,12	8,08E-09	6,86E-07	9,62E-13	4,89E-04	6,25E-04	1,14	8,55	0,140
Hanfvlies (mit Stützfaser)	0,96	6,65E-07	4,62E-05	7,18E-12	1,83E-03	1,98E-03	13,25	9,29	0,120
Hanfaser (Thermohanf)	0,36	2,341E-06	1,73E-04	1,10E-08	1,09E-03	1,67E-03	6,22	5,51	1,095
Kork expandiert	0,52	2,91E-08	4,04E-06	8,92E-13	2,51E-03	2,73E-03	6,37	17,82	0,340
Baustroh (ARGE Maxit)	0,74	4,64E-06	1,22E-04	7,91E-08	1,92E-03	4,13E-03	15,35	12,71	0,616

4.4.3 Bewertungskriterien

Die ökologischen Hauptbewertungskriterien folgen dem Ansatz der BNB-Nachhaltigkeitskriterien hinsichtlich der Gewichtung der globalen und lokalen Umweltwirkungen und der Ressourceninanspruchnahme (BBSR, 2017a). Demnach wurden zur Bewertung das Treibhausgaspotenzial (GWP), der Einsatz der gesamten Primärenergie ($PE_{ges} = PE_{ne} + PE_e$) sowie der Anteil an erneuerbarer Primärenergie am Gesamtenergieeinsatz (PE_e / PE_{ges}) gewählt. Für eine transparente Darstellung ist neben dem Gesamtprimärenergiebedarf auch die Art der Energiebereitstellung für die Bewertung relevant. Daher wird der Anteil der erneuerbaren Primärenergie an der Gesamtenergie im Rahmen der Bewertung differenziert ausgewiesen. Die stofflichen Auswirkungen der restlichen Umweltkategorien (vgl. Tabelle 4-4) sind nur schwer einheitlich zu bilanzieren (Botzler et al., 2017). Aufgrund dessen, fließen sie nicht mit in die ökologische Bewertung ein und müssen im Einzelfall verglichen werden.

Im Hinblick auf die Bewertung ist zu beachten, dass möglicherweise notwendige Verbindungsmittel in den Berechnungen zunächst unberücksichtigt bleiben. Ihr Bedarf kann aufgrund der unterschiedlichen Gegebenheiten der Bestandskonstruktionen stark variieren. Hierfür ist eine statische Berechnung im Einzelfall notwendig. Im Wesentlichen sind Verbindungsmittel zu wählen, welche eine sortenreine Trennung der Materialien bei der Entsorgung ermöglichen (Botzler et al., 2017).

Eine weitere Methode der ökologischen Bewertung bietet die energetische Amortisation. Bei diesem Ansatz wird der Energieaufwand zur Herstellung der Sanierungsmaßnahme der potenziellen Energieeinsparung durch ihre Anwendung gegenübergestellt (Sprengard et al., 2014). Der Fokus liegt dabei lediglich auf der Energieeffizienz und -einsparung während des Betriebs des sanierten Gebäudes. Dies bietet zwar einen wichtigen Aspekt für die Nachhaltigkeit einer Sanierungsmaßnahme, berücksichtigt darüber hinaus jedoch keine weiteren Umweltaspekte. Aufgrund des Ziels einer umfassenden Bewertung der Sanierungsmaßnahmen findet dieser Ansatz daher keine Verwendung im Rahmen der Arbeit.

Nachfolgend wird die Ermittlung und Einteilung der Bewertungskriterien in Anlehnung an (Botzler et al., 2017) erläutert. Die Bewertung aller drei Kriterien erfolgt über das Vergleichsverfahren und wird bauteil-, bautyp- sowie baualtersklassenbezogen betrachtet.

Treibhausgaspotenzial (GWP)

Für die GWP-Bewertung werden innerhalb einer Baualtersklasse und Baukonstruktion die verschiedenen Sanierungsmaßnahmen anhand der minimalen und maximal auftretenden Werte analysiert. Anschließend werden die Ergebnisse der folgenden Formel eingeteilt:

$$\frac{(GWP_{SM} - GWP_{min.SM})}{(GWP_{max.SM} - GWP_{min.SM})} \leq 100 [\%]$$

*SM = Sanierungsmaßnahme; min./ max. SM = Bauteilbezogen

Der GWP-Wert der Sanierungsmaßnahme zählt innerhalb des Bauteils zu:

1	den niedrigsten 20% der vorkommenden Werte
2	20-40% der höchsten vorkommenden Werte
3	40-60% der höchsten vorkommenden Werte
4	60-80% der höchsten vorkommenden Werte
5	80-100% der höchsten vorkommenden Werte

Je niedriger der GWP-Wert einer Sanierungsmaßnahme ausfällt, desto geringer sind ihre Umweltwirkungen, was zu einer verbesserten ökologischen Bilanz führt.

Gesamtprimärenergieverbrauch (PE ges.)

Der Ansatz der Bewertung des Ressourceneinsatzes des gesamten Primärenergieverbrauchs erfolgt analog zur Bewertung des GWP. Innerhalb einer Baualtersklasse und Baukonstruktion werden die jeweiligen Sanierungsmaßnahmen nach den minimalen und maximal auftretenden Werten analysiert und wie folgt eingestuft:

$$\frac{(PE_{ges.SM} - PE_{ges.min.SM})}{(PE_{ges.max.SM} - PE_{ges.min.SM})} \leq 100 [\%]$$

*SM = Sanierungsmaßnahme; min./ max. SM = Bauteilbezogen

Der PEges.-Wert der Sanierungsmaßnahme zählt innerhalb des Bauteils zu:

1	den niedrigsten 20% der vorkommenden Werte
2	20-40% der höchsten vorkommenden Werte
3	40-60% der höchsten vorkommenden Werte
4	60-80% der höchsten vorkommenden Werte
5	80-100% der höchsten vorkommenden Werte

Ein niedriger Wert des Gesamtprimärenergieverbrauchs einer Sanierungsmaßnahme führt ähnlich wie beim GWP zu einer besseren ökologischen Performance.

Anteil an erneuerbarer Primärenergie am Gesamtprimärenergieverbrauch

Darüber hinaus wird der Anteil an erneuerbarer Primärenergie (PEe.) am Gesamtenergieverbrauch in Bezug auf die Sanierungsmaßnahme folgendermaßen ermittelt:

$$\frac{PEe.SM}{PEges.SM} \leq 100 [\%]$$

*SM = Sanierungsmaßnahme

Der Anteil an PEe. am PEges. der Sanierungsmaßnahme beträgt:

1	> 80%
2	60-80%
3	40-60%
4	20-40%
5	≤ 20%

Im Wesentlichen ist ein großer prozentualer Anteil an erneuerbarer Primärenergie zunächst positiv einzuordnen. Allerdings erfordert dieser Aspekt häufig eine sorgfältige, kritische Betrachtung im Gesamtkontext.

4.5 Ökonomische Bewertung

Die Methoden zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit von energetischen Sanierungsmaßnahmen können grundsätzlich in statische und dynamische Verfahren aufgeteilt werden. Während bei statischen Methoden Faktoren wie zeitliche Aspekte, Preisänderungen und Kapitalzinssätze außer Betracht bleiben, beziehen dynamische Methoden ein breiteres Spektrum an Eingangsparametern mit ein (Diedrich, 2018).

Das Prinzip des Preis-Leistungs-Verhältnisses (PLV) fungiert beispielsweise als statische Methode zur wirtschaftlichen Bewertung. Es quantifiziert das Verhältnis zwischen den Investitionskosten und den absoluten Energiekosteneinsparungen über die Nutzungsdauer eines Bauteils. Eine Maßnahme wird als wirtschaftlich betrachtet, wenn das PLV kleiner ist als der anzustrebende Energiepreis. Aufgrund der Vernachlässigung von Preisänderungsfaktoren ist die Aussagekraft dieser Bewertung jedoch begrenzt. Dieses Verfahren eignet sich daher besser zur Bestimmung der ökologischen Wirtschaftlichkeit und findet im Rahmen dieser Arbeit keine Anwendung (Diedrich, 2018).

Zur umfassende Bewertung einer Sanierungsmaßnahme erfolgt die ökonomische Bewertung im Rahmen dieser Arbeit anhand der dynamischen Kapitalwert- und Annuitätenmethode nach dem Ansatz von (Holm et al., 2015)). Diese Methode beinhaltet die Betrachtung der Amortisationszeit. Im weiteren Verlauf wird die Methode ausführlich erläutert.

4.5.1 Amortisationszeit der Sanierungsmaßnahme

Die Amortisationszeit zeigt den Zeitraum auf, in dem sich die Bauwerkskosten durch die reduzierten bedarfsgebundenen Kosten des jeweiligen Bauteils decken.

Die wesentliche Grundlage der Berechnung bildet die Investitionskosten einer Sanierungsmaßnahme. Diese werden nach den Kosten des Baukostenindex (BKI, 2024) ermittelt und durch Herstellerangaben bezüglich der Materialien sowie Dämmstärken ergänzt. Die Kosten umfassen den Verlegepreis und sind im Wesentlichen von der Art der Sanierung und des Dämmmaterials sowie von der Dämmschichtdicke abhängig. Zu beachten ist, dass Mehrkosten durch komplizierte Installationen und Detailausführungen, sowie Kosten für Arbeitszeit, Gerüst und ähnliches im Rahmen des Projekts nicht weiter berücksichtigt werden. Ergänzend zu den Gesamtkosten berücksichtigt die Methode ebenfalls die Energiepreissteigerung

sowie einen alternativen jährlichen Zinssatz, welcher zum Kapital gewinnbringend angelegt werden könnte. Die Berechnung der Amortisationszeit erfolgt, indem die Investitionskosten durch Abzinsung zu einem bestimmten Zeitpunkt ermittelt und gegengerechnet werden.

Die nachfolgende Formel ermittelt die Amortisationszeit n_A in Abhängigkeit der jährlichen Energiepreissteigerungen und des jährlichen Zinssatzes (Holm et al., 2015):

$$n_A = \frac{\ln \frac{1}{1 - \frac{K}{k} * (q - y)}}{\ln \frac{q}{y}}$$

K Investitionskosten [€]

Die Ermittlung erfolgt mit Hilfe des Baukostenindex (BKI, 2024) sowie anhand herstellerspezifischer Angaben. Eine umfassende Auflistung der entsprechenden Investitionskosten für die Sanierungsmaßnahmen pro 1m² Bauteilfläche ist Anhang VII zu entnehmen.

k Jährliche Einsparung bzw. Rückflüsse [€]

Die Rückflüsse generieren sich aus den berechneten Energieeinsparungen durch die Differenz des Ausgangs- und Ziel- U-Werts sowie der Gradtagzahl anhand 1m² Bauteilfläche.

Die Berechnung der Energieeinsparung erfolgt mit dem bei Schulgebäuden meist vertretenden Energieträger Erdgas (Scharte, 2014). Der Energiepreis wird nach aktuellem Stand mit 0,12 €/ kWh angesetzt (Statistisches Bundesamt, 2020).

Für die Gradtagzahl wird ein langjähriges Mittel in Deutschland (2004-2023) von 3.755 Kd verwendet. In Anlehnung an (Holm et al., 2015) ergibt sich das Mittel aus der Minimalvariante (Rheinstetten 3.076) und der Maximalvariante (Fichtelberg 4.433). Die jeweiligen Werte wurden nach den Auswertungen des Instituts für Wohnen und Umwelt aus dem Jahr 2023 übernommen (IWU, 2024).

q Jährlicher Zinssatz

Der jährliche Zinssatz bezieht sich auf einen festen Betrag, der gewinnbringend angelegt werden kann. Aufgrund der aktuellen Hochzinsphase seit 2022 wird von einem Leitzinssatz von 4,25 % (1,045) ausgegangen (Wolff, 2024).

y *Jährliche Energiepreissteigerung*

Die zu prognostizierte Energiepreissteigerung bis 2042 wird mit 1,72 %/a (1,0172) angesetzt (Pehnt et al., 2023).

Das Aufzeigen eines Beispiels anhand einer Sanierungsmaßnahme der Außenwand des Typs BAK 2 soll die Berechnung veranschaulichen. Die Ausgangskonstruktion der massiven Außenwand hat einen Wärmedurchgangskoeffizienten von 1,4 W/(m²K). Der zu erzielende U-Wert der Sanierungsmaßnahme beträgt nach GEG-Standard 0,24 W/(m²K) und wird beispielsweise mittels einem Wärmedämmverbundsystem mit EPS bei einer Dämmstärke von 12cm erreicht. Die daraus resultierende Differenz beträgt 1,16 W/(m²K). Für die Berechnung der Energieeinsparung anhand der Gradtagzahl in kWh/a wird diese mit 24h multipliziert und durch 1000 dividiert. Bei einer Verbesserung des U-Werts von 1,16 W/(m²K) wird somit eine Energieeinsparung von 104,54 kWh/a erreicht. Bei einem Energiepreis von 0,12 €/kWh beläuft sich die finanzielle Einsparung k auf 12,54 € pro kWh/a. Die Kosten der Sanierungsmaßnahme betragen nach BKI sowie herstellerepezifischen Angaben 145,00 €. Mit einem jährlichen Zinssatz und der jährlichen Energiepreissteigerung von 4,25% bzw. 1,72% ergibt sich eine Amortisationszeit n_A von 14,1 Jahren.

4.5.2 Bewertungskriterien

Die Einteilung der Ergebnisse in fünf Wirkungskategorien erfolgt ebenfalls mit dem Vergleichsverfahren zwischen der in diesem Fall längsten und kürzesten Amortisationszeit. Hierfür wurde die Differenz in fünf gleiche Teile unterteilt, wodurch die Amortisationszeiten in 20%- Schritte unterteilt werden. Je länger die Amortisationszeit, desto schlechter fällt die Bewertung der Maßnahme aus. Um sicherzustellen, dass die Höchstwerte die durchschnittliche Lebensdauer eines Bauteils nicht überschreiten, wurden diese anhand der durchschnittlich zu erwartender Lebensdauer der jeweiligen Bauteile überprüft. Erbringt eine Sanierungsvariante keine Verbesserung, wird diese Maßnahme nicht berücksichtigt und im Sanierungskatalog entsprechend vermerkt. Grundsätzlich ist die Gewichtung der erzielten Einsparungen pro Jahr umso größer, desto länger eine Sanierungsmaßnahme genutzt werden kann (Holm et al., 2015).

Die ökonomische Bewertung der Sanierungsmaßnahmen erfolgt bauteil-, bautyp- sowie baualtersklassenbezogen. Die nachfolgende Tabelle zeigt die entsprechende Einteilung.

Die Amortisationszeit der Maßnahme liegt innerhalb eines Bauteils zu:

1	bei den kürzesten 20%
2	zwischen 20 und 40%
3	zwischen 40 und 60%
4	zwischen 60 und 80%
5	bei den längsten 20%

5 Sanierungskatalog

Die Ergebnisse der Untersuchungen dieser Arbeit resultieren in einem Sanierungskatalog zu den gebäudeumschließenden Bauteilaufbauten der Baualtersklassen BAK 2 und 3. Der gesamte Katalog ist dem Anhang VIII zu entnehmen. Neben dem Aufbau des Sanierungskatalogs, inklusive der Darstellung der einzelnen Sanierungsmaßnahmen, werden im Rahmen der Ergebnisse in diesem Kapitel zudem die grundsätzliche Vorgehensweise in Form eines Handbuchs sowie anschließend die Anwendung an einem spezifischen Projektbeispiel aufgezeigt.

5.1 Aufbau des Sanierungskatalogs

Der Sanierungskatalog gliedert sich im Wesentlichen in die beiden untersuchten Baualtersklassen BAK 2 (1945-1965) und BAK 3 (1966-1978). Je Baualtersklasse erfolgt eine weitere Unterteilung in die nach der Klassifizierung aus Kapitel 3.2 kategorisierten Typen des Schulgebäudebestandes. Für beide Baualtersklassen umfasst dies drei unterschiedliche Bauweisen, sodass insgesamt für sechs verschiedene Schulgebäudetypen jeweils die Sanierungsmaßnahmen der einzelnen Bauteilaufbauten der Gebäudehülle aufgezeigt werden.

Die Zusammenstellung der einzelnen Sanierungsmaßnahmen bilden im Gesamten den Sanierungskatalog. Die Darstellung dieser wird im Folgenden genauer beschrieben.

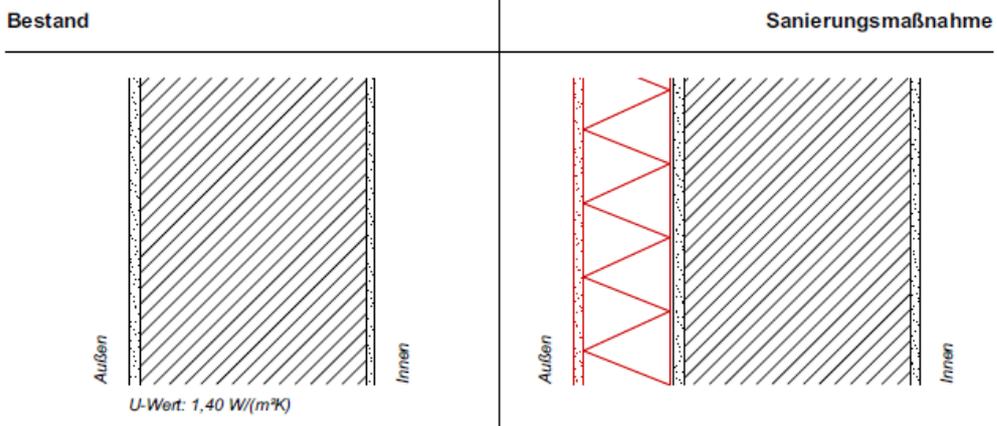
Darstellung der Sanierungsmaßnahmen

Die erarbeiteten Ergebnisse der einzelnen Sanierungsmaßnahmen werden übersichtlich auf einer DIN A4 Seite zusammengefasst. Neben der Betrachtung der energetischen, ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkte erfolgt ebenfalls die Gegenüberstellung und der Vergleich von unterschiedlichen Dämmmaterialien. Die gewonnenen Erkenntnisse beziehen sich auf 1m² Bauteilfläche und müssen im Anwendungsfall auf das Zielobjekt angepasst werden.

Abbildung 5-1 veranschaulicht die Darstellung der Ergebnisse am Beispiel der Außenwand des Bautyps 2A. Nachstehend wird der grundlegende Aufbau der DIN A4 Seite kurz erläutert.

2 A

Baualtersklasse:	1945 - 1965
Bauweise:	Massiv Mauerwerk
Bauteil:	Außenwand
Sanierungsvariante:	Außendämmung WDVS
Energiestandard:	GEG
Materialität:	Konventionell



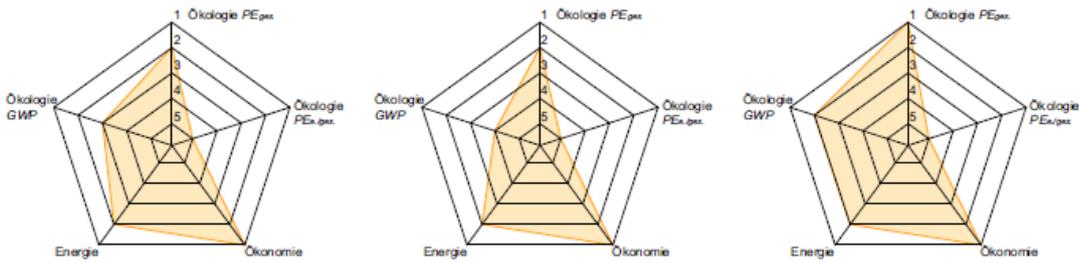
Bauteilaufbau (von Außen nach Innen)	Dicke [mm]	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	U-Wert [W/(m²K)]
Fassadenfarbe Silikat-Dispersionsfarbe	0,3		
Putz (Kalk- und Kalkzementputz)	15	0,82	
Wärmedämmung mit Klebe- und Spachtelputz			≤ 0,24
1: EPS	120 | 5	0,035 | 1	
2: PUR	100 | 5	0,027 | 1	
3: Mineralwolle	120 | 5	0,035 | 1	
Außenputz (Kalk-Zementputz)	20	0,87	
Mauerwerk	365	0,79	
Innenputz (Kalk-Gipsputz)	10	0,70	
Innenfarbe	0,2		

Bewertung

1: EPS

2: PUR

3: Mineralwolle



Bemerkung

Erhalt äußeres Erscheinungsbild ist grundsätzlich möglich.
 Projektbeispiel: Gymnasium Markt Obersdorf (1. Bauabschnitt) | EnEff.Schule

Abbildung 5-1: Ergebnisdarstellung Sanierungsmaßnahmen; eigene Darstellung

Der Kopfzeile sind allgemeine Informationen bezüglich der Sanierungsmaßnahme zu entnehmen. Diese umfassen Angaben zu Baualtersklasse, Bauteil, Sanierungsvariante, Dämmmaterial (konventionell/ ökologisch) und Energiestandard (GEG/ Effizienzhaus Plus - Referenz).

Darauffolgend wird ein Schnitt, im Maßstab 1:10, des Ausgangsfalls einem Schnitt der Sanierungsmaßnahme gegenübergestellt. Die entsprechenden Bauteilaufbauten der Sanierungsmaßnahme mit Angaben hinsichtlich der Dicke und Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Schichten sowie dem erzielten U-Wert ist der darunter liegenden Tabelle zu entnehmen. Hier werden ebenfalls die verschiedenen, miteinander zu vergleichenden Dämmmaterialien aufgelistet. Sowohl in der Zeichnung, als auch in der Tabelle wird der neue Konstruktionsaufbau rot, der Abbruch bestehender Konstruktionen gelb und die Bestandskonstruktion schwarz dargestellt.

Die Darstellung der energetischen, ökologischen und ökonomischen Bewertung mit den in Kapitel 4.3 bis 4.5 beschriebenen Kriterien erfolgt in Form eines Spinnendiagramms. Die fünf Wirkungskategorien werden in Anlehnung an das Schulnotensystem aufgebaut. Demnach stellt 1 die beste Bewertung („sehr gut“) und 5 die schlechteste Bewertung („mangelhaft“) dar. Die Ergebnisse werden je nach Material in separaten Diagrammen aufgezeigt, wodurch die Gegenüberstellung der Materialien einen direkten Vergleich miteinander ermöglicht. Dies wird im Laufe des Kapitels anhand eines Projektbeispiels nochmals detaillierter veranschaulicht.

Am unteren Teil der Seite besteht Platz für weitere Anmerkungen hinsichtlich der Sanierungsmaßnahme sowie die potenzielle Nennung eines Referenzprojektes.

5.2 Handbuch des Sanierungskatalogs

Der entwickelte Sanierungskatalog erzielt mit der übersichtlichen und anschaulichen Bewertung der einzelnen Sanierungsmaßnahmen eine Orientierungshilfe für Kommunen und EntscheidungsträgerInnen hinsichtlich der künftigen Sanierungen von Schulgebäuden. Die Vorgehensweise bei einer Anwendung des Katalogs lässt sich im Wesentlichen in die folgenden Schritte einteilen:

1. *Definition der Schwerpunkte der Sanierung + Festlegung der Sanierungsziele*

Für ein zielführendes Ergebnis der Sanierung sind die gewünschten Schwerpunkte vorab zu definieren. In Anlehnung an die Bewertungskriterien können sich diese beispielsweise auf die Kosten, die Verbesserung der

Energieeffizienz durch einen hohen Gebäude-Energiestandard oder die Verwendung ökologischer Baustoffe beziehen.

Darüber hinaus ist es notwendig, basierend auf den Schwerpunkten, konkrete Sanierungsziele zur Orientierung während des Sanierungsprozesses festzulegen. Neben der Priorisierung der Ziele umfasst dies zudem das Festsetzen des zeitlichen Rahmens und dem verfügbaren Budget sowie weiterer Aspekte wie dem Erhalt oder der Veränderung des architektonischen Erscheinungsbildes.

Im Sinne einer integralen Planung ist es sinnvoll die relevanten Disziplinen von Beginn an mit in den Planungsprozess einzubeziehen und die Schwerpunktkriterien in Zusammenarbeit zu ermitteln.

2. *Bestandsaufnahme und Auswahl einer geeigneten Gebäudetypologie*

Eine detaillierte Bestandsaufnahme des aktuellen Gebäudezustandes stellt die Grundlage einer Sanierung dar und ist eine Voraussetzung zu Beginn der Planung. Im Anschluss an die Aufnahme und Bewertung der baulichen Substanz kann eine geeignete Auswahl der im Katalog kategorisierten Gebäudetypen erfolgen.

3. *Auswahl der Sanierungsmaßnahmen*

Vor diesem Hintergrund können die Überprüfung und Auswahl der im Katalog aufgezeigten Sanierungsmaßnahmen stattfinden. Ziel ist die Identifikation der optimalen Maßnahmen zur festgelegten Zielsetzung. Eine enge Abstimmung zwischen der Kommune und den Planenden ist hierfür von hoher Bedeutung.

4. *Projektspezifische Ausarbeitung + Durchführung der Sanierungsmaßnahmen*

Nach der Auswahl der geeigneten Sanierungsmaßnahmen der jeweiligen Bauteile folgt die projektspezifische Ausarbeitung von den zuständigen Beteiligten. Die Maßnahmen des Sanierungskatalog dienen hierzu als Orientierung und Vorlage. Die weitere Planung beinhaltet die potenzielle Anpassung an gebäudespezifische Gegebenheiten sowie die Ausarbeitung von Detail- und Anschlusspunkten. Dies schafft eine fundierte Grundlage zur künftigen Ausführung der Sanierung.

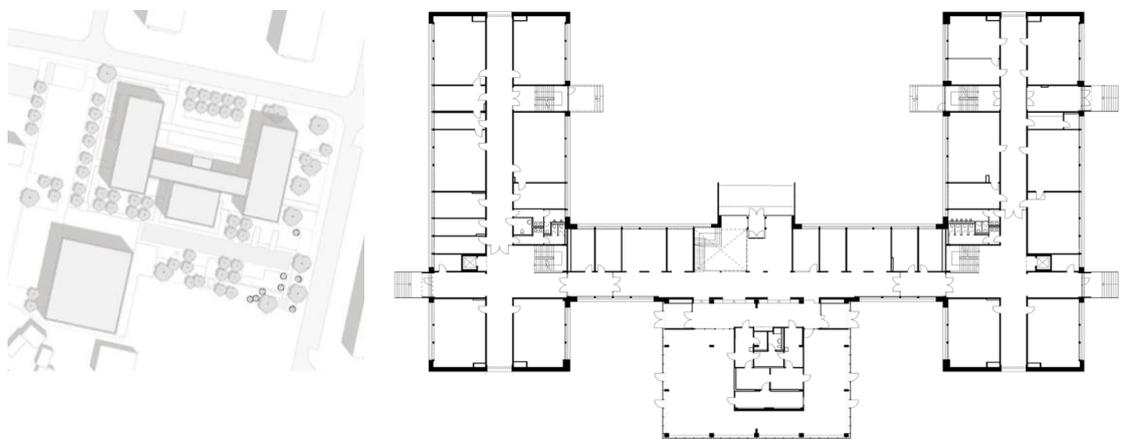
Diese Struktur bietet den Kommunen und allen Beteiligten eine klare Vorgehensweise zur effizienten und erfolgreichen Nutzung des Sanierungskatalogs.

5.3 Anwendung des Sanierungskatalogs - Projektbeispiel

Eine beispielhafte Anwendung des Sanierungskatalogs wird an einem Schulgebäude der Begleitforschung „EnEff: Schule“ aufgezeigt und dem unsanierten Gebäudezustand sowie den umgesetzten Sanierungsmaßnahmen gegenübergestellt.

Als zu vergleichendes Projektbeispiel wurde aufgrund des hohen Anteils am gesamten Schulgebäudebestand sowie dem enormen Sanierungsbedarf ein Schulgebäude der Baualtersklasse 3 (1966-1977) gewählt. Das Max-Steenbeck-Gymnasium in Cottbus stellt hierfür ein repräsentatives Beispiel- Schulgebäude aus dem Jahr 1974 dar. Darüber hinaus erfolgte die bereits durchgeführte Sanierung der Fassade in der häufig vertretenden Ausführungsvariante mittels WDVS. Ein Vergleich zu den alternativen Möglichkeiten ist daher von hohem Interesse. Ziel der umgesetzten Sanierung war die Erstellung eines Musterbeispiel mit Vorbildwirkung für andere Standorte, da der Gebäudetyp regional und überregional weit verbreitet ist (Häusler & Neupetsch, 2015).

Das freistehende Schulgebäude besteht aus einem H-förmigen Grundriss in Form einer klassischen Gangschule in Nord-Süd-Ausrichtung (vgl. Abbildung 5-2). Während der Zwischenbau eine zwei Geschossigkeit aufweist, umfassen die beiden Seitenflügel drei Obergeschosse sowie eine vollflächige Unterkellerung. Angrenzend an den Verbindungstrakt befindet sich ein Mehrzwecksaal (Aula) im Obergeschoss mit einem Luftraum, angedacht als Pausenhof, im Erdgeschoss. Die Sporthalle liegt separat südlich vom Schulgebäude (Häusler & Neupetsch, 2015; Reiß et al., 2017).



**Abbildung 5-2: Max-Steenbeck-Gymnasium Lageplan (links) und Grundriss EG (rechts)
(PPS architekten, 2024)**

5.3.1 Schwerpunkt der Sanierung

Das ehemalige Schulgebäude stand vor dem Einzug des Max-Steenbeck-Gymnasiums im Jahr 2012 leer und bedurfte im Zuge der Wiedernutzung einer umfassenden Sanierung. Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurden neben einer konventionellen Sanierung, die Möglichkeiten einer Sanierung zur Energiesparschule nach Passivhausstandard sowie zur Plus-Energie-Schule analysiert. Maßgeblich für die Entscheidung waren die Baukosten und die langfristigen Betriebskosten, insbesondere angesichts der steigenden Energiekosten. Während die konventionelle Sanierung zwar die geringsten Baukosten darstellte, war sie langfristig jedoch teurer. Über die gesamte Nutzungsdauer von 32 Jahren erwies sich die Sanierung nach Passivhaus-Standard hinsichtlich der Baunutzungskosten als am wirtschaftlichsten, sodass die Entscheidung darauf fiel. Das energetische Ziel war die Umsetzung einer 3-Liter-Haus-Schule. Die entscheidende Anforderung für die nachfolgende Untersuchung stellt die Sanierung des Baukörpers nach Passivhaus-Standard dar (Häusler & Neupetsch, 2015).

5.3.2 Bestandsanalyse

Das 1974 errichtete Gebäude des Max-Steenbeck-Gymnasiums stellt ein repräsentatives Beispiel des im Rahmen der vorliegenden Arbeit kategorisierten Schulgebäudetyps 30 dar. Bei dem Schulgebäude wurden seit seiner Errichtung bis zum Zeitpunkt der Sanierung keine wesentlichen baulichen Veränderungen sowie Instandhaltungen durchgeführt. Wie für den Gebäudetyp üblich, erfolgte die Errichtung als Typenschule in Montagebauweise mit Fertigteilenelementen (siehe Abbildung 5-3) (Reiß et al., 2017). Die Aufbauten der Bestandsbauteile sind in Tabelle 5-1 aufgelistet.



Abbildung 5-3: Bestandsaufnahmen Max-Steenbeck-Gymnasium (Häusler & Neupetsch, 2015)

Tabelle 5-1: Bauteilaufbauten Bestand nach (Reiß et al., 2017)

Bauteil	U-Wert [W/(m ² K)]	Bauteilaufbau
Außenwand Giebel Brüstung Keller	1,00	290 mm Leichtbetonelemente mit 50 mm Kerndämmung 140 mm Beton, 50 mm Holzwolle-Leichtbauplatte (innen) 290 mm Beton, 50 mm Holzwolle-Leichtbauplatte (innen)
Dach	1,30	Stahlbeton-Kassettenplatte mit 50mm Wärmedämmung und bituminöser Dachabdichtung
Geschoss- decke	1,00	Stahlbetondecke mit 75mm Fußbodenaufbau
Bodenplatte	1,00	75mm Fußbodenaufbau auf Beton-Bodenplatte
Fenster	2,70	Holzverbund-Fenster mit Doppelverglasung

Es ist anzumerken, dass die tatsächlichen U-Werte der Bestandskonstruktionen von denen nach (Bundesanzeiger, 2020) abweichen. Für eine einheitliche Bewertung erfolgt die Untersuchung jedoch anhand der festgesetzten Werte.

5.3.3 Vergleich der Sanierungsmaßnahmen

Im Folgenden werden die einzelnen Sanierungsmaßnahmen anhand des Beispiels der Giebelaußenwand gegenübergestellt.

Umgesetzte Sanierungsmaßnahmen

Die bestehende Giebelwand wurde mit einem 26 cm starkem Wärmedämm-Verbundsystem saniert (vgl. Abbildung 5-4) und erzielt hierdurch ein U-Wert von 0,15 W/(m²K) (Reiß et al., 2017). Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, fließen lediglich die Maßnahmen nach erhöhten Energiestandard in einen Vergleich ein.

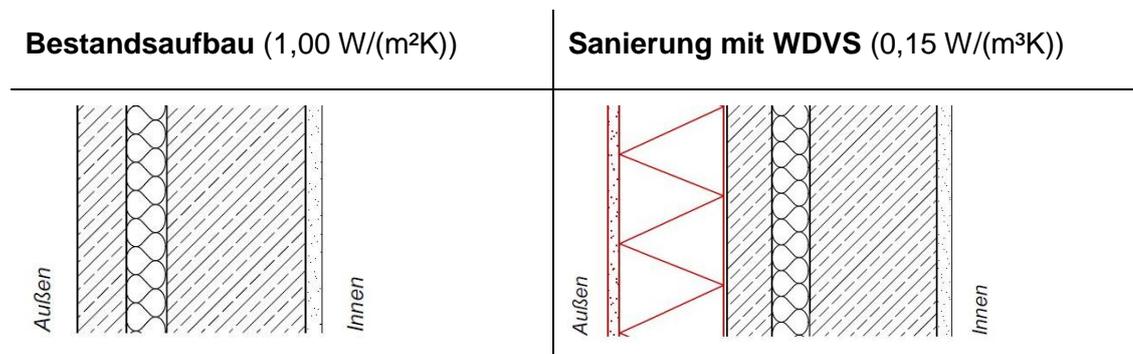


Abbildung 5-4: Gegenüberstellung Bestand / Sanierungsmaßnahme (eigene Darstellung)

Angaben über die verwendete Materialität des Dämmstoffes liegen in der Literatur nicht vor. In Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6 erfolgt eine Gegenüberstellung der unterschiedlichen Materialien einer Außenwandsanierung mit WDVS. Aufgrund der Differenz des U-Werts ergeben sich geänderte Dämmstärken zur tatsächlichen Maßnahme.

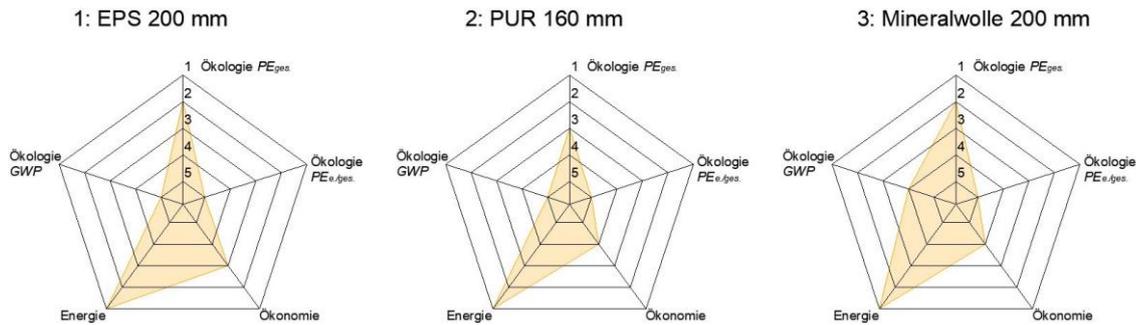


Abbildung 5-5: Bewertung der Sanierungsvariante WDVS – konventionelle Dämmstoffe

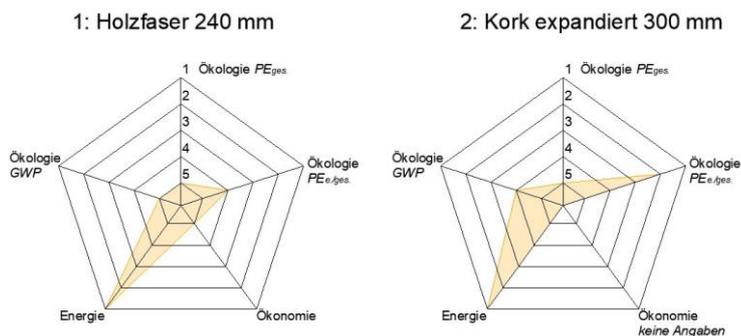


Abbildung 5-6: Bewertung der Sanierungsvariante WDVS – ökologische Dämmstoffe

Die Ergebnisse der Bewertung zeigen, dass für diese Maßnahme ökologische Dämmstoffe keine konkurrenzfähige Alternative zu den konventionellen Dämmstoffen darstellen. Diese schneiden sowohl hinsichtlich der ökologischen Bewertung bei den Umweltwirkungen als auch bei der ökonomischen Bewertung schlechter ab. Dies ist insbesondere auf die deutlich höheren benötigten Dämmstoffstärken zurückzuführen. Für den Dämmstoff Kork liegen in der Datenerhebung keine Angaben bezüglich der Investitionskosten vor, sodass in diesem Fall eine Bewertung der Ökonomie entfällt. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die Dämmstoffe EPS und Mineralwolle in der Gesamtbewertung gleich ausfallen. Je nach Ziel und Schwerpunkt der Sanierung ist hier jedoch zu differenzieren. In Bezug auf die Kosteneffizienz wäre EPS zu bevorzugen, hinsichtlich der ökologischen Auswirkungen dahingegen Mineralwolle.

Alternative Sanierungsmaßnahmen

Ergänzend zur Sanierungsvariante des WDVS werden nachstehend (siehe Abbildung 5-7 bis Abbildung 5-9) die alternativen Möglichkeiten der Außenwandsanierung in den Vergleich mit einbezogen.

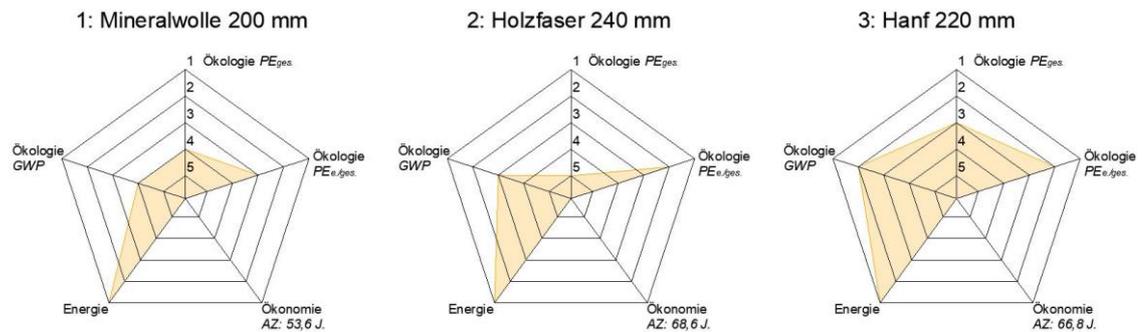


Abbildung 5-7: Bewertung der Sanierungsvariante hinterlüftete Vorhangfassade

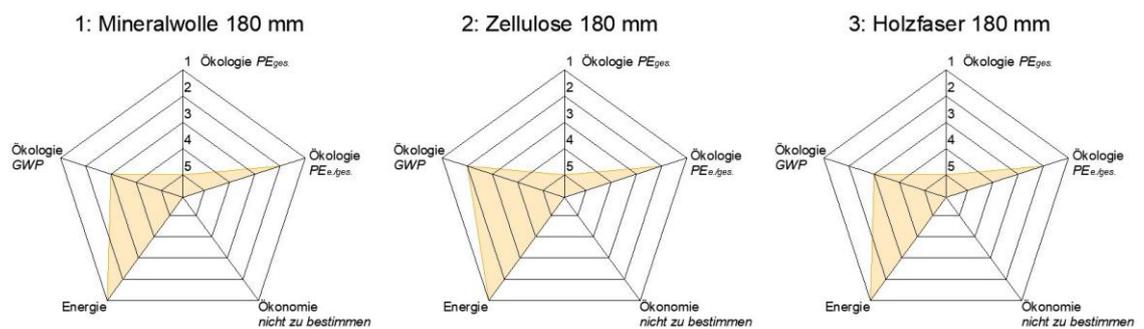


Abbildung 5-8: Bewertung der Sanierungsvariante Serielle Sanierung

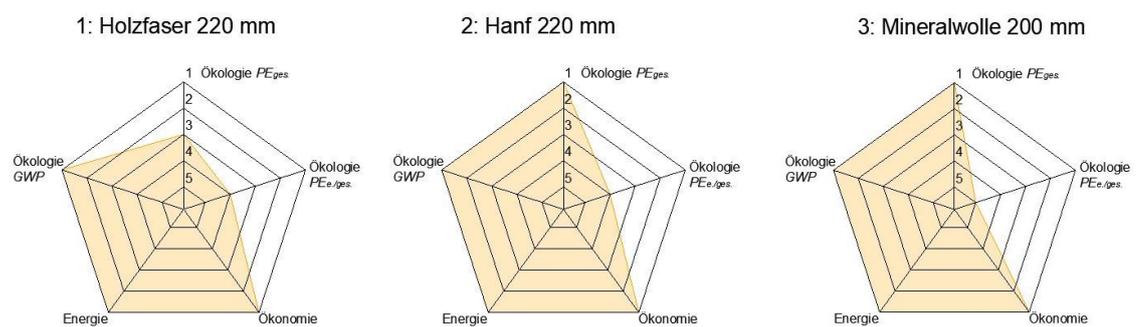


Abbildung 5-9: Bewertung der Sanierungsvariante Innendämmung (Auswahl)

Bei einem Vergleich der Bewertung wird sichtbar, dass die Innendämmung im Gesamten bei den betrachteten Untersuchungskriterien am besten abschneidet. Diese wird in der Regel jedoch aufgrund des Raumverlustes nur verwendet, wenn der Erhalt des Erscheinungsbildes von Relevanz ist. Im Rahmen des Beispielprojekts ist allerdings

nicht der Fall. Daher ist diese Maßnahme zwar für einen kontextuellen Zusammenhang aufgezeigt, würde bei einer Sanierung allerdings voraussichtlich nicht in Betracht gezogen werden. In Bezug auf die Außendämmmaßnahmen bietet die vorgehängte hinterlüftete Fassade mit einer Hanfdämmung die ökologischste Maßnahme. Hinsichtlich der ökologischen Untersuchungskriterien des GWPs sowie dem Anteil an erneuerbarer Energie ist die Serielle Sanierungsmaßnahme ebenfalls besser als das WDVS. Allerdings bleibt bei beiden Varianten die Bewertung der Ökonomie außer Betracht. Damit zeigt das Beispiel die Grenzen der angewendeten Methodik im Hinblick auf die ökonomische Bewertung. Im Fall der vorgehängten hinterlüfteten Fassade liegen die Amortisationszeiten aufgrund der hohen Investitionskosten im Vergleich zu den geringen zu erzielenden Einsparungen außerhalb der Nutzungsdauer des Bauteils. Bei der Seriellen Sanierung ist aufgrund dessen keine Berechnung im Rahmen der Methodik möglich. Daher können diese Maßnahmen bei der ökonomischen Bewertung nicht berücksichtigt werden.

5.4 Erkenntnisse aus der Untersuchung

Die vorliegende Untersuchung zur Erstellung eines Sanierungskatalogs für Schulgebäude zielt auf die energetische, ökologische und ökonomische Bewertung von Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle ab. Die wesentlichen Erkenntnisse aus den jeweiligen Bereichen werden im Folgenden kurz beschrieben.

5.4.1 Energetische Bewertung

In Bezug auf die energetische Bewertung ist baualtersklassenübergreifend mit zunehmendem Baustandard eine Reduktion des Energieeinsparpotenzials bei den Bauteilen, abgesehen der Fenster, zu verzeichnen (vgl. Abbildung 5-10). Aufgrund der energetischen Verbesserung der bestehenden U-Werte verringert sich die energetische Einsparung gegenüber dem zu erzielenden U-Wert. Wie bereits in Kapitel 4.3.3 erwähnt, konnte im Rahmen der Untersuchungen die maximale prozentuale Einsparung mit der Sanierung der obersten Geschossdecke der Gebäudetypen 2A und 2O nach Effizienzhaus Plus – Referenz erreicht werden. Die minimalste Verbesserung der Energieeffizienz bringt die oberseitige Sanierung der Geschossdecke gegen unbeheizte Kellerräume bzw. gegen Erdreich der BAK 3 mit sich. Innerhalb eines Gebäudetyps lässt sich nahezu einheitlich eine ähnliche Entwicklung feststellen. Neben dem oberen Gebäudeabschluss als obersten Geschossdecke bzw. Flachdach bietet ebenfalls die Sanierung der Außenwand ein hohes energetisches Einsparpotenzial.

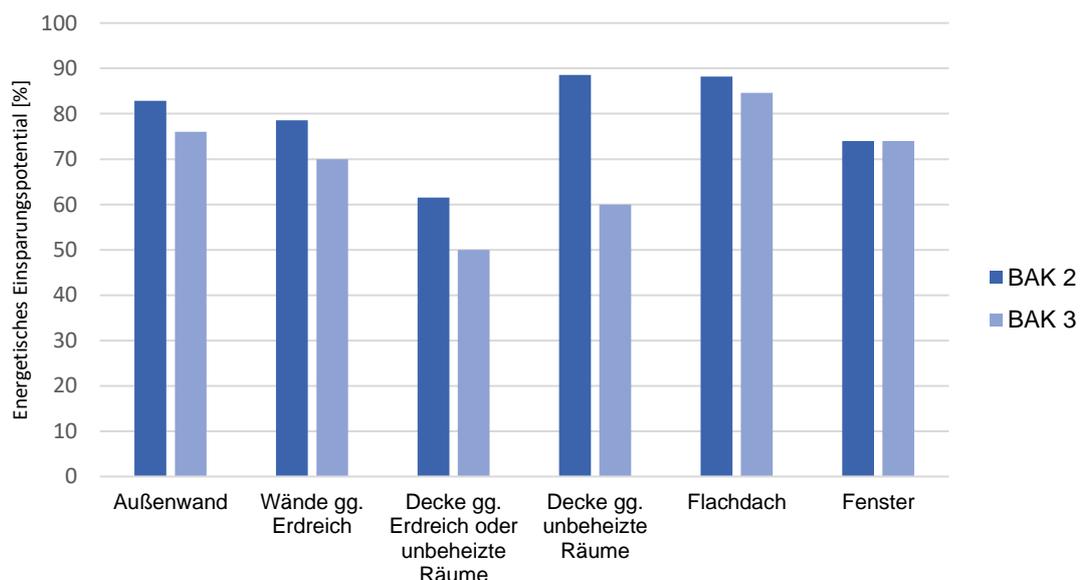


Abbildung 5-10: Energetisches Einsparpotenzial der einzelnen Bauteile nach Baualtersklasse mit zu erzielendem U-Wert nach GEG-Standard

5.4.2 Ökologische Bewertung

Bereits am Anwendungsbeispiel wurde bei einem Vergleich der Materialien der Sanierungsvariante WDVS sichtbar, dass die ökologischen Dämmstoffe nicht zwangsläufig eine nachhaltigere Alternative darstellen. Dies zeigt auch die untenstehende Auswertung (vgl. Abbildung 5-11) der Sanierungsmaßnahme WDVS in Bezug auf die drei Umweltindikatoren.

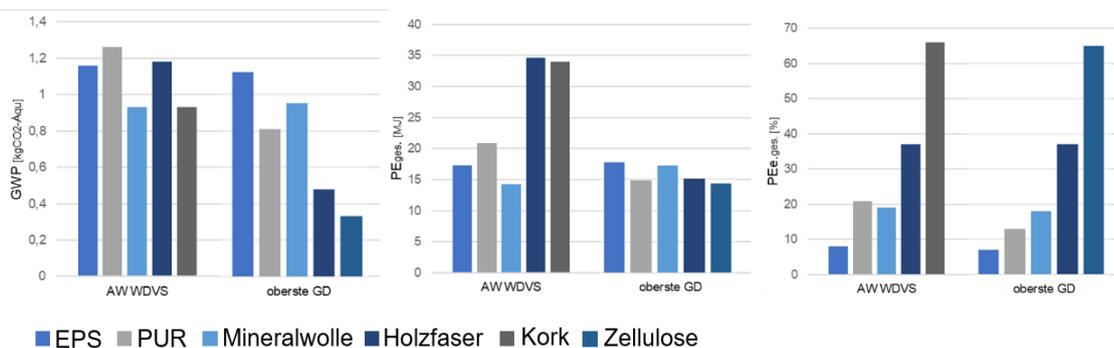


Abbildung 5-11: Gegenüberstellung der Dämmstoffe am Beispiel zweier Sanierungsmaßnahmen des Typs 2A nach Effizienzhaus Plus - Referenz

Ein wesentlicher Grund für die vergleichsweise schlechte Bewertung besteht in der höheren Wärmeleitfähigkeit der ökologischen Dämmstoffe im Vergleich zu herkömmlichen Materialien. Für eine vergleichbare Dämmwirkung ist eine größere Schichtdicke erforderlich, wodurch sich letztlich die Umweltwirkungen erhöhen. Besonders die Holzfaserdämmung schneidet bei den Sanierungsmaßnahmen der Außenwand mittels einem WDVS sowohl hinsichtlich des GWPS als auch des Gesamtprimärenergiebedarfs schlecht ab. Aufgrund ihrer Herstellungsprozesse weisen Holzfaserdämmstoffe einen enormen Gesamtenergiewert auf, sodass der Anteil an erneuerbarer Energie im Verhältnis trotzdem recht gering ausfällt. Für den Einsatz von flexiblen Dämmstoffen gilt dies jedoch nicht, hier zeichnet sich keine große Differenz zu vergleichbaren Dämmstoffen aus Mineralwolle und Hanffaser ab. Die flexiblen Dämmstoffe fallen hinsichtlich der ökologischen Bewertung deutlich besser aus als die festen Dämmstoffe. Daher sind die Sanierungsmaßnahmen mit diesen Dämmstoffen aus ökologischer Sicht zu empfehlen. Dies ist beispielsweise bei den Sanierungsmaßnahmen der obersten Geschossdecke zu erkennen. Hier schneiden nachwachsende Rohstoffe deutlich besser ab als konventionelle Dämmstoffe (vgl. Abbildung 5-11). Insbesondere die Verwendung von Zellulose zeichnet sich durch einen niedrigen GWP sowie einem geringen Primärenergieverbrauch aus und führt zu einer besseren ökologischen Gesamtperformance.

5.4.3 Ökonomische Bewertung

Als Grundlage zur ökonomischen Bewertung der Sanierungsmaßnahmen dient die Ermittlung der Investitionskosten. Diese ergeben sich im Wesentlichen in Abhängigkeit der Art der Sanierungsmaßnahme und der Materialität des Dämmstoffes, sowie der erforderlichen Dämmstärke. Der Einfluss von der Art der Sanierungsmaßnahme auf die Investitionskosten wird am Beispiel der Außenwand in Abbildung 5-12 deutlich.

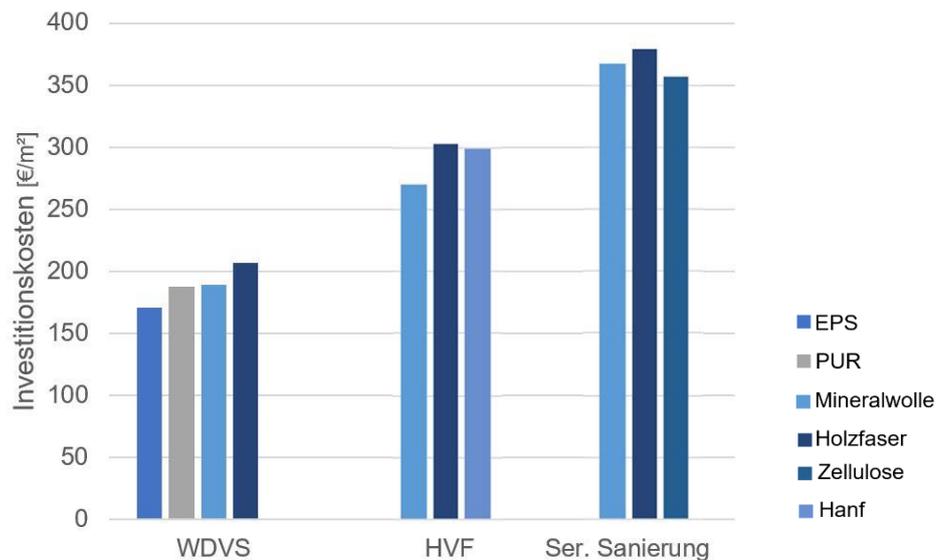


Abbildung 5-12: Investitionskosten der Sanierungsmaßnahmen der Außenwand Typ 2A nach Dämmstoffen und $U=0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Im Vergleich der Außendämmmaßnahmen erweist sich, wie bereits aus der Literatur bekannt (Eßmann et al., 2022), die Sanierung mit einem Wärmedämmverbundsystem insbesondere aus EPS am kostengünstigsten. Während die Maßnahmen der vorgehängten hinterlüfteten Fassade sowie der Seriellen Sanierung vor dem Hintergrund der ökologischen Bewertung verhältnismäßig gut abschneiden, sind jedoch aus ökonomischer Sicht die Investitionskosten deutlich höher als bei konventionelle Wärmedämmverbundsysteme. Allerdings ist vor allem bei der Seriellen Sanierung zu beachten, dass diese durch die Vorteile der Bauweise, wie beispielsweise eine verkürzte Bauzeit, an anderen Positionen erhebliche wirtschaftliche Einsparpotenziale bietet (vgl. auch 2.1.3). Diese werden bei der Ermittlung der Investitionskosten jedoch nicht berücksichtigt.

Die Analyse der Materialkosten ergab, dass sich sowohl die Material- als auch die Verlegkosten der ‚ökologischen‘ Dämmstoffe aus Holzfaser und Hanffaser gegenüber dem konventionellen Dämmstoff aus Mineralwolle in den letzten Jahren zunehmend

angeglichen haben. Die häufig benötigte höhere Dämmstoffstärke der ökologischen Dämmstoffe resultiert allerdings in einer Steigerung der Gesamtkosten. Innovative Dämmmaterialien wie Vakuumisulationspaneele sind sehr kostenintensiv und gleichen sich meist auch nicht durch eine geringere Dämmstärke aus.

Neben den Auffälligkeiten bei der Kostenermittlung zeigt die ökonomische Bewertung der Sanierungsmaßnahmen insbesondere zentrale Erkenntnisse bezüglich der Amortisationszeit von den Sanierungsmaßnahmen. Grundsätzlich ist festzustellen, dass sich die Amortisationszeit mit zunehmenden Baustandard der Baualterklasse erhöht, während sich die Rentabilität der Sanierungsmaßnahme aus finanzieller Sicht reduziert. Diese Entwicklung ist auf die geringeren energetischen Einsparungen zurückzuführen. Dies wird in Abbildung 5-13 anhand der Außenwandsanierung mit WDVS im Vergleich der Gebäudetypen 2A und 3A sichtbar.

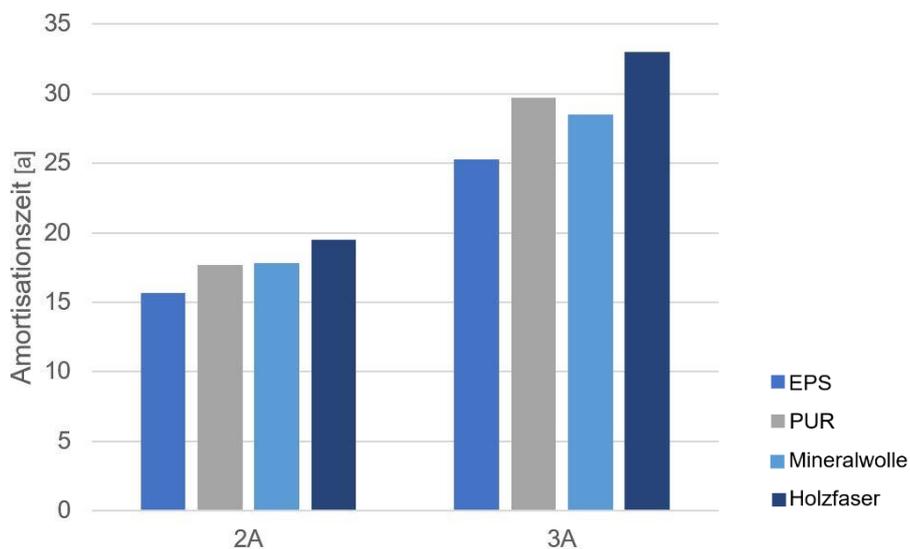


Abbildung 5-13: Amortisationszeit am Beispiel der Außenwandsanierung mit WDVS der Gebäudetypen 2A und 3A

Die Verbesserung der Baustandards erfordern einen zunehmend geringeren Aufwand mit reduzierten Dämmstärken zum Erzielen der energetischen Vorgaben. Zwar führt dies einerseits insgesamt zu einer Reduktion der Investitionskosten, allerdings sind die erzielten energetischen Einsparungen meist so gering, dass sich die Maßnahmen auf Basis der verwendeten Methodik nicht im Laufe der Nutzungszeit amortisieren. Dies wurde bereits am Anwendungsbeispiel der Giebelsanierung des Gebäudetyps 30 sichtbar (vgl. 5.3.3) und zeigt die Grenzen der angewandten Methodik auf. In Anbetracht dieser Erkenntnis, gilt es die ökonomische Bewertung der entsprechenden Sanierungsmaßnahmen differenziert zu betrachten. Zudem verdeutlicht dies, dass die Sanierungsmaßnahmen zwar aus ökologischer Sicht in Bezug auf die Minimierung des

Energiebedarfs und Reduzierung der CO₂-Emissionen durchaus effizient, nachhaltig und sinnvoll sind, jedoch aus wirtschaftlicher Sicht erstmal eine wesentliche Investition bedeuten. Dennoch stellt sich die Sanierung in der Regel als kostengünstigere Alternative im Vergleich zu einem Abriss und Neubau heraus. Bei der Analyse der Sanierungs- und Neubauprojekte des Forschungsvorhaben EnEff: Schule fielen außer bei einem Schulgebäude, die Kosten der Sanierungsmaßnahmen geringer aus als bei den Neubauten (Reiß et al., 2017).

Darüber hinaus ist zu beachten, dass die nach Holm et al. (2015) berechneten Amortisationszeiten sowohl von der Energiepreissteigerung als auch dem Ausgangswert der Energiepreise beeinflusst werden. Im Rahmen der ökonomischen Bewertung dieser Arbeit wird hierbei von einer Energiepreissteigerung von 1,72% (Pehnt et al., 2023) und einem aktuellen Energiepreis von 0,12 €/kWh (Statistisches Bundesamt, 2020) ausgegangen. Inwiefern sich diese Faktoren auf die Entwicklung der Amortisationszeit auswirken, wird anhand verschiedener Ausgangsenergiepreise [€/kWh] sowie der jährlichen Energiepreissteigerung in Abhängigkeit vom Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis [€/kWh a] in Abbildung 5-14 dargestellt. Die betrachteten Energiepreise beinhalten den Stand vor Ausbruch der Ukraine-Krise mit 0,08 €/kWh und die zu erwartende Entwicklung im Jahr 2042 mit 0,16 €/kWh (Pehnt et al., 2023).

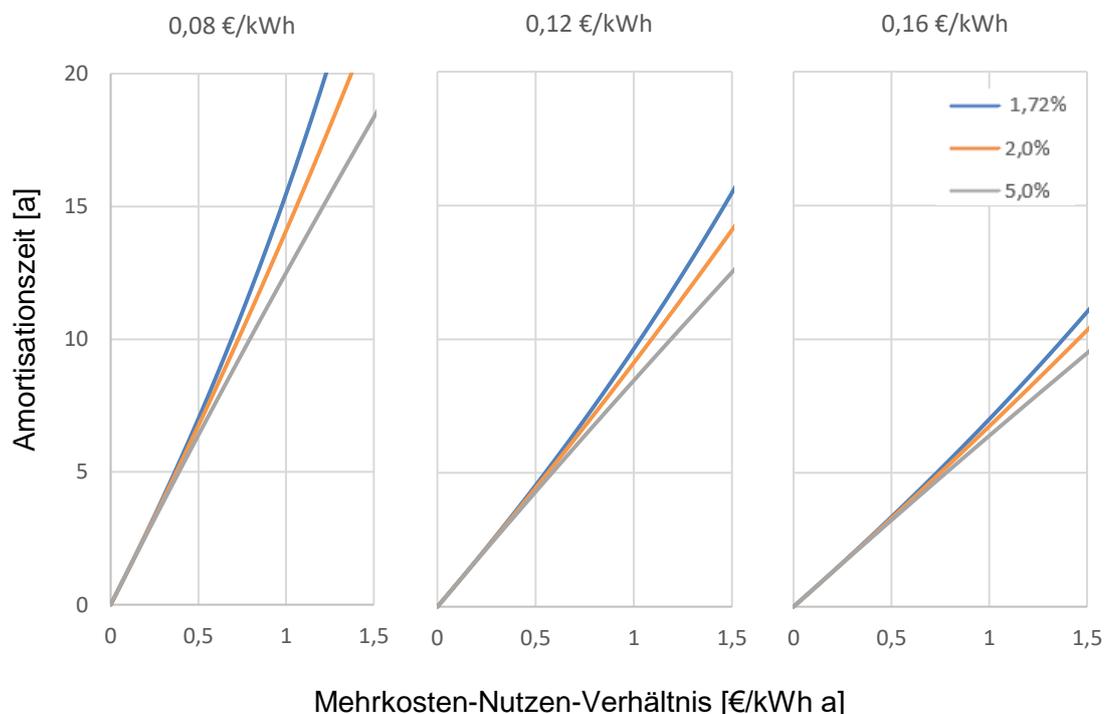


Abbildung 5-14: Wechselwirkungen von Energiepreissteigerung und Amortisationszeit; eigene Darstellung in Anlehnung an (Holm et al., 2015)

Das Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis (MNV) beschreibt die Mehr- bzw. Investitionskosten einer Sanierungsmaßnahme zum Erzielen eines gesteigerten Wärmeschutzes im Verhältnis zur jährlichen Heizenergieeinsparung. Dementsprechend bildet das MNV eine Kennzahl, die energiebedingte Investitionskosten pro jährlich eingesparter kWh in das Verhältnis setzt. Je kleiner diese Kennzahl ausfällt, desto wirtschaftlicher ist die aufgewendete Sanierungsmaßnahme. Für die Sanierung der Außenwand des Gebäudetyps 2A mittels einem WDVS mit EPS-Dämmung beträgt die Kennzahl beispielsweise 1,38. Die Diagramme zeigen den Einfluss der Energiepreissteigerung bezüglich einem festgelegten Energiepreis zum Start einer Investitionsmaßnahme. Es ist festzustellen, dass mit steigendem MNV, sprich bei höheren Investitionskosten, der Einfluss der Energiepreissteigerung zunimmt. Zudem zeigen die Ergebnisse einen Einflussrückgang der Energiepreissteigerung bei höheren Ausgangsenergiepreisen.

Diese Erkenntnisse unterstreichen die Komplexität und Notwendigkeit einer sorgfältigen Planung bei der ökonomischen Bewertung von Schulgebäuden.

6 Diskussion

Die gezeigten Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bedürfen einer kritischen Betrachtung und einordnenden Interpretation vor dem Hintergrund bestehender Einschränkungen.

6.1 Bewertung der Methodik

Die in dieser Arbeit entwickelten Konzepte bieten Kommunen und EntscheidungsträgerInnen eine bedeutende Orientierungs- und erste Entscheidungshilfe für die Sanierung von Schulgebäuden. Die umfassenden energetischen, ökologischen und ökonomischen Bewertungen von Sanierungsmaßnahmen der Bauteile verschiedener Baualterklassen schaffen eine fundierte Basis und ermöglichen erste Einschätzungen bezüglich potenzieller Vorteile und Herausforderungen, um zukünftige Sanierungsentscheidungen zu unterstützen. Eine detaillierte Betrachtung und Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen den Bauteilen sowie gebäudespezifischer Komponenten ist für eine reale Planung jedoch zwingend erforderlich. Der vorliegende Sanierungskatalog dient vielmehr als vorbereitende Grundlage für eine weiterführende, spezifizierte Maßnahme und ersetzt daher nicht die detaillierte Planung eines spezifischen Projektes.

Die Einschränkungen der vorliegenden Bewertung bedingen für eine umfassende Betrachtung zudem eine Ergänzung der Untersuchungskriterien. Während die Arbeit eine solide Grundlage für die Planung bietet, fanden weitere Aspekte wie der Erhalt des äußeren Erscheinungsbildes und der bautechnische Aufwand der Sanierungsmaßnahmen keine nähere Berücksichtigung. In Bezug auf denkmalgeschützte Gebäude stellen diese beispielsweise jedoch einen erheblichen Einfluss dar. Die Bewertung von letzterem spielt dahingegen vor Allem bei der Seriellen Sanierung eine wichtige Rolle. Faktoren wie die Länge der Bauzeit sowie die Nutzungsbeeinträchtigung und Lärmbelästigung durch die Sanierungsmaßnahmen umfassen wesentliche Vorteile dieser Sanierungsmethode, insbesondere im Bereich der Schulgebäudesanierung, werden jedoch im Rahmen der Untersuchungen nicht bewertet.

In Bezug auf die ökologische Bewertung der Sanierungsmaßnahmen fokussiert sich die Arbeit vor dem Hintergrund des Klimawandels und des Ressourcenbedarfs im Bauwesen auf die Umweltwirkungen GWP, PENRT und PERT. Darüber hinaus

existieren eine Vielzahl an weiteren Umweltindikatoren, die zur Bewertung des Ressourcenverbrauchs und der Emissionen relevant sein können, jedoch im Rahmen der Untersuchung nicht berücksichtigt werden. Diese können jedoch im Einzelfall ergänzt und betrachtet werden.

Darüber hinaus ist für eine effiziente und nachhaltige Sanierung von Schulgebäuden eine ganzheitliche Betrachtung notwendig. Neben der Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen der Gebäudehülle und der technischen Gebäudeausrüstung ist hierfür die Integration von pädagogischen Konzepten in die Sanierungsplanung von hoher Bedeutung. Solche Interaktionen sollten zwingend in der Planung berücksichtigt werden, um das volle Potenzial der Sanierungsmaßnahme auszuschöpfen.

Insgesamt bieten die erarbeiteten Kennwerte und Methoden im Rahmen des Sanierungskatalogs daher zwar eine wertvolle Grundlage für die Planung und Durchführung von Sanierungsmaßnahmen an Schulgebäuden, sollten jedoch als Teil eines umfassenderen Prozesses betrachtet werden.

6.2 Eingeschränkte Datengrundlage

Eine wesentliche Einschränkung sowohl für die Ermittlung der Bestandstypologie von Schulgebäuden als auch für die ökologische und ökonomische Bewertung der Sanierungsmaßnahmen ist die jeweils vorhandene Datengrundlage.

Die Entwicklung der Schulgebäudetypologie erfolgt auf Grundlage der typischen Baukonstruktionen des Gebäudebestandes. Hierfür wird eine möglichst breite Datengrundlage angestrebt. In der Fachliteratur existieren für den Gebäudebestand von Schulbauten jedoch gewissen Informationslücken in Bezug auf die detaillierten Schichtaufbauten der Bauteile. Bestehende Datenquellen konzentrieren sich häufig auf die Analyse der energetischen Qualität der Bauteile und vernachlässigen die genaue Erfassung der baulichen Substanz im Hinblick auf die Konstruktionsmethode, die verwendeten Materialien sowie die Schichtaufbauten. Um diese Datenlücke zu schließen, wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Die vorhandene Literatur ist zwar umfangreich, weist jedoch kaum eine valide, systematisch aufbereitete Beschreibung der bauzeitlichen typischen Baukonstruktionen auf. Aufgrund der unzureichenden Dokumentation mussten auf dieser Grundlage daher die Bauteilaufbauten teilweise durch fundierte Annahmen einschlägiger Literatur festgesetzt werden, wodurch die Belastbarkeit der Daten eingeschränkt wird.

In Bezug auf die Entwicklung einer Schulgebäudetypologie ist zudem zu erwähnen, dass durch die Kategorisierung des Schulgebäudebestandes anhand der ausgewählten Klassifikationskriterien sowie der definierten baukonstruktiven Eigenschaften ein möglicher Variantenverlust besteht. Wie bereits in Kapitel 3.2 hingewiesen, können neben der gezeigten, repräsentativen Auswahl an Bestandskonstruktionen ergänzend weitere Aufbauten bestehen, welche im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine spezifische Berücksichtigung finden. Darüber hinaus haben die gewählten Klassifikationskriterien einen großen Einfluss auf die zu erzielenden Ergebnisse. Insbesondere im Bereich der energetischen Analyse von Schulgebäudesanierungen spielt die Gebäudegröße eine wesentliche Rolle und findet in der Literatur, wie beispielsweise bei Scharte (2016), häufig Anwendung. Aufgrund der Untersuchungen in dieser Arbeit auf Bauteilebene, fand dieses Kriterium jedoch keine Berücksichtigung.

Eine weitere Herausforderung ist die eingeschränkte Kostengrundlage für nicht konventionelle Konstruktionen bzw. Dämmstoffe in Anbetracht der ökonomischen Bewertung. Der Baukostenindex (BKI) dient als wesentliche Grundlage zur Ermittlung der Investitionskosten. Er bietet Informationen bezüglich der Kosten entsprechender Baustoffe sowie zusammengefasster Konstruktionen für sowohl Neubauten als auch Baumaßnahmen im Bestand, einschließlich Angaben zum Rückbau. Die vorliegenden Angaben decken hierbei jedoch nur eine Auswahl an Dämmstoffen, welche in der Regel Polystyrol, Mineralwolle und Holzweichfaser sind, sowie repräsentativ durchschnittliche Standarddämmstärken ab. Informationen zu innovativen als auch nachwachsenden Dämmstoffen werden hierbei nicht berücksichtigt. In ausgewählten Literaturen sind grobe Einschätzungen für ein Vergleich der unterschiedlichen Dämmstoffe gegeben. Eine valide, aufbereitete Datengrundlagen stellen diesbezüglich jedoch eine Informationslücke in der Literatur dar. Um diese Datenlücke zu schließen, werden in der vorliegenden Arbeit die Kosten gezielt auf der Analyse von Herstellerangaben ermittelt und ergänzt. Hierdurch sind gewisse Unsicherheiten innerhalb der Daten nicht auszuschließen, zudem nicht alle Baustoffe in der Datenerhebung, wie beispielsweise der Dämmstoff Kork, vertreten sind. Des Weiteren ist zu beachten, dass projektspezifische Gegebenheiten einen wesentlichen Einfluss auf ökonomischen Auswirkungen von Sanierungsmaßnahmen haben. Diese können im Rahmen der Arbeit und der ökonomischen Bewertung nicht berücksichtigt werden.

Im Hinblick auf die ökologische Bewertung von Sanierungsmaßnahmen umfasst die eingeschränkte Datengrundlage nicht vorhandene Umweltproduktdeklarationen für spezifische Dämmstoffe. Insbesondere innovative und Dämmstoffe aus

nachwachsenden Rohstoffen, wie beispielsweise Schilfrohr, sind aufgrund der fehlenden Standardisierung erschwert zu ermitteln. Dies verknüpft die Verwendung dieser Dämmstoffe mit erheblichem Aufwand und stellt sich insbesondere bei der Schulgebäudesanierung als herausfordernd dar, da Kommunen und EntscheidungsträgerInnen auf fundierte Informationen und eine einfache Durchführung angewiesen sind.

Darüber hinaus erfordern Widersprüchlichkeiten von Literatur und Datenerhebung die kritische Betrachtung der ökologischen Bewertung dieser Materialien. Dies zeigt sich exemplarisch am Beispiel der Dämmung von Stroh. In der Fachliteratur wird Stroh als eines der umweltfreundlichsten und nachhaltigsten Dämmmaterialien dargestellt. Dies ist zum einen in der regionalen Verfügbarkeit als auch der Tatsache, dass Stroh als „Abfallprodukt“ bei der Getreideernte als nachwachsender Rohstoff entsteht, begründet (Baunetz Wissen, 2024; Blöbaum; FASBA e.V., 2024; Galinski & Paul, 2015; maxit strohpanel, 2024). Bei der Durchführung der ökologischen Bewertung unter Betrachtung der Lebenszyklusphasen A1-3 bis C3/4 anhand einer herstellereinspezifischen Umweltproduktdeklaration (ARGE maxit/ Huppenberger) nach aktueller Norm ergeben sich jedoch erhebliche Abweichungen bezüglich dieser Angaben. Vergleicht man den Dämmstoff pro Zentimeter mit EPS, so fällt zwar die Strohdämmung bezüglich des GWPs mit 0,74 kgCO₂-Äqu. zu 0,97 kgCO₂-Äqu. besser aus, weist jedoch den doppelten Gesamtprimärenergiebedarf auf. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass dieser im Gegensatz zu EPS überwiegend aus einem Anteil aus erneuerbaren Energien stammt (ca. 83%), der Anteil an nicht erneuerbaren Energien bleibt allerdings höher als bei EPS. Zusätzlich verstärkt werden die Umweltwirkungen der Strohdämmung durch die deutlich stärkere Dämmdicke. Während für eine Dämmung mit EPS 12 cm eingesetzt werden, benötigt man aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit 18 cm Strohdämmung bei gleichem U-Wert (Bau EPD GmbH, 2023). Diese Differenz zwischen Literatur und Datenerhebung lassen sich im Rahmen dieser Arbeit nicht ergründen und es besteht weiterer Forschungsbedarf.

7 Fazit

Nach der Präsentation der Ergebnisse und der Berücksichtigung ihrer wesentlichen Einschränkungen ist abschließend zu beurteilen, inwiefern die formulierte Forschungshypothese verifiziert werden kann und welche Auswirkungen sowie Handlungsempfehlungen sich daraus ableiten lassen.

7.1 Zusammenfassung und Verifizierung der Forschungshypothese

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Maßnahmenkatalog für die Sanierung der Gebäudehülle von sechs kategorisierte Schulgebäudetypen entwickelt, der zur Bewertung der ökologischen, energetischen und ökonomischen Qualität der Sanierungsmaßnahmen am Schulgebäudebestand vorgesehen ist.

Dabei wurde zunächst untersucht, nach welchen Kriterien sich der Schulgebäudebestand in Deutschland für eine derartige Bewertung sinnvoll klassifizieren lässt. Insbesondere das Baualter sowie die Bauweise und der Standort haben sich hierfür als geeignet erwiesen und lassen den Gebäudebestand in insgesamt 13 Typen einteilen. Auf dieser Grundlage wurden, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, die sechs Typologien basierend auf einer umfassenden Datenrecherche und der Analyse von Referenzprojekten hinsichtlich ihrer baukonstruktiven Eigenschaften definiert.

Darauf aufbauend konnte die Entwicklung und Untersuchung der Sanierungskonstruktionen auf Bauteilebene sowie die Erhebung ihrer ökologischen, energetischen und ökonomischen Kennwerte, welche zur Bewertung der Maßnahmen dienen, erfolgen.

Die energetische Bewertung liefert Informationen über die Verbesserung des energetischen Ist-Zustandes gegenüber den angestrebten Zielgrößen. Hierfür wurden zwei Szenarien der energetischen Sanierung definiert. Mit Hilfe des U-Werts lassen sich die energetischen Einsparpotenziale festhalten. Die ökologische Beurteilung der Sanierungsmaßnahmen erfasst durch die Methodik der Ökobilanzierung die Umweltwirkungen anhand des GWP, des PE_{ges} sowie des $PE_{e/ges}$. Hierbei wird nicht nur zwischen verschiedenen Sanierungsmaßnahmen eines Bauteils differenziert, sondern zudem werden auch unterschiedliche Materialien innerhalb einer Variante betrachtet.

Das Anwendungsbeispiel (vgl. Kapitel 5.3) zeigt, dass sowohl eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Dämmstoffe einer Sanierungsvariante als auch die Bewertung der ökologischen Auswirkungen im Vergleich zu alternativen Sanierungsmaßnahmen gewährleistet ist. Ergänzend zu diesen Betrachtungen ermöglicht die Ermittlung der Amortisationszeit der Sanierungsmaßnahmen eine ökonomische Bewertung. Diese wird anhand der zuvor beschriebenen Methodik durchgeführt. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Berechnung der Amortisationszeit aufgrund der in Kapitel 5.4.3 genannten Einschränkungen nicht flächendeckend für jedes Bauteil angewendet werden kann.

Die entsprechenden Ergebnisse der Bewertungskategorien werden jeweils in Vergleichskennwerte transferiert und innerhalb einer Vergleichsskala definiert. Die energetischen Kennwerte werden bauteilübergreifend für einen Gebäudetyp eingeordnet und geben Auskunft darüber, mit welcher Bauteilsanierung die höchsten Energieeinsparpotenziale erzielt werden können. Im Gegensatz dazu werden die ökologischen und ökonomischen Kennwerte einer Sanierungsvariante innerhalb einer Sanierungsmaßnahme in den Vergleich gestellt.

Die Ergebnisse der Arbeit in Form eines Sanierungskatalogs zeigen, dass mit der erzeugten Bewertungsmethodik durch die Angabe von Kennwerten Rückschlüsse auf die energetische, ökologische und ökonomische Qualität der einzelnen Sanierungsmaßnahmen im Verhältnis zu alternativen Sanierungsmaßnahmen des Bauteils erhalten werden können.

Der erste Aspekt der Forschungshypothese - **„Mit Hilfe der Entwicklung von einem Maßnahmenkatalog und der Ableitung entsprechender Kennwerte lässt sich die ökologische, energetische und ökonomische Qualität von Sanierungsmaßnahmen am Schulgebäudebestand auf Bauteilebene bewerten.“** - kann somit mit den genannten Einschränkungen hinsichtlich der ökonomischen Bewertung in der Anwendbarkeit verifiziert werden.

Darüber hinaus wird die formulierte Forschungshypothese um einen weiteren Teil - **„Zudem lassen sich Handlungsempfehlungen in Bezug auf die Sanierung zur Umsetzung eines klimaneutralen Gebäudebestandes, sowie die Reduzierung des Energieverbrauchs ableiten.“** – ergänzt.

Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle bieten ein enormes Potenzial zur Reduzierung des Energieverbrauchs von Gebäuden und leisten damit einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes (siehe

auch Kapitel 2.1.1). Der sanierungsbedürftige Schulgebäudebestand in Deutschland ist hierfür besonders hervorzuheben. Mit 18 % stellt dieser einen signifikanten Anteil des kommunalen Gebäudebestandes dar und weist in diesem Bereich erhebliche Verbesserungen und ein großes Einsparpotenzial auf (vgl. Kapitel 2.2).

Der als Ergebnis dieser Arbeit entwickelte Maßnahmenkatalog präsentiert eine umfassende Auswahl und Bewertung geeigneter Sanierungsmaßnahmen und identifiziert mögliche Potenziale für verschiedene Baualtersklassen und Bauteile. Die Verwendung des Maßnahmenkatalogs zur Sanierung von Schulgebäuden unterstützt Kommunen und EntscheidungsträgerInnen bei der Umsetzung künftiger Sanierungsvorhaben durch eine schnellere Bewertung und Einschätzung der Auswirkungen der durchgeführten Maßnahmen. Durch die Bereitstellung fundierter Handlungsempfehlungen trägt der Katalog dazu bei, dass Kommunen ihrer Vorbildfunktion gerecht werden können. Der Katalog erzielt somit nicht nur die Reduktion des Energieverbrauchs bestehender Gebäude, sondern fördert zudem die Etablierung eines klimaneutralen Gebäudebestandes. Hierdurch wird deutlich, dass der zweite Teil der Forschungshypothese angenommen werden kann.

7.2 Ausblick

Ein bedeutendes Anliegen in der aktuellen Forschung besteht in der unzureichenden Datengrundlage sowie der fehlenden systematischen Erfassung und Beschreibung von Bauteilaufbauten sowie dem Zustand des Schulgebäudebestandes. Der hohe Sanierungsbedarf, insbesondere der Gebäude der Baualtersklassen 2 und 3, erfordert ein hohes Maß an Ressourcen. Eine systematische Erfassung des Bestandes ist von enormer Bedeutung, um eine übergeordnete Strategie zur nachhaltigen Sanierung des Schulgebäudebestandes zu entwickeln. Dies ist essenziell, um zukünftig die Gesamtbelastungen der Kommunen abschätzen und verringern zu können.

Darüber hinaus ist, basierend auf den Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit, sowohl die ökologische als auch ökonomische Datengrundlage zur Verwendung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen als unzureichend einzustufen. Für eine fundierte Bewertung der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen von Sanierungsmaßnahmen ist es entscheidend, die Datengrundlage auszubauen und zu verbessern. Dies betrifft insbesondere die Erweiterung bestehender standardisierter Datenquellen, beispielsweise der Ökobaudat in Bezug auf die Ökologie oder des BKI hinsichtlich der ökonomischen Bewertung von Sanierungsmaßnahmen. Dies ist

entscheidend für die effektive Implementierung nachhaltiger Baustoffe, um schließlich die Nachhaltigkeit im Bauwesen zu fördern.

Durch eine fundierte Datengrundlage und lebenszyklusbasierte Analysen lassen sich künftig präzisere energetische, ökologische und ökonomische Handlungsempfehlungen für die Sanierung von Schulgebäuden ableiten und somit zugleich das Ziel eines klimaneutralen Gebäudebestandes und die Entlastung der Kommunen zu erreichen.

Um abschließend zu dem einleitenden Zitat von Johann Wolfgang Goethe – *„Es ist nicht genug zu wissen, man muß auch anwenden; es ist nicht genug zu wollen, man muß auch tun.“* (Aphorismen, 2015) – zurückzukehren, ist es an der Zeit, mit Hilfe des Maßnahmenkatalogs das Wissen über die Potenziale des Schulgebäudebestandes in die Tat umzusetzen und moderne, nachhaltige Bildungseinrichtungen für die kommenden Generationen zu schaffen.

Literaturverzeichnis

- Ahnert, R., & Krause, K. H. (1993). *Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960* (2., durchges. Aufl.). Huss-Medien.
- Annex 36. (2004). *IEA ECBCS Annex36 - Retrofitting for Educational Buildings. REDUCE*. <http://www.annex36.com/>
- Aphorismen (Hrsg.). (2015). *Aphorismus zum Thema Mut von Johann Wolfgang von Goethe*. <https://www.aphorismen.de/zitat/436>
- Bahner, O. (2017). *Leitlinien für leistungsfähige Schulbauten in Deutschland* (3., überarbeitete Auflage). Montag Stiftung Jugend und Gesellschaft.
- Bau EPD GmbH (Hrsg.). (2023). *Strohplatten ARGE Maxit/ Huppenberger: Umweltproduktdeklaration*. IBO GmbH; ARGE Maxit/ Huppenberger. https://www.maxit-strohpanel.de/fileadmin/user_upload/Zielgruppen/6-1_Downloads/Umwelt-Produktdeklarationen_EP/BAU-EPD-MAXHUPP-2023-1-GaBi-Strohplatten-20230616.pdf
- baubook (Hrsg.). (2024a, 28. Juni). *PENRT Nicht erneuerbare Primärenergie - total*. https://www.baubook.at/m/PHP/Fragezeichen.php?S_oe kz_Typ=1&SW=5
- baubook (Hrsg.). (2024b, 28. Juni). *PERT Erneuerbare Primärenergie - total*. https://www.baubook.at/m/PHP/Fragezeichen.php?S_oe kz_Typ=9&SW=5
- Baunetz Wissen (Hrsg.). (2024a). *Bauphysikalische Grundlagen*. <https://www.baunetzwissen.de/nachhaltig-bauen/fachwissen/bauphysik/bauphysikalische-grundlagen-684088>
- Baunetz Wissen (Hrsg.). (2024b). *Blower-Door-Test*. <https://www.baunetzwissen.de/glossar/b/blower-door-test-4323587>
- Baunetz Wissen (Hrsg.). (2024c). *Flankenschutz bei Innendämmungen*. <https://www.baunetzwissen.de/daemmstoffe/fachwissen/wand/flankenschutz-bei-innendaemmungen-1499415>
- Baunetz Wissen (Hrsg.). (2024d). *Gebäudeenergiegesetz (GEG) | Gebäudetechnik | Regelwerke | Baunetz_Wissen*. <https://www.baunetzwissen.de/gebaeudetechnik/fachwissen/regelwerke/gebaeudeenergiegesetz-geg-7491657>
- Baunetz Wissen (Hrsg.). (2024e). *Gebäudetechnik*. <https://www.baunetzwissen.de/gebaeudetechnik>
- Baunetz Wissen (Hrsg.). (2024f). *Glaser-Verfahren | Bauphysik | Glossar | Baunetz_Wissen*. <https://www.baunetzwissen.de/glossar/g/glaser-verfahren-4381289>

- Baunetz Wissen (Hrsg.). (2024g). *Nachträgliche Begrünung von Dächern*.
<https://www.baunetzwissen.de/altbau/fachwissen/dach-deckungen/nachtraegliche-begruenung-von-daechern-2355397>
- Baunetz Wissen (Hrsg.). (2024h). *Photovoltaik an Fassaden*.
<https://www.baunetzwissen.de/solar/fachwissen/pv-am-gebaeude/photovoltaik-an-fassaden-165756>
- Baunetz Wissen (Hrsg.). (2024i). *Sanierung von Flachdächern*.
<https://www.baunetzwissen.de/altbau/fachwissen/dach-sanierung/sanierung-von-flachdaechern-3094789>
- Baunetz Wissen (Hrsg.). (2024j). *Schulbauten | Brandschutz | Sonderbauten*.
<https://www.baunetzwissen.de/brandschutz/fachwissen/sonderbauten/schulbauten-3154447>
- Baunetz Wissen (Hrsg.). (2024k). *Sonnenschutz: Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz*.
<https://www.baunetzwissen.de/glas/fachwissen/bauphysik/sonnenschutz-anforderungen-an-den-sommerlichen-waermeschutz-3971517>
- Baunetz Wissen (Hrsg.). (2024l). *Stroh*.
<https://www.baunetzwissen.de/daemmstoffe/fachwissen/daemmstoffe/stroh-782356>
- Baunetz Wissen. (2024m, 5. Mai). *Vorgehängte hinterlüftete Fassaden (VHF) | Fassade | Fassadenarten*. Baunetz Wissen.
<https://www.baunetzwissen.de/fassade/fachwissen/fassadenarten/vorgehaengt-e-hinterlueftete-fassaden-vhf-2341005>
- baupiloten (Hrsg.). (2024, 27. Mai). *Heinrich-Nordhoff-Gesamtschule, Wolfsburg • Baupiloten*. <https://www.baupiloten.com/de/projects/heinrich-nordhoff-gesamtschule>
- Bayerische Architektenkammer (Hrsg.). *Energiestandard*.
https://www.byak.de/data/Nachhaltigkeit_gestalten/BA_NG_Infobox_S-34ff_Energiestandard.pdf
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz. (2024). *Bezahlbar klimagerecht bauen: Kosten-Nutzen-Bewertung von Maßnahmen im Lebenszyklus*. Technische Universität München Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen; Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft; Lehrstuhl für Immobilienökonomie.
- Bayern / Staatsministerium für Unterricht, Kultus, Wissenschaft und Kunst. (1995). *Schulbau in Bayern: Beispiele für Schulbauten von 1978 bis 1995 ; Hinweise für Schulbauten und Ausstattung ab 1995* (1. Aufl.). Auer.
- BBSR. (2017a). *Gewichtung der Nachhaltigkeitskriterien*. Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) Systemvariante Unterrichtsgebäude.
- BBSR. (2017b). *Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)*.

- BBSR. (2024, 9. Mai). *eLCA*. <https://www.bauteileditor.de/>
- BBSR, & BMI (Hrsg.). (2020). *5 Jahre Bildungsgebäude im Effizienzhaus Plus-Standard: Erfahrungen aus der Begleitforschung* (Stand: November 2020). Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:101:1-2021021213481328286916>
- Beckel, I., Caldenby, C., Kähler, G., Kötz, R., Kohler, N., Krämer, S., Lederer, A., Oeklers, J., Pearman, H., Peter, M., Pieper, A., Seydel, O., & Wilson, A. (2004). *Schulen in Deutschland: Neubau und Revitalisierung*. Krämer.
- Berlo, K., Schaumburg, D., & Seifried, D. (2006). *Erfolgreiche energetische Gebäudesanierung an Schulen: Das Bürger-Contracting-Modell in "Solar&Spar"-Projekten in Nordrhein-Westfalen*, 128, pp. 205–209. https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/2453/file/2453_Berlo.pdf
- BKI. (2024). *BKI Baukosten Positionen Altbau 2024*. RM Rudolf Müller Medien GmbH & Co. KG.
- Blöbaum, A. *Kork und Baustroh als natürlich historische Dämmstoffe: Vor- und Nachteile von Kork und Baustroh in Wand- und Dachkonstruktionen*.
- BMI. (2017). *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) Systemvariante Unterrichtsgebäude: Ökologische Qualität. Treibhauspotenzial (GWP)*. https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/runder_tisch_-_workshops/bestand___komplettmassnahme/v_2017/BNB_UK2017_111.pdf
- BMI. (2019). *Leitfaden nachhaltiges Bauen*.
- BMUB. (2014). *Nachhaltige Unterrichtsgebäude: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen*. https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/publikationen/Broschuere_BNB-UN_barrierefrei.pdf
- BMUB. (2017a). *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB): Systemvariante Unterrichtsgebäude Komplettmodernisierung [Bilanzierungsregeln für die Erstellung von Ökobilanzen]*. https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/BNB_Steckbriefe_Unterricht/v_UK2017/BNB_UK_2017_LCA-Bilanzierungsregeln.pdf
- BMUB. (2017b). *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) Systemvariante Unterrichtsgebäude: Ökologische Qualität. Primärenergiebedarf*. https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/unterrichtsgebäude/bestand___komplettmassnahme/v_2017/BNB_UK2017_121.pdf
- BMVBS. (2013). *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) Systemvariante Unterrichtsgebäude: Ökologische Qualität. Wirkungen auf die globale und lokale Umwelt. Treibhauspotenzial (GWP)*. https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/unterrichtsgebäude/neubau/v_2013/BNB_UN2013_111.pdf

- BMWi. (2013, 8. Januar). *Begleitforschung Energieeffiziente Schulen: EnEff:Schule*. Fraunhofer-Institut für Bauphysik. <https://www.eneff-schule.de/>
- BMWSB. (2023). *ÖKOBAUDAT*. https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche/daten/db1.html#bereich1
- BMWSB. (2024a, 6. Juni). *Informationsportal: Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude*. <https://www.qng.info/>
- BMWSB. (2024b, 26. Juni). *BNB-Bewertungsmethodik: Methodik und Anwendung*. <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem/methodik-und-anwendung/>
- Botzler, S., Dotzler, C., & Kierdorf, D. (2017). *HoEff-CIM | Bericht Arbeitspaket 4: Ranking Sanierungsmaßnahmen*. Technische Universität München.
- Brand, S., & Salzgeber, J. (2023). KfW-Kommunalpanel 2023 - Kurzfassung: Die kommunale Ebene trotz den Krisen, muss sich aber auf neue Risiken einstellen. https://difu.de/sites/default/files/media_files/KfW-Kommunalpanel%202023%20Kurzfassung.pdf
- Bundesamt für Justiz. (2015). *KInvFG - Gesetz zur Förderung von Investitionen finanzschwacher Kommunen*. <https://www.gesetze-im-internet.de/kinvfg/BJNR097500015.html>
- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (Hrsg.). (2024, 30. Mai). *Bundesförderung Serielles Sanieren*. https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Serielles_Sanieren/serielles_sanieren_node.html
- Bundesanzeiger. (2020, 8. Oktober). *Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Nichtwohngebäudebestand*. <https://www.bundesanzeiger.de/pub/publication/dKSgHHFEsKCYusfZibw?1>
- Bundesministerium für Justiz (Hrsg.). (2020). *GEG Anlage 2: Technische Ausführung des Referenzgebäudes (Nichtwohngebäude)*. https://www.gesetze-im-internet.de/geg/anlage_2.html
- Bundesregierung (Hrsg.). (2024, 28. Juni). *Energieeffizienz - Unverzichtbar für das Gelingen der Energiewende*. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/energieeffizienz--1755970>
- Bundesstiftung Baukultur (Hrsg.). (2018). *Baukultur Bericht 2018/19: Erbe - Bestand - Zukunft*.
- BuVEG. (2023). *Entwurf eines Gesetzes zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Änderung des Energiedienstleistungsgesetzes*. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Stellungnahmen/Stellungnahmen-EnEfG-Verbaende/buveg.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- co2online. (2024, 12. Mai). *Perimeterdämmung: Definition, Material & Kosten*. <https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/daemmung/perimeterdaemmung/>

- dena. (10.2022). *Energetische Sanierung: Fakten statt Mythen* [Factsheet]. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. https://www.gebaeudeforum.de/fileadmin/gebaeudeforum/Downloads/Factsheet/Factsheet_Energiesparen_Sanierungsirrtuemer.pdf
- dena. (2023, 6. Juni). *Rathäuser, Schulen und Kitas – dena-Studie zeigt, welche Energieeinsparungen öffentliche Gebäude brauchen*. <https://www.dena.de/newsroom/meldungen/2023/nwg-studie-fit-fuer-2045/>
- Deutsche Umwelthilfe e.V. (Hrsg.). (2020). *Ökologisch und leistungsstark - Dämmen mit nachwachsenden Rohstoffen: Eine Broschüre für interessierte Praktiker*innen*.
- Deutscher Wetterdienst (Hrsg.). (2024, 28. Juni). *Gradtagzahl*. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=101066&lv2=100932>
- DGNB (Hrsg.). *Ökobilanz des Gebäudes*. https://www.dgnb.de/filestorages/Downloads_unprotected/dokumente/kriterien/dgnb-kriterium-env1-1-gebaeude-sanierung-version-2021.pdf
- DGNB. (2024, 26. Juni). *Über das DGNB System*. <https://www.dgnb.de/de/zertifizierung/das-wichtigste-zur-dgnb-zertifizierung/ueber-das-dgnb-system>
- Diedrich, A. (2018). *Energetische Sanierung von Bildungsstätten* [Dissertation, Shaker Verlag, Aachen]. Deutsche Nationalbibliothek.
- DIN 4108-10:2021-11 (2021). *DIN 4108-10: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe*.
- DIN e.V (2021a). *Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitung* (DIN EN ISO 14044:2021-02). Beuth Verlag.
- DIN e.V. (2021b). *Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen* (DIN EN ISO 14040:2021-02). Beuth Verlag.
- Djahanschah, S., Auer, T., & Nagler, F. (2017). *Zukunftsfähiger Schulbau: 12 Schulen im Vergleich*. DBU, Deutsche Bundesstiftung Umwelt: Bauband 2. Detail.
- Dürheimer, A., & Seyffert, T. (2009, 27. Mai). *Schulsanierung: mehr als Dämmung und neue Fenster!* https://www.detail.de/de_de/schulsanierung-mehr-als-daemmung-und-neue-fenster-1495
- Ebert, T., Eßig, N., & Hauser, G. (2010). *Zertifizierungssysteme für Gebäude: Nachhaltigkeit bewerten, Internationaler Systemvergleich, Zertifizierung und Ökonomie*. *Detail green books*. Institut für internationale Architektur-Dokumentation.
- Ecophon Saint-Gobain (Hrsg.). *Auswirkungen von Lärm im Bildungswesen: Ein Forschungsüberblick*. <https://www.ecophon.com/globalassets/media/pdf-and-documents/de/broschuren/2022/education-research-summary.pdf/>

- energiesprong.de (Hrsg.). (2023, 11. Mai). *Klassenziel: Klimaneutralität*.
<https://www.energiesprong.de/news-downloads/news/news-details/klassenziel-klimaneutralitaet/>
- Eißmann, F., Gänßmantel, J., & Geburtig, G. (2022). *Bauen im Bestand. Energieeffiziente Gebäudesanierung* (F. Eißmann, J. Gänßmantel, & G. Geburtig, Eds.). Fraunhofer IRB Verlag.
- FASBA e.V. (Hrsg.). (2024, 22. Juni). *Bauen mit Stroh*. <https://fasba.de/bauen-mit-stroh/warum-stroh/>
- Figl, H., Huemer-Kals, V., Kusche, O., Kerz, N., & Rössig, S. (2019). *Schriftenreihe Zukunft Bauen: Forschung für die Praxis: Band 09. ÖKOBAUDAT: Grundlage für die Gebäudeökobilanzierung* (T. Brockmann, Ed.). Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung.
- Fisch, N., Schulze, E., Gabriel, J., Mahler, B., Nusser, T., Fafflok, C., & Hegger, J. (2018). *Zukunft Bauen: Effizienzhaus Plus – Planungsempfehlungen. Forschung für die Praxis: Vol. 15*.
https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/zukunft-bauen-fp/2019/band-15-dl.pdf;jsessionid=B51F690433C027A0630E4B171327AE43.live11292?__blob=publicationFile&v=1
- Fouad, N. A. (Hrsg.). (2023). *Bauphysik-Kalender. Bauphysik-Kalender 2023: Schwerpunkt: Nachhaltigkeit* (1. Auflage). Ernst & Sohn.
- Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP. (2024, 1. Juni). *Ökobilanzierung*.
<https://www.ibp.fraunhofer.de/de/kompetenzen/ganzheitliche-bilanzierung/methoden-ganzheitliche-bilanzierung/oekobilanzierung.html>
- Freyer, M. (1998). *Das Schulhaus Entwicklungsetappen im Rahmen der Geschichte des Bauern- und Bürgerhauses sowie Schulhygiene* (G. Keil, & W. Nerdinger, Eds.). Wissenschaftsverlag Richard Rothe.
- Galinski, A., & Paul, N. (2015). Dämmen mit Baustroh: Option mit vielen Vor(ur)teilen. *Bundesbaublatt*.
https://www.fnr.de/fileadmin/fnr/Presse/Beleg_BBB_Strohtext.pdf
- Gebäudeforum Klimaneutral (Hrsg.). (2022). *Graue Energie und Emissionen*.
<https://www.gebaeudeforum.de/wissen/ressourcen-und-emissionen/graue-energie-und-emissionen/>
- Gertis, K., & Sedlbauer, K. (2010). Schulsanierung. *Bauphysik*, 32(2), 100–109.
<https://doi.org/10.1002/bapi.201010012>
- Giebeler, G., Fisch, R., Krause, H., Musso, F., Petzinka, K.-H., & Rudolphi, A. (2008). *Atlas Sanierung: Instandhaltung, Umbau, Ergänzung*. Birkhäuser.
- Gonzalo, R. (2009). Nachhaltige Sanierung von Schulbauten. *Detail*.
- Graefe, R. (2020). *Altbausanierung: Ratgeber für die Praxis - richtig planen und ausführen* (2., aktualisierte und erweiterte Auflage). Rudolf Müller.

- Green Vision Solutions (Hrsg.). (2023, 19. Dezember). *CO₂e: Die Bedeutung des CO₂-Äquivalents einfach erklärt*. <https://greenvisionsolutions.de/co2e-erklart/>
- Grewe, R. (2020). *Schulsanierung als Chance für flexible Unterrichtsformen*. <https://www.dabonline.de/2020/10/30/schulsanierung-als-chance-fuer-flexible-unterrichtsformen-sanierungsstau-umbau-corona/>
- Großmann, S., Langenhorst, T., & Thomalla, L. (03.2023). *Nachhaltiges Bauen und Sanieren in den Vorschriften und Vorgaben auf europäischer und nationaler Ebene: Studie*.
- Haselsteiner, E., Lorbek, M., Stosch, G., & Temel, R. (2010). *Handbuch Baustelle Schule: Ein Leitfaden zur ökologisch nachhaltigen Sanierung von Schulen*.
- Häusler, T., & Neupetsch, A. (2015). *Sanierung Max-Steenbeck-Gymnasium Cottbus: Schlussbericht*. zum BMWi-Projekt FKZ 0327430L.
- Hebel, E. von, Jahn, K., & Clausnitzer, K.-D. (November 2011). *Der energetische Sanierungsbedarf und der Neubaubedarf von Gebäuden der kommunalen und sozialen Infrastruktur: Abschlussbericht*.
- DENEFF. (2024, 12. April). *DENEFF zur EU-Gebäuderichtlinie: Bundesregierung muss schnell umsetzen* [Pressemitteilung]. <https://deneff.org/eu-gebaeuderichtlinie-april-2024/>
- Hollands, J. (2020). *Grüne Architektur im Schulbau: Leitfaden*. https://smartcities.at/wp-content/uploads/sites/3/20200401_GZS_Leitfaden-1.pdf (Grüne Schuloase im Neubau. Fokus Pflanzprozess und Bestandsgebäude).
- Holm, A. H., Mayer, C., & Sprengard, C. (2015). *Wirtschaftlichkeit von wärmedämmenden Maßnahmen: Studie, Article Bericht FO-2015/02*. https://www.kea-bw.de/fileadmin/user_upload/Kommunaler_Klimaschutz/Wissensportal/Bauen_und_Sanieren/FIW_GDI_wirtschaftlichkeit_daemmung_gdi_studie_2015_online.pdf
- Hörner, M., Cischinsky, H., Bischof, J., Schwarz, S., Behnisch, M., Meinel, G., Spars, G., & Busch, R. (2022). *Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude. Repräsentative Primärdatenerhebung zur statistisch validen Erfassung und Auswertung der Struktur und der energetischen Qualität des Nichtwohngebäudebestands in Deutschland.: ENOB:dataNWG*. Institut Wohnen und Umwelt GmbH. https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/2022_IWU_Hoerner-EtAl_ENOBdataNWG-Schlussbericht-Primaerdatenerhebung-Nichtwohngebaeude-Deutschland.pdf
- IEMB (Hrsg.). (2005). *Nachhaltiges Bauen für Ein- und Zweifamilienhäuser*. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/ministerien/bmvbs/kostenguenstig-qualitaetsbewusst-bauen/downloads/NachhaltigBauen.pdf?__blob=publicationFile&v=1

- IWU. (2024). *Energiebilanzen für Gebäude: Gradtagzahlen-Deutschland*.
<https://www.iwu.de/publikationen/fachinformationen/energiebilanzen/#c205>
- Jacob-Freitag, S. (2015). *Schlanke VIP*.
<https://www.dabonline.de/2015/08/01/schlanke-vip-daemmung-vakuumisolationspaneele-sanierung-waermedaemmung-nachhaltigkeit-energieeffizienz/>
- Kaiser, C., Niklasch, W., Schöpgens, H., Spritzendorfer, J., & Tuschinski, M. (2019). *Marktübersicht: Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen*.
https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Brosch_Daemmstoffe_2020_web.pdf
- Kalleja, H., & Flämig, D. (1999). *Plattenbausanierung*. Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-59962-0>
- Kalusche, W. U.-P. D.-I., & Deutschmann, M. (2017). Instandhaltung, Umbau und Erweiterung von Schulen. <https://www-docs.b-tu.de/fg-bauoekonomie/public/Forschung/Publicationen/Kalusche-Wolfdietrich/2017/schulen.pdf>
- Kreditanstalt für Wiederaufbau. (2022). *KfW Research: Mehr als 45 Mrd. EUR Investitionsrückstand in Schulen | KfW* [Pressemitteilung].
https://www.kfw.de/%C3%9Cber-die-KfW/Newsroom/Aktuelles/Pressemitteilungen-Details_725760.html
- KfW. (2024a, 12. Mai). *Kellerdeckendämmung*.
<https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestehende-Immobilie/Energieeffizient-sanieren/Kellerdeckend%C3%A4mmung/>
- KfW (Ed.). (2024b, 16. Juni). *Das Effizienzhaus: Maßstab für Energieeffizienz*.
<https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Neubau/Das-Effizienzhaus/>
- Klauß, S., Kirchhof, W., & Gissel, J. (2009). *Erfassung regionaltypischer Materialien im Gebäudebestand mit Bezug auf die Baualtersklasse und Ableitung typischer Bauteilaufbauten*. Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V.
<https://edocs.tib.eu/files/e01fn12/727842498.pdf>
- KMK. (2023). *Vorausberechnung der Zahlen der Schüler/-innen und Absolvierenden 2022 bis 2035*. Statistische Veröffentlichung der Kultusministerkonferenz.
https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/Statistik/Dokumentationen/Dok_237_Vorausberechnung_Schueler_Abs_2022_2035.pdf
- Krötsch, S., Stieglmeier, M., & Engel, T. (2024). *Holzbau im Bestand* (1. Auflage). *Detail Praxis*. Detail.
- Krüger, W. (2010). *Die Zukunft gibt es nur einmal! Plädoyer für mehr unternehmerische Nachhaltigkeit*. Springer Fachmedien.
<https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=749901>
- Landeshauptstadt München (Hrsg.). (2024, 28. Juni). *Förderprogramm Klimaneutrale Gebäude*. <https://stadt.muenchen.de/infos/foerderprogramm-klimaneutrale-gebäude.html>

- Lattke, F., Huß, W., Schröttle, R., & Seidel, A. (2023). Leitfaden Serielles Sanieren: Modernisierung mit vorgefertigten Elementen in Holztafelbauweise. https://informationsdienst-holz.de/fileadmin/Publikationen/3_Spezial/IDH-Serielles-Sanieren-2023-06_print150dpi_230912.pdf
- Lattke, F., Ott, S., & Winter, S. (2011). TES EnergyFacade: Innovative vorgefertigte Fassadenelemente aus Holz. *HOLZBAU*. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1081300/349985.pdf>
- Le, A. T. H., Park, K. S., Domingo, N., Rasheed, E., & Mithraratne, N. (2021). Sustainable refurbishment for school buildings: a literature review. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 39(1), 5–19. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-01-2018-0009>
- Lederer, A., & Pampe, B. (2011). *Vergleich ausgewählter Richtlinien zum Schulbau - Kurzfassung*. BDA Bund Deutscher Architekten. https://www.bda-bund.de/wp-content/uploads/2015/12/MUR_SBRI_web.pdf
- Leerstandskonferenz (Hrsg.). (2015). *Auslastung: Nicht genügend! Schulen und ihre ungenutzten, räumlichen Potenziale*. <https://leerstandskonferenz.at/konferenzen/auslastung-nicht-genuegend/>
- Loga, T., Stein, B., Diefenbach, N., & Born, R. (2015). *Deutsche Wohngebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden ; erarbeitet im Rahmen der EU-Projekte TABULA - "Typology approach for building stock energy assessment", EPISCOPE - "Energy performance indicator tracking schemes for the continuous optimisation of refurbishment processes in European housing stocks" (2., erw. Aufl.)*. IWU. https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/episcope/2015_IWU_LogäEtAl_Deutsche-Wohngeb%C3%A4udetypologie.pdf
- Lorbek, M. (2020). *Schulen weiterbauen: Strategische Entwicklung von Schulgebäudebeständen. Architekturen: Band 46*. transcript. <https://elibrary.utb.de/doi/book/10.5555/9783839442944>
- Maaz, K., Artelt, C., Brugger, P., Buchholz, S., Kühne, S., Leerhoff, H., Rauschenbach, T., Schrader, J., & verantwortliche Autoren. (2022). *Bildung in Deutschland 2022: Ein indikatorengestützter Bericht mit einer Analyse zum Bildungspersonal*. Leibniz-Institut für Bildungsforschung und Bildungsinformation; Konferenz der Kultusminister; Bundesministerium für Bildung und Forschung. <https://www.bildungsbericht.de/de/bildungsberichte-seit-2006/bildungsbericht-2022/pdf-dateien-2022/bildungsbericht-2022.pdf>
- maxit strohpanel (Hrsg.). (2024, June 21). *maxit Strohpanel: ökologisch bauen mit Stroh*. <https://www.maxit-strohpanel.de/>
- Meier-Dotzler, C. M. (2023). *Lebenszyklusbasierte ökologische Kennwertentwicklung von Gebäudekonstruktionen im Alt- und Neubau zur Anwendung in 3D-Stadtmodellen* [Dissertation, Technische Universität München, München]. K10plus.

- Montag Stiftung Jugend und Gesellschaft. (2023, 22. November). *Schule statt Leerstand* [Pressemitteilung]. https://www.montag-stiftungen.de/fileadmin/redaktion/Gruppe/PDFs/Presse/231122_SOS_Schulestatt_Leerstand_PM.pdf
- MSJG (Hrsg.). (2012). *Schulen planen und bauen: Grundlagen und Prozesse*. Jovis; Klett Kallmeyer.
- MSJG (Hrsg.). (2017). *Schulen planen und bauen 2.0: Grundlagen, Prozesse, Projekte*. Kallmeyer.
- Nagel, R., & Rukschcio, B. (Hrsg.). (2018). *Baukulturbericht: 2018/19. Baukultur Bericht 2018/19: Erbe - Bestand - Zukunft* (Stand: August 2018). Bundesstiftung Baukultur. <https://www.bundesstiftung-baukultur.de/fileadmin/files/medien/5723/downloads/baukulturbericht1819.pdf>
- Oehler, S. (2018). *Emissionsfreie Gebäude: Das Konzept der „Ganzheitlichen Sanierung“ für die Gebäude der Zukunft* (1. Auflage 2018). Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-16056-2>
- Österreicher, D. (2015). *Sanierung im Schulbau: Untersuchung von energieoptimierten Sanierungskonzepten in Verbindung mit neuen Raumanforderungen in bestehenden Schulbauten* [Dissertation]. Technische Universität Wien.
- Pehnt, M., Mellwig, P., Lambrecht, K., Winiewska, B., Oschatz, B., Mailach, B., Keimeyer, F., Braungardt, S., Köhler, B., & Kahl, H. (2023, 3. April). *Heizen mit 65 % erneuerbaren Energien - Begleitende Analyse zur Ausgestaltung der Regelung aus dem Koalitionsvertrag 2021*. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/heizen-mit-65-prozent-erneuerbaren-energien.pdf?__blob=publicationFile&v=8
- Reiß, J., Illner, M., Erhorn, H., Schakib-Ekbatan, K., Gruber, E., Winkler, M. H., & Jensch, W. (2017). *EnEff:Schule: Wissenschaftliche Begleitforschung zum Forschungsvorhaben "Energieeffiziente Schulen" : Abschlussbericht Phase 2 : gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. IBP-Bericht / Fraunhofer-Institut für Bauphysik WB: Vol. 201*. Fraunhofer IBP. <https://doi.org/10.2314/GBV:1010951262>
- Richarz, C., & Schulz, C. (2013). *Energy Efficiency Refurbishments: Principles, Details, Examples (Edition Detail Green Books)*. Detail Business Information.
- Scharke, J. (2023). *Nachhaltige Rückbau- und Entsorgungsplanung: Erarbeitung eines Rückbau- und Entsorgungskonzeptes im Bereich des Einzelhandels*. Springer Vieweg.
- Scharte, K. (2014). *Statistische Untersuchung einer Stichprobe von Schulbaudaten* (ISBN 978-3-934951-36-5). Ruhr-Universität Bochum, Bochum.
- Scharte, K. (2016). *Potenziale der energetischen Sanierung von Schulgebäuden* [Dissertation, LIT, Berlin, Münster]. Deutsche Nationalbibliothek.
- Scholz, S. (2023, 11. Dezember). Halberstadts „hässlichste Schule“ ist Vorreiter im Land. *Volksstimme.De*.

- <https://www.volksstimme.de/lokal/halberstadt/halberstadts-hasslichste-schule-ist-vorreiter-im-land-3747285>
- Schulbau Open Source (Hrsg.). (2024, 30. Mai). *Erschließung*. Montag Stiftung Jugend und Gesellschaft. <https://schulbauopensource.de/planungsthemen-von-a-z/erschliessung>
- Schwarz, S., Hartmann, A., Schorcht, M., Meinel, G., Behnisch, M., & Hecht, R. (2022). *Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude (ENOB: dataNWG): E.1.4.6 Teilbericht Begehungsunterlagen*. SSOAR, GESIS – Leibniz-Institut für Sozialwissenschaften e.V.; Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. <https://doi.org/10.26084/q2zt-kf61>
- Senatsverwaltung für Bildung, Jugend und Familie. (2023, 7. Juli). *Zwei Schulgebäude in Lichtenberg reaktiviert, grundsaniert und erweitert: Staatssekretär Dr. Torsten Kühne nahm an Eröffnungsfeier teil - Berlin.de* [Pressemitteilung]. <https://www.berlin.de/sen/bjf/service/presse/pressearchiv-2023/pressemitteilung.1343239.php>
- Sprengard, C., Treml, S., & Holm, A. H. (2014). *Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe: Metastudie Wärmedämmstoffe - Produkte - Anwendungen - Innovationen. Forschungsinitiative Zukunft Bau*. Fraunhofer IRB Verlag.
- Stahr, M. (Hrsg.). (2017). *Sanierung von Fassaden, Putzen, Fugen: Verfahren und rechtliche Aspekte*. Springer Vieweg.
- Stahr, M. (2019). *Sanierung von Baulichen Anlagen: Nachhaltig - Ökologisch - Umweltgerecht*. Springer Vieweg.
- Stahr, M., Dinse, H., Hensen, F., Radermacher, K.-P., Schulz, V., Weber, J., & Wild, U. (2022). *Bausanierung: Erkennen und Beheben von Bauschäden (7., vollständig überarbeitete Auflage)*. Springer Vieweg.
- Stahr, M., & Hinz, D. (2011). *Sanierung und Ausbau von Dächern: Grundlagen - Werkstoffe - Ausführung ; mit 93 Tabellen (1. Aufl.)*. Praxis. Vieweg + Teubner.
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2020, 22. Oktober). *Erdgas- und Stromdurchschnittspreise*. https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Erdgas-Strom-Durchschnittspreise/_inhalt.html
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2023). *Statistischer Bericht: Allgemeinbildende Schulen. Schuljahr 2022/2023*.
- Statistisches Bundesamt. (2023, 15. März). *Zahl der Schülerinnen und Schüler 2022/2023 um 1,9% gestiegen*. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/03/PD23_105_211.html
- Thiel, D., & Riedel, D. (2011). *Typisierte Bauteilaufbauten - Präzisierung der Pauschalwerte für Wärmedurchgangskoeffizienten aus der Bekanntmachung der Regeln der Datenaufnahme im Nichtwohngebäudebestand: [Endbericht]*. Forschungsinitiative Zukunft Bau: F 2793. Fraunhofer-IRB-Verl.

- Tuschinski, M. (2024). *Gebäudeenergiegesetz GEG 2024 - kompakt und praktisch: Novelliertes GebäudeEnergieGesetz anwenden*. https://www.geg-info.de/geg_praxishilfen/M._Tuschinski_GEG_2024_kompakt_und_praktisch.pdf
- ubakus.de*. (2024, 10. Mai). <https://www.ubakus.de/u-wert-rechner/index.php?>
- Wolff, S. (2024, 6. Juni). EZB-Zinssenkung: Sparzinsen sinken, Bauzinsen könnten sogar steigen. *Tagesschau.De*. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/zinsen-104.html>
- Zentralstelle für Normungsfragen und Wirtschaftlichkeit im Bauwesen (2002). *Modernisierung von Schulbauten der Baujahre 1860-1920: Beispiele und Planungshinweise*. https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/PresseUndAktuelles/2002/2002_ZNWB_Modernisierung-Schulbauten.pdf
- Zinner, M. (2014). *schulRAUMkultur: Wie Anstalten loslassen? Wie in Schulen heimkommen? Zeitschrift Ästhetische Bildung*. <http://zaeb.net/wordpress/wp-content/uploads/2020/12/78-312-1-PB.pdf>
- ZNWB (Hrsg.). (1999). *Typenschulbauten in den neuen Bundesländern: Modernisierungsleitfaden*. Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Grundschule „FreiherrSpiegel“, Halberstadt; (Scholz, 2023)	17
Abbildung 2-1: Vier Schritte einer Ökobilanzierung (eigene Darstellung gemäß DIN EN ISO 14040/ 44).....	32
Abbildung 2-2: Lebenszyklusphasen eines Gebäudes mit Angaben der berücksichtigten Phasen (eigene Darstellung nach DIN EN 15978:2012-10, DIN EN ISO 14040:2009-11).....	33
Abbildung 2-3: Übersicht Marktanteile Dämmstoffe im Jahr 2020; eigene Darstellung in Anlehnung an Fouad (2023)	36
Abbildung 2-4: Planungsprozess Serielle Sanierung, (Lattke et al., 2023)	40
Abbildung 2-5: Konstruktionsaufbau und Montage eines Fassadenelements; (Krötsch et al., 2024).....	41
Abbildung 4-1: Sanierungsvarianten Außenwand; eigene Darstellung	74
Abbildung 4-2: Übersicht der Flachdachkonstruktionen (eigene Darstellung).....	81
Abbildung 4-3: Phasen einer Ökobilanzierung mit Arbeitsschritten (eigene Darstellung nach DIN EN ISO 14044, 2009 und (Botzler et al., 2017)).....	89
Abbildung 5-1: Ergebnisdarstellung Sanierungsmaßnahmen; eigene Darstellung ...	104
Abbildung 5-2: Max-Steenbeck-Gymnasium Lageplan (links) und Grundriss EG (rechts) (PPS architekten, 2024)	107
Abbildung 5-3: Bestandsaufnahmen Max-Steenbeck-Gymnasium (Häusler & Neupetsch, 2015).....	108
Abbildung 5-4: Gegenüberstellung Bestand / Sanierungsmaßnahme (eigene Darstellung).....	109
Abbildung 5-5: Bewertung der Sanierungsvariante WDVS – konventionelle Dämmstoffe.....	110
Abbildung 5-6: Bewertung der Sanierungsvariante WDVS – ökologische Dämmstoffe.....	110
Abbildung 5-7: Bewertung der Sanierungsvariante hinterlüftete Vorhangfassade	111
Abbildung 5-8: Bewertung der Sanierungsvariante Serielle Sanierung	111
Abbildung 5-9: Bewertung der Sanierungsvariante Innendämmung (Auswahl)	111
Abbildung 5-10: Energetisches Einsparpotenzial der einzelnen Bauteile nach Baualterklasse mit zu erzielendem U-Wert nach GEG-Standard.....	113
Abbildung 5-11: Gegenüberstellung der Dämmstoffe am Beispiel zweier Sanierungsmaßnahmen des Typs 2A nach Effizienzhaus Plus - Referenz	114

Abbildung 5-12: Investitionskosten der Sanierungsmaßnahmen der Außenwand
Typ 2A nach Dämmstoffen und $U=0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 115

Abbildung 5-13: Amortisationszeit am Beispiel der Außenwandsanierung mit
WDVS der Gebäudetypen 2A und 3A..... 116

Abbildung 5-14: Wechselwirkungen von Energiepreissteigerung und
Amortisationszeit; eigene Darstellung in Anlehnung an (Holm et al., 2015) 117

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Baualtersklassen und baugeschichtliche Besonderheiten; eigene Darstellung nach (Scharte, 2016), (Lorbek, 2020) und (Klauß et al., 2009)	63
Tabelle 3-2: Übersicht der Schulgebäudetypologie	65
Tabelle 3-3: Ergebnisse der Literaturrecherche zu der Bauweise von Schulgebäuden	66
Tabelle 3-4: Zuordnung der U-Werte aus den Bekanntmachungen zu den Baualtersklassen.....	70
Tabelle 4-1: Gegenüberstellung bestehende und erzielte U-Werte	86
Tabelle 4-2: Systemgrenzen der ökologischen Betrachtung der Sanierungsmaßnahmen.....	89
Tabelle 4-3: Vergleichende Dämmmaterialien nach Einsatzbereich für die ökologische Betrachtung (eigene Darstellung)	91
Tabelle 4-4: Umweltwirkungen und Ressourceninanspruchnahme je Dämmmaterial (eigene Darstellung).....	94
Tabelle 5-1: Bauteilaufbauten Bestand nach (Reiß et al., 2017)	109

Anhang

Anhang I	Referenzprojekte
Anhang II	Bestandskonstruktionen
Anhang III	Wärme- und feuchtetechnische Kenndaten von Baustoffen
Anhang IV	Verwendete Datensätze – Ökobilanzierung
Anhang V	Ökologische Bewertung
Anhang VI	Energetische Bewertung
Anhang VII	Ökonomische Bewertung
Anhang VIII	Maßnahmenkatalog

Anhang I

Referenzprojekte Bestand

BAK Typ	Schule	Baujahr	Fassade	Fenster	Boden,gg.,ER	Dach / o.GD	Quellen	Anmerkung
1	A Mauerwerk Massiv	Grundschole an Haimhauserstraße, München	1897/98	Massiv Mauerwerk 80cm Vollziegel	Ursprüngl.: Kastenfenster, Holz fehw. Ersetzt durch Einfachfenster	unbewehrter Beton Fußbodenbelag: Linoleum (überall)	Alle Decken: Stahlverbundbauweise Satteldach	Zukunftsfähiger Schulbau Denkmalschutz
	MOSES Schule, Stuttgart (1. BA)	1936	Massiv Mauerwerk	Holz-Verbundfenster mit 2- fach Verglasung	KG-Decker, Stb.,, ungedämmt	Satteldach, Holzkonstruktion Oberste Geschossdecke: Stahlbeton ohne Dämmung	Annex 36/ Eneff. Schule	typische Schule Westdeutschland
	Dorfgrund- Mengenle,	1922	massives Ziegelstein- mauerwerk, verputzt	-	-	Holzpfettendach mit Pfannen; Massivdecke	Weiterverwendung bestehender	
	Adolf-von-Dalberg- Schule, Fulda	1733	massives Mauerwerk, verputzt	-	-	Walmdach mit Biberschwanz Holzbalkendecke	Weiterverwendung bestehender	
	David Hansemann- Schule, Aachen	1900	massives Mauerwerk, verputzt	Holzfenster mit Einfachverglasung	-	Holztafelstuhl mit Dachziegel; Massivdecke	Weiterverwendung bestehender	Denkmalschutz
	Friedrich-Fröbel- Schule, Olbersdorf	1927/28	massives Mauerwerk 48cm, verputzt ungedämmt	Kastenfenster mit umlaufenden Befangewände, Einfach-/ Teilweise Zweifach- verglasung	-	Satteldach ausgebauter Dachraum Spitzboden ungenutzt; Ziegeldecke	Eneff. Schule	Denkmalschutz
	Montessori Schule, Berlin-Pankow	1899-1901	Backstein; Massiv mit Klinkerschicht- Mauerwerk mit Zierelementen	Kunststofffenster; Holzkaste-/ Einfachfenster	zum Teil mit HWL gedämmte Bereiche	Steldach Mansarddach, nicht gedämmt	Eneff. Schule	Denkmalschutz
	B							
	Beton Skulpt	Festie Openuchtsschool Amsterdam	1927-30	Weiß gestrichelter Beton	schmale Fensterrahmen, Einfachverglasung	Stahlbeton	Flachdach	Zukunftsfähiger Schulbau DM-Schutz seit 1985 sehr große Fensterflächen ohne Sturz
		Schule am Palmengarten, Leipzig	1928/29	Mauerwerk/ Beton	-	-	Steldach	Online Vertreter des 'Neuen Bauens' Leipziger Schultyp'
		Julius-Ambrosius- Hülbe Gymnasium, Dresden	1929	Mauerwerk/ Beton	-	-	Flachdach	Online Hochbauamt Dresden
2	A Massiv Mauerwerk	Berufsschule Dehm	1954-1962	tragende Elemente: 38,6cm MW-Wände Hüllflächen o. WD	-	-	Walmdach (nicht ausgebaut) Stahlbeton 20cm	Eneff. Schule
		Käthe-Kollwitz- Schule, Aachen (1./2. BA)	1951/55	Mauerwerk 36,5cm außen sichtbar, innen verputzt teilweise nur 14cm (Heiznischen) 1400m²	von 1951, einfach Verglasung massive, undichte Rahmen 3100m², 67% der Fassadenfläche	Kellerdecke ungedämmt KD Decke 3150m²	Satteldach DG nicht ausgebaut Dach ungedämmt DG Decke 3150m²	Eneff. Schule/ Annex36
		Gymnasium Markt Obersdorf (1. BA)	1962	Vollziegelmauerwerk, verputzt	Holzfenster, zweifach Verglasung	Stahlbeton 20cm	Steldach, oberste Geschossdecke Stahlbeton 20cm	Eneff. Schule

B	Stahlbeton-Skelettbau	Umland Schule, Stuttgart	1954	Brüstungselemente; Beton Giebel; Mauerwerk	teilweise Einscheibenverglasung	Stahlbeton, Estrich, 4cm Polystyrol	Pulldach Decke: Stahlbeton Massiv	EnEff: Schule	
		MOSES Schule, Stuttgart (2. BA)	1957	Stahlbeton + vorgehängte Ziegel	Holz-Verbundfenster mit 2-fach Verglasung	KG Decke; Stb., ungedämmt	Satteldach, Holzkonstruktion Oberste Geschossdecke: Stahlbeton ohne Dämmung	Annex 36	typische Schule Westdeutschland
		Schulanlage Wandermatte (Schweiz)	1955/56	schlanke Stahlbetonsäulen Giebelseite: Mauerwerk, verputzt Brüstung: reliefartige Fertigbetonteile	Deckenhöhe Fensterbänder; Verbundfenster	Fußbodenbelag; Fliesen	Satteldach, Holzkonstruktion	Zukunftsfähiger Schulbau	
		Brüder-Grimm-Schule, Hannover	Anfang 1960er Jahre	Fliesenfassade	größtflächige Fenster	-	Flachdach	Baunetz Wissen Broschüre ü. Schule	
O	Massiv Mauerwerk	Haupt-/Realschule, Rostock	1961	Mauerwerk, verputzt	Verbundfenster	Stahlbetonfertigteile mit Füllkörpern	Satteldach, Konstruktion aus Stahlbetonsparren Stahlbetonfertigteile mit Füllkörpern	Typenschulbauten DDR	
		Herderschule, Kassel	1959	Mauerwerk, verputzt	-	-	Flachdach	Weiterverwendung bestehender	Pavillonbau
		Gymnasium Rostock	1960/61	Mauerwerk, verputzt	-	Stahlbetondecken	Steldach, Betonsparren, oberste Geschossdecke ungedämmt	EnEff: Schule	
3 B		Schul- & Sportzentrum, Lohr	1970	Stahlbeton 25cm + Corfen-Stahl-Verkleidung kaum/geringe Dämmung	nahezu durchgehendes Fensterband	-	Flachdach mit bauzeitl. WD undicht, Lichtkuppeln, Glasdächer	EnEff: Schule	
	Stahlbeton-Skelettbauweise	Gymnasium Boesweiler	1970-78	Vorhangsfassade; Betonfertigelemente (teilweise im inneren)	klar gegliederte, großzügige Fenster	Stahlbeton	Flachdach, Stahlbeton Warmdach	Zukunftsfähiger Schulbau	
		Mittelschule Buchloe	1974-76	Giebel + Brüstung; Stahlbetonfertigteile	größtformatige Fenster	Decken: Stahlbeton	Flachdach, bekies Oberlichter	Zukunftsfähiger Schulbau	
		Gymnasium Sonthofen	1973/74	Giebel + Brüstung; Stahlbetonfertigteile	Stahl-Glas-Fensterelemente	Rippenplatten	Flachdach, Kiespressdach, mit bituminöser wasserführender	Zukunftsfähiger Schulbau	Kasseler Schulmodell stb. Skelettbau
		Käthe-Kollwitz-Schule, Aachen (3. BA)	1978	Mauerwerk 36,5cm außen sichtbar, innen verputzt teilweise nur 14cm (Heiznischen) 1400m²	von 1951, einfach Verglasung morsche, undichte Rahmen 3100m²	Kellerdecke ungedämmt KD Decke 3150m²	Satteldach DG nicht ausgebaut Dach ungedämmt D.G.Decke, 3150m²	EnEff: Schule/Annex36	
		Schulzentrum Langelsheim	1974	2-fellig; EG: 2-schalig Mauerwerk OG: Bandfassade Blechverkleidung hinterlüftet	Alu-Rahmen mit Isolierverglasung	-	Flachdach Warmdach mit Kiesschüttung ca. 8cm Dämmung	DBU Abschlussbericht	
		MOSES Schule, Stuttgart (3. BA)	1970	Stahlbeton; mitt. Dämmung + vorgehängte Ebene	Holz-Verbundfenster mit 2-fach Verglasung	KG Decke; Stb., ungedämmt	Stahlbeton, Rippendecke	Annex 36	typische Schule Westdeutschland
		Polytechn. Schule, Schwamstadt (Österreich)	1973	fregende Stb.-Stützen 5m-Raster, ragen 40cm aus Fassade zw. Stützen: Fassaden-elemente aus Waschbetonfertigteilen mit Innenämmung auf Konsolen (Fensteranzug + ...-Brüstung)	durchgehendes Band hinter Stb. Stützen	-	Flachdach (undicht)	EnEff: Schule	

O	Max-Steenbeck-Gymnasium, Cottbus	1974	Fertigbau-eile Brüstung; nichttragend, 14cm Beton mit 5cm innenliegender HWL	Holzverbundfenster (2-fach Verglasung)	geringe Dämmung Beoton	Stahlbetonkassettendecke 5cm Wärmedämmung	EnEff: Schule	
	Stahlbeton/Friedrich-Ebert-Schule, Erfurt	1974	Plattenbauweise 3-schicht Platten mit Betonwitterschale, Dämmung + tragende Betonschale Verbög.; asbesthaltige	Holzrahmenfenster mit Isolierverglasung	-	-	EnEff: Schule	
	Bertold-Brecht-Schule, Dresden	1967	Längswände: vorgestell., Mehrschichtplatte Giebelwände: geschoßhohe	Holzverbundfenster	Stahlbetonhohlraumdecke	Flachdach, Warmdach, Außenentwässerung	EnEff: Schule / Annex36 Typenschulbauten DDR	Stahlbeton- Montagebauweise mit tragenden Querwänden
	Paul-Robeson-Schule, Leipzig	1969	Plattenbau Leichtbeton	Holzrahmenfenster, doppelverglast 60% Richtung Süden	Kellerdecke ungedämmt	Flachdach (Beton)	EnEff: Schule / Annex36	
	Kooperationsschule Friessack	1978	Kellerwände: Schwerbeton Giebel- und Brüstungselemente: konstruktiver Leichtbeton	Holzverbundfenster	vorgespannte Stahlbetondecke	Warmdach, Außenentwässerung	Typenschulbauten DDR	
	Grund- / Realschule Demmin	1975	Kellerwände: Schwerbeton Giebel- und Brüstungselemente: konstruktiver Leichtbeton (flw.)	Holzverbundfenster	vorgespannte Stahlbetondecke	Warmdach, Außenentwässerung	Typenschulbauten DDR	
	Realschule Niepars	1973	Giebel- und Brüstungswände: Leichtbeton mit innenliegender	Holzverbundfenster	Stahlbetontüfteldecke	Kaltdach mit Innenentwässerung	Typenschulbauten DDR	
	Weitere Typenschulen siehe Typenschulbauten DDR (ZINWB)							
4 A	Mauerwerk							
B	Stahlbeton							
O	Großtafelbau							
	Allgemeine Beschreibung siehe Typenschulbauten DDR							

Typenschulbauten in den neuen Ländern (ZNWB)

Ref.	Baujahr	Bautyp	Bauweise	Gebäudecharakteristik	Fassade	Außenfenster	Dach	Decken	BGF [m²]	Region	Anmerkungen
2 O	50er Jahre 1953-1963	SVB	traditionell: Ziegel/ Ziegelgroßblock Geschosshöhe: 3,5m	Mauerwerksbauten, U-förmig, einhöflich, 2-3 geschossig	Mauerwerksbau, verputzt	Verbundfenster	Dachkonstruktionen aus Stabrostbalken, Holzlattung, Betondecksteine; ziegelgedecktes Stieltdach	Stahlbetondeckplatte mit Füllkörpern	4961		erste typisierte Schulbauten der DDR; baulich problemlos zu realisieren
3 O	60er / 70er Jahre	Atrium Schuster Gang	Stahlbeton - Montagebauweise (überwiegend)	Querwandbauweise: Deckenelemente liegen auf Querswänden auf & gesteigerten Außenwänden ohne Fenstersturz -> größtmögl. Fensterfläche							parallel zur Industrialisierung -> Typisierung im Schulbau Geschichte des Schulbaus in DDR verbunden mit technolog. Entwicklung der Fertigbauweise + Serienproduktion von typ. Gebäuden
		Atriumtyp	Montagebauweise mit tragenden Querswänden Rastermaße: 3,6 / 7,2m Geschosshöhe: 3,3m	2-3 geschossige Gebäuderiegel zweiseitige Belichtung/ Belüftung Innenhöfe durch Verbindbauten Atrien: energet. Gewinne durch Überdachung	Giebelwände: Leichtbeton Brüstungsplatten: Sandwichebauweise mit innenliegender Dämmung Längswände: einschichtige, nichttragende Brüstungselemente aus Leichtbeton (Stärke: 23cm; Länge: 3,6m; mit 1. Deckenelement verankert) Giebelwände: geschobhohe Elemente aus konstruktiver	Holzverbundfenster	Pultdach; Warmdach mit Geschossdeckenelementen und Außenentwässerung	Stahlbetondeckplatte	4722	Sachsen-Anhalt	erste Atriumschulen: 4 Innenhöfe 1963 - 80er: Schulen mit 2 Innenhöfen Atrien = Grünflächen (Pausenfläche)
1964-1967	Erfurt	Atrium	"	2 Gebäuderiegel, 3 Verbödg.bauten 2 Innenhöfe 3-geschossig, voll unterkellert		Holzverbundfenster	flaches Warmdach aus Geschossdeckenelementen mit 15% Neigung & Außenentwässerung	Stahlbetondeckplatte in schleift bewehrt, 24cm	3902	Thüringen	erste Atriumschule
1964-1967	Potsdam	Atrium	"	2 Gebäuderiegel, 3 Verbödg.bauten 2 Innenhöfe 3-geschossig, nicht unterkellert		"	"	"	"	Brandenburg	einläufige Treppe in Verbindung
1963-1981	Dresden	Atrium	"	2 Gebäuderiegel, 3 Verbödg.bauten 3-geschossig, 2 Innenhöfe nach 1969 voll unterkellert	Längswände: vorgestell, selbsttragende Mehrschichtplatten auf Randbalken Giebelwände: konstruktiver Leichtbeton	"	"	Stahlbetondeckplatte	4340	Sachsen	
1970-1980	Magdeburg	Atrium	"	2 Gebäuderiegel, 2 Verbödg.bauten, 4 geschossig voll unterkellert	Giebelwände: konstruktiver Leichtbeton Brüstungsplatten: Mehrschichtelemente	"	Warmdach aus Geschoss- deckenelementen mit 2,5% Neigung & Außenentwässerung	"	4922	Sachsen-Anhalt	Erschließung nach Schusterprinzip 2 Eingänge, 4 TH, versch. Verbindungsgänge
1967-1989	Schwerin	Atrium	"	2 Gebäuderiegel, 4 geschossig 2 Verbödg.bauten, 3 geschossig, einhöflich	Längs: Gassilikatbeton selbsttragend Giebel: zweischalig, Stahlbeton & Gassilikatbeton	"	Warmdach aus Geschoss- deckenelementen & Gesimsfertigteilen mit Außenentwässerung	Stahlbetondecke d=24cm	4575		Erschließung über 4 TH in Gebäuderiegeh

4 O	Mitte 80er Jahre	Schulbaureihe 80	Stb.-Montagekonstruktion in Großtafelbauweise mit geschobenen Wänden, deckentragenden Außenwänden in Längs- /	Sporthalle als getrennter Baukörper (außer bei Typ Dresden) zweizügige Schulen einseitige Belichtung/ Belüftung															Umsetzung neues Raumprogramm: Großtafelbauw. tragende Ober-/ Längswände Außenwand: tragende raumhohe Fensterelemente -> minimale Schaftbreite + Sturzhöhen nur 3% des Bestandes -> baul. Zustand relativ gut
	1983-1990	SR 80 Efurt	" Großtafelbauweise Gh: 3,3m	1x3-geschossiger Baukörper & 1x4-geschossiger Baukörper mit 2-geschossigem Verbindungsbau, voll unterkellert	Dreischichtelemente, Gesamtdicke = 30cm, Vollwandplatten im Kellergeschoss		Flachdach mit Innenwässer, k.A.		Berlin Brandenburg 4940 Sachsen-Anhalt										
	1985-1990	SR 80 Dresden	"	2x3-geschossiger Baukörper mit 2-geschossigem Verbindungsbau, voll unterkellert (Sockelgeschoss)	"		"		Berlin, Meckl.-Vorpem. 4613 Sachsen										
	1985-1990	SR 80 Leipzig	kombinierte Großtafel-Skelettbauweise	1x3-geschossiger Baukörper & 1x4-geschossiger Baukörper mit 2-geschossigem Verbindungsbau, voll unterkellert	"		"		4424 Berlin, Sachsen										
	1983-1990	Berlin 81 GT	Großtafelbauweise im EG z.T. monolith. Rahmenkonstruktion	ein 4-geschossiger Riegel Länge: 54m, Breite: 18m	Dreischichtelemente mit 60mm WD, Fensterelemente mit rahnenförmiger Tragschicht		Warmdachkonstruktion Abschluss mit Driempfelement	vorgespannte Hohlraumdecke 240mm Vollbetondecke 140mm	4037 Berlin										

Referenzprojekte Sanierung

BAK Typ	Schule	Fassade	Fenster	Boden,gg,ER	Dach / o.GD	Quellen	Anmerkung
1	Grundschule an der Heimhauserstraße, München	keine WD nötig aufgrund der massiven Außenwandkonstruktion Kosten-Nutzen-Verhältnis Innenabdichtung unwirtschaftlich	Aufarbeiten der Originalfenster Teilweise ersetzt zusätzliches inneres Brandschutz-Fenster	Fußbodenbelag: Linoleum	-	Zukunftsfähiger Schulbau	Denkmalschutz
	EROS Schule, Stuttgart (1. BA)	WDVS 14 cm EPS Bei Erhalt der Fassade: Innenabdichtung EPS	Holz-Alu, PVC Wärmeschutzverglasung Unterschied Nord- / Süd-Fassade	-	18cm EPS	Annex 36	Typische Schule Westdeutschland
	Montessori Schule, Beiflin-Pankow	Innendämmsystem: 30-35mm Vakuum-Isolations-Paneel + System aus mineral. Dämmplatten (+ konstruktive Sanierung des Sichtmauerwerks von außen)	Holzfenster ähnlich Verbundfenster (2 Ebenen) mit Isolierverglasung	-	Mineralwolle-Dämmsystem (komplette Erneuerung)	EnEff: Schule	Denkmalschutz Maßnahmen zur energet. Sanierung eines denkmalgeschützten Schulgebäudes entwickelt
B	MOSES-Schule, Stuttgart (1. BA)	DM-geschützt: Styrofoam innenseitig Rest: WDVS - 14cm Styrofoam	Holz-Alu | Kunststoff Wärmeschutzverglasung	-	18cm Styrofoam	EnEff: Schule/ Annex36	Sanierung nach mind. Standardanforderungen von 1995; typisches Gebäude West
	Käthe-Kollwitz-Schule, Aachen (1. BA)	WDVS aus Polystyrolschaum 14 cm Erfüllt ursprüngl. Fassade: (Turnhalle) innenseitig 4-10cm Polystyrol-Hartschaumplatten KG Wände beheizter Keller: innen gedämmt	Holz-Alu mit Wärmeschutzverglasung	-	oGD: 20cm Cellulose-Füllung Einblas Dach: 18cm Polystyrol Hartschaum-Platten	EnEff: Schule/ Annex36	
	Friedrich-Fröbel-Schule, Olbersdorf	7cm Polystyrol-Dämmplatten (WLG 032) außenseitig	Kastenfenster mit Sonnenschutz + WD zw. Rahmen	Boden im UG: 10cm Beton, 2cm Vakuumdämmpaneele, 4cm Estrich Bodenplatte: 10cm XPS,	5cm Estrich, 15cm Mineralwolle, 2cm OSB-Platte (auf o.GD)	EnEff: Schule	Denkmalschutz 3 Liter-Haus-Schule NICHT erreicht
	Erste Openluchtschool Amsterdam	nahezu gänzlich verzichtet auf WD	Weiterverwendung Bestandsfenster (Nachbau nicht möglich) Ersatz Flach- durch Flach-	Plattenbalkendecke 12,5cm	-	Zukunftsfähiger Schulbau	DM-Schutz seit 1985 sehr große Fensterflächen ohne Stb. Gerüst in gutem Zustand
	Schule am Palmengarten, Leipzig Julius-Ambrosius-Hilfse Gymnasium, Dresden	WDVS mit Glattputz (Beton skelet + Charakter erhalten)	Denkmalgerechte Erneuerung Holzfenster	-	-	Online Hochbauamt Dresden	Vertreter des 'Neuen Bauens' 'Leipziger Schultyp' Annäherung Bauhausstil

2	A	Berufsschule Detmold	vorgefertigte Holztafellement (auf Bestand Ziegel-MW montiert) 2cm Kokosfaserdämmplatte 36cm Stiegräger + eingeblaste Zellulosedämmung 3,5cm Putzträger + 3,5cm Leichtputz	Holz-Alu Passivhausfenster	unverändert; Rand: Dämmuschürzen	oGD: 1cm OSB-Platte, vorgefertigte Holztafellem. + 36 cm Einblasdämmung Zellulose (auf besteh. Betondecke 25cm) k.A.	EnEff: Schule	Vorgefertigte Sanierung -> Altbaufassade vollständig im laufenden Betrieb in kurzen Bauzeiten energet. saniert Plus-Energie-Schule
		Friedrich-Wilhelm-Gymnasium, Köln	Generalsanierung Wiederherstellung der Fassade Außendämmung	k.A.	k.A.	k.A.	Online HPI Himmen	Denkmalschutz
		Käthe-Kollwitz-Schule, Aachen (2. BA)	WDVS aus Polystyrolschaum 14 cm KG Wände beheizter Keller: innen gedämmt	Holz-Alu mit Wärmeschutzverglasung	-	Dach: 18cm Polystyrol Hartschaum-Platten	EnEff: Schule/ Annex36	
		Gymnasium Markt Obersdorf (1. BA)	WDVS: 25cm EPS, (KG Wände auch) 2cm Kalkputz (Bestand: 36,5 Vollziegel-MW, gedämmt)	Holz, 2-Scheiben Wärmeschutzverglasung	keine Veränderung (5cm Estrich, 4cm Polystyrol, 20cm Stb.)	Dach: 2cm Putz, 3cm HWL-Platte, 12cm Holzschalung.	EnEff: Schule	Beispiel Sanierung Typenschule West
	B	Umland Schule, Stuttgart	Giebel: 9cm Vakuumsandwich-Elem. AW: WDVS 30cm EPS- Wärmedämmung EG Süd + Brüstung: 20cm Mineralwolle	Alu-Passivhausfenster 3-Scheiben Wärmeschutzverglasung	BgE EG: 3cm Vakuumdämmpaneelle DG KG (unbeheizt): 14cm Mineralwolle,	26cm EPS (Polystyrolpartikelschaum) auf Bestandsdach	EnEff: Schule	Plus-Energie-Schule WD umschließt Stb.-Stützen
		EROS Schule, Stuttgart (2. BA)	WDVS 14 cm EPS Bei Erhalt der Fassade: Innendämmung EPS	Holz-Alu, PVC Wärmeschutzverglasung Unterschied Nord-/Südfassade	-	18cm EPS	Annex 36	Typische Schule Westdeutschland
		Schulanlage Wandermatte (Schweiz)	bis auf Souferain: Verzicht auf weitere Dämmmaßnahmen	Erfüchtigung der Fenster 2-fach Isolierverglasung	-	Komplettenerneuerung Dacheindeckung Satteldach	Zukunftsfähiger Schulbau	
		Brüder-Grimm-Schule, Hannover	Fliessenfassade entfernt WDVS: 20cm Polystyrol	Holz-Alu-Fenster therm. Getrennte Stahl-Glas-Konstr.	Kellerdecke: 10cm	30cm Dämmung EPS	Baunetz Wissen Broschüre ü. Schule	Typisch zeitgenössischer Stil (mehrere 1-2 geschos. Flachbauten um 2 Innenhöfe)
	O	Haupt-/ Realschule, Rostock	WDVS: 8cm Mineralwolle Dämmplatten EG mit Verbleibender Schutz	Kunststofffenster (gedämmt)	PVC Beläge entfernt. Linoleum mit Trittschallschutz	Bestand erhalten neue Dachlatten + Fugenmörtel	Typenschulbauten DDR	
		Gymnasium Rostock	Vorgefertigte Module auf Bestand (Ziegel-MW 36,5cm, verputzt) Holzänderkonstruktion + 24 cm Mineralwolle, Holzschalung auf Unterkonstr.	Holz-Alu mit 3-fach Wärmeschutzverglasung	4,5cm Zementestrich 0,4cm Trittschalldämmung 2cm Vakuumdämmplatte 0,4cm Trittschalldämmung (21cm Bestandsbetondecke)	Satteldach zu Flachdach; gefälledämmung, Holzfaserplatte, 32cm Mineralwolle zw. Holzbalken, (auf 29cm Bestand Stb.)	EnEff: Schule	Plus-Energie-Schule

3 B	Schul- & Sportzentrum, Lohr	Mineralwolle 20cm rostfreie Blechverkleidung hinterlüftet	Holz-Alu 3-fach WSV	4cm Sockelnachdämmung (23cm Beton BP, 6cm Kellerdecke + Bodenplatte neue Dämmschicht	20cm PIR (Polyisocyanurat-Hartschaum) 36cm Mineralwolle	EnEff: Schule	Plus-Energie-Schule
	Gymnasium Boesweiler	30cm Mineralwolle, hinterlüftete (2cm), vorgehängte Fassade	3-fach verglaste Kunststoff-Fenster mit Aluschale	neue Fußbodenbelag: Teppich, Linoleum	neue Wärmedämmung: Kiesdach	Zukunftsfähiger Schulbau	Passivhausstandard starke Veränderung der äußeren Hülle
	Mittelschule Buchloe	Vorgefertigte Holzkonstruktion, 30cm Dämmung; Holzfassade	Holz-Aluminium-Fenster 3-fach WSV	-	Rollnathgeschweißtes Edelstahldach	Zukunftsfähiger Schulbau	Passivhausstandard
	Gymnasium Sonthofen	Bestand Stb. Skelett in Fertigteilbauw. Vorgefertigte Bauteile; 20cm Zellulose, hinterlüftete Holzfassade	Holz-Aluminium-Verbundfenster	-	-	Zukunftsfähiger Schulbau	Modellprojekt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
	Käthe-Kollwitz-Schule, Aachen (3. BA)	WDVS aus Polystyrolschaum 12cm teilw. Elementfassadendämmung aus Mineralwolle 12cm	Holz-Alu mit Wärmeschutzverglasung	-	PS-Dämmstoffkeile zw. Rippen	EnEff: Schule/ Annex36	
	Schulzentrum Langelsheim	MW: WDVS Blech/ Sandwich-Fassade; vorgefertigtes Holzfassadensystem in Pfosten-Riegel	2-fach Sonnenschutzverglasung (Lichttransmission 66%, g-wert 33%, außenliegender	-	-	DBU Abschlussbericht	
	EROS Schule, Stuttgart (3. BA)	WDVS 14 cm EPS Bei Erhalt der Fassade: Innendämmung EPS	Holz-Alu, PVC Wärmeschutzverglasung Unterschied Nord- /	-	18cm EPS	Annex 36	typische Schule Westdeutschland
	Hauptschule Bezau; Allgemeine Sonderschule Linz; Volksschule Mähndle (Österreich)	vorgefertigte Holz-Leichtbauelemente Dämmstoffe aus NaWaRo	-	-	-	Dissertation Doits Österreicher	
	Politechn. Schule, Schwandenstadt (Österreich)	vorgefertigte Holzrahmen-Elemente 58cm, mit Zellulose Dämmung (Einpass) (Hinterlüftung nicht notwendig) PV-Anlage in Fassade integriert	Passivhaus-Fenster 3-Scheiben WSV Kunststoffabstandhalter	Schaumglasschotter (Einblasverf.) (ursprüngl. Geplant: Vakuumdämm-	Warmdachaufbau aus Holzriegel-Fertigteilen mit 40cm Zellulosedämm. (flach, mit	EnEff: Schule	Passivhaus-Leichtfassadenkonstruktion ökol. San. mit nachwachs. Rohstoffen (trotz Volumen ökol. Vertretbar)
O	Typenschule Schützendorf	Mineralfaser + hinterlüftete Vordachfassade aus Stahlgerüst mit geflochtenem Weidenrut	Holz-Alu				Erstmals als Außenfassade
	Max-Steinbeck-Gymnasium, Cottbus	WDVS: 26cm	Kunststoff / Holz mit 3-fach Verglasung	12cm Dämmung; 2cm Dämmschürze auf Höhe Bodenplatte	Bitumendachbahnen 30cm Hartschaum (Bestand Stb.kassettendecke)	EnEff: Schule	3-Liter-Schule Baukörper: Passivhaus-Standard (außer Bodenplatte)
	Friedrich-Eberf-Schule, Erfurt	WDVS: 10cm mineral. Dämmung + mineral. Putz (Verbdg: Leichtbau-Sandwichplatten)	Holz-Alu mit WSV Süden: integ. Sonnenschutzlamellen	KG Decke: 8cm Perimeterdämm. KG Boden:	Dach: 10cm EPS-Dämmung	EnEff: Schule	

Berthold-Brecht-Schule, Dresden	WDVS: 12cm Styrofoam + 3cm min. Putz Fensterstühle: 8cm Sockeldämmplatten	Holzfenster mit WSV Süden: Jalousien	KG Decke + Wände: 8cm Dämmung	Dach + DG Decke: 15cm Polystyrolschaum + PE Folie (Dachaufbau Bestand entfernt)	EnEff: Schule / Annex36 Typenschulbauten DDR	Modellprojekt für energet. Sanierung des Gebäudetyps Dresden Atrium
Paul-Robeson-Schule, Leipzig	WDVS: 8cm Mineralfaserplatten + mineral. Putz (Bestand; Leichtbeton) Süden Vorhangfassade: 8cm transparentes WD-System (PMMA) in Holzständer	Holz-Alu mit WSV bewegl. Verschattungssysteme (Reduzierung Überhitzung)	KG Decke: Polystyrol-Schaum	Dach + DG Decke: Polystyrolschaum Stärke??	EnEff: Schule / Annex36	Sanierungsbeispiel 'Chemnitz' ca. 400 Schulbauten
Haupt- / Realschule Plau	WDVS: 8cm MW Erbereich: Perimeterdämmung	Holzfenster mit WSV	-	Neue Attikakonstruktion 1,5cm Wärmedämmung	Typenschulbauten DDR	
Kooperationschule Fressack	WDVS: 12cm	PVC Fenster Sonnenschutz: äußere Leichtmetall- Lamellen	-	Neues Dach mit 2,5% Gefälle auf altem Dachaufbau	Typenschulbauten DDR	
Grund- / Realschule Demmin	Vorgehängte Fassade, hinterlüftet mit zusätzl. WD	Aluminiumfenster Vergrößerung der Glasfläche	-	Erneuerung Dachbezüge + WD	Typenschulbauten DDR	
Realschule Nleparis	hinterlüftete Vorhangfassade mit WD Brüstungsplatten: konstruktiv gesichert	PVC Fenster	-	zusätzliche WD der obersten	Typenschulbauten DDR	
Weitere Typenschulen siehe Typenschulbauten DDR (ZNWB)						

Anhang II

Übersicht Bestandskonstruktionen

Bauteil	Typ	Bauteilaufbau Bestand (A-I)		U-Wert [W/(m²K)]
		Bauteilschicht	Dicke [mm]	
AW	1A	Massivbau Mauerwerk	380-770	1,70
	1B	Massivbau Betonsteine	-	
	2A	Fassadenfarbe	0,3	1,40
Giebel	2B	Außenputz	20	
	2O	Mauerwerk	365	
		Innenputz	10	
		Innenfarbe	0,2	
Brüstung	2B	Fassadenfarbe	0,3	1,80
		Außenputz	20	
		Beton	175	
		Heraklith	15	
		Innenputz	10	
		Innenfarbe	0,2	
	3A	Fassadenfarbe	0,3	1,00
		Außenputz	20	
		Mauerwerk	365	
		Innenputz	10	
		Innenfarbe	0,2	
Brüstung	3B	Beton	60	1,00
		Dämmung	50	
		Beton	150	
		alt. Mauerwerk	175	
		Innenputz	10	
		Innenfarbe	0,2	
Giebel		Beton	60	1,00
		Dämmung	50	
		Beton	150	
		Innenputz	10	
		Innenfarbe	0,2	
Brüstung	3O	Fassadenfarbe	0,3	1,00
		Außenputz	15	
		alt. Sichtbeton		
		Beton	140	
		Dämmung	50	
		Innenputz	15	
		Innenfarbe	0,2	
		alt. 3-Schicht-Element siehe 3B		
Giebel		Fassadenfarbe	0,3	1,00
		Außenputz	15	
		alt. Sichtbeton		
		Beton	290	
		Innenputz	5	
		Innenfarbe	0,2	
4A	Massivbau Mauerwerk	-	0,70	
4B	Stahlbeton/ Porenbeton	-		
4O	Großtafelbauweise	-		
5A	Massivbau Mauerwerk	-	0,45	
5B	Stahlbeton	-	0,45	
5X	Leichtbau Holz	-	0,40	

AW	1A/B	(Bruchstein-) Mauerwerk	-	1,70	
Keller	2A	Anstrich		1,40	
	2B	Stampfbeton	400		
		Innenputz	15		
		Innenfarbe	0,2		
	2O	Anstrich		1,40	
		Mauerwerk	490		
		Innenputz	15		
			Innenfarbe	0,2	
	3A	Sperranstrich		1,00	
	3B	Stahlbeton	300		
3O	Innenputz	15			
		Innenfarbe	0,2		
4A-O	Stahlbeton	-	0,70		
5A/B	Stahlbeton	-	0,45		
Decke ü. KG	1A/B	Massiv Mauerwerk	-	1,20	
		Massiv Beton (Kappendecke)	-	1,60	
2A	2B	2O	Fußbodenbelag Lino	3	1,30
			Hartfaserplatte	2,5	
			Estrich	35	
			Mineralfaserdämm.	15	
			Stahlbetondecke	200	
			Putz	10	
	Innenfarbe	0,2			
3A	Fußbodenbelag Lino	3	1,00		
3B	Hartfaserplatte	2,5			
3O	Estrich	40			
	Mineralfaserdämm.	30			
	Stahlbetondecke	210			
	Putz	10			
	Innenfarbe	0,2			
4A-O	Massiv Stahlbeton	-	0,70		
5A/B	Massiv Stahlbeton	-	0,55		
Boden gg. ER	1A	Ziegelpflaster	-	1,20	
	1B	Beton (unbewährt)	-	1,60	
Keller	2A-O	Estrich	8	1,30	
		Stahlbetondecke	120		
EG			Fußbodenbelag Lino	3	1,70
			Hartfaserplatte	2,5	
			Estrich	35	
			Mineralfaserdämm.	15	
			Stahlbetondecke	120	
Keller	3A-O	Estrich	20	1,00	
		Stahlbetondecke	200		
EG			Fußbodenbelag Lino	3	1,00
			Hartfaserplatte	2,5	
			Estrich	40	
			Mineralfaserdämm.	30	
	Stahlbetondecke	200			
4A-O	Stahlbeton	-	0,70		
5A/B	Stahlbeton	-	0,55		

oberste GD	1A	Holzbalkendecke	-	1,00
	1B	Massivdecke Beton	-	2,10
	2A-O	(Stahl-) Betondecke	200	2,10
		Rippen; m. Füllkörpern		
		Putz	10	
		Innenfarbe	0,2	
	3A-O	Estrich	40	0,60
		Mineralfaserdämm.	30	
		Stahlbetondecke	210	
		Putz	10	
		Innenfarbe	0,2	
	4A-O	Stahlbeton	-	0,45
	5A/B	Stahlbeton	-	0,25
		Holzbalken	-	0,25
Flachdach	1B	Massiv 'Teerpappendach'	-	2,10
	2B	Abdichtung 2-lagig	8	1,70
	Bimsestrich i. Gefälle	50		
	Stahlbetondecke	210		
	Innenputz	10		
	Innenfarbe	0,2		
	3B	Abdichtung 2-lagig	8	1,30
	3O	Dämmung Polystyrol	50	
		Dampfsperre	0,2	
		Gefällebeton	50	
		Stahlbetondecke	240	
		Innenputz	10	
		Innenfarbe	0,2	
	4B/O	Stahlbeton (Warmdach)	-	0,50
	5A/B	Stahlbeton (Warmdach)	-	0,25
Fenster	BAK	Holz-Einfachfenster	-	5,00
	1-3	Einfachverglasung		
		Holz-Verbundfenster	-	2,70
		Zweifachverglasung		
	4A-O	Holzfenster isolierverglast	-	2,70
		Kunststofffenster isolierverglast	-	3,00
	5A/B	Kunststofffenster isolierverglast	-	1,70
		Holzfenster isolierverglast	-	1,55

Die Bauteilaufbauten der BAK 1,4 und 5 werden aufgrund der Irrelevanz für die vorliegende Arbeit nur schematisch, ohne detailliertem Schichtaufbau, angegeben.

Anhang III

Tabelle II-01: Wärme- und feuchtetechnische Kenndaten der Baustoffe nach DIN 4108-4:2020-11 und DIN 10456:2010-05

Baustoff	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m ² K)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ [-]	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p [J/(kgK)]
Beton hohe Rohdichte	2,00	2400	80/130	1000
Beton mittlere Rohdichte	1,35	2000	70/120	1000
Beton, 1% armiert nach DIN EN 206	2,30	2300	80/130	1000
Bitumen als Bahn	0,23	1100	50 000	1000
Bitumen als Stoff (z.B. Bitumenanstrich, -abdichtung) nach DIN EN 13707	0,17	(1050)	50 000	1000
Dämmung, Baustroh nach Z-23.11-1595	$\leq 0,05$	85-115	2	2000
Dämmung, EPS - Expandiertes Polystyrol nach DIN EN 13163	0,035	10-50	20/100	1450
Dämmung, XPS - Extrudiertes Polystyrol nach DIN EN 13164	0,035	20-65	80/250	1450
Dämmung, Hanffaser nach ETA-05/0037	0,039-0,047	35-45	1/2	2300
Dämmung, Holzfaser nach DIN EN 13171	$\leq 0,042$	40-250	3/5	2000
Dämmung, Holzwolle-Leichtbauplatte nach DIN EN 13168	0,093	250-450	2/5	1470
Dämmung, Kork nach DIN EN 13170	0,05	90-140	5/10	1560
Dämmung, Mineralwolle und Mineralfaserdämmplatte nach DIN EN 13164	$\leq 0,04$	10-200	1	1030

Dämmung, PUR- Hart- schaum, alukaschiert nach DIN EN 13165	≤ 0,03	30-50	40/200	1400
Dämmung, Schaumglas nach DIN EN 13167	0,04	100-150	f	1000
Dämmung, Vakuum- Isollationspaneel	0,007	170-210	100 000	1050
Dämmung, Zellulose	≤ 0,04	20-60	2	1600
Dampfbremse, PE-Folie	-	-	10 000	-
Dampfsperre / Feuchteschutzbahn	-	-	-	-
Estrich (Zementestrich)	1,40	(2000)	15/35	1000
GK-Platte	0,21	700	4/10	1000
Holzwerkstoffplatte (OSB)	0,13	650	30/50	1700
Klebespachtel	1,07	1600	25	1000
Konstruktionsvollholz	0,13	500	20/50	1600
Linoleum	0,17	1200	800/1000	1400
Nutzholz – z.B. Lärche	0,13	700	20/50	1600
Putz (Kalkgipsputz)	1,00	1400	10	1000
Putz (Kalkzementputz)	1,00	(1800)	15/35	1000
Vollziegel, Hochlochziegel, Füllziegel, Vormauerziegel	0,58 0,68 0,81 0,96 1,40	1400 1600 1800 2000 2400	5/10	1000
Wandbauplatten aus Leichtbeton nach DIN 18162	0,29-0,58	800-1400	5/10	1000
Zementmörtel	1,60	(2000)	15/35	1000

Anhang IV

Übersicht verwendete Datensätze basierend auf Ökobaudat 2023 bzw. EPDs

Baustoff	Ökodaten (Ökobaudat 2023, mit Vermerk bei EPD)	End of Life
Bitumen als Bahn	6.7.04 Bitumen Emulsion (40% Bitumen, 60% Wasser)	Bauschutt - Deponierung
Bitumen als Stoff	6.7.04 Bitumen Kaltkleber (60% Bitumen, 23% LM, 17% Wasser)	Bauschutt - Deponierung
Dämmung Hanffaser	BAU-EPD-HEMPFLAX-2022-1- GABI-THERMOHANF (gültig bis 11.11.2027)	BAU-EPD-HEMPFLAX-2022-1- GABI-THERMOHANF Phasen C2, C3/ 4, D
Dämmung Holzfaser Trockenverfahren nach DIN EN 13171	2.10.01 Holzfaserdämmplatte	End of Life - Holzfaserdämmplatte Trockenverfahren
Dämmung, EPS nach DIN EN 13163	2.2.01 Expandiertes Polystyrol	thermische Verwertung (Verbrennung)
Dämmung, Kork expandiert nach DIN EN 13170	2.9.01 Expandierter Kork	End of Life - Expandierter Kork
Dämmung, Mineralwolle nach DIN EN 13162	2.1.01 Mineralwolle/ Fassade/Boden/Dach/Innen)	Bauschutt - Deponierung
Dämmung, Schaumglas nach DIN EN 13167	2.6.01 Foamglas T3 Pittsburgh Corning Europe NV	Bauschutt - Aufbereitung
Dämmung, Vakuum- Isollationspaneel	EPD-ETE-20230095-IBA2-EN (gültig bis 13.06.2028)	EPD-ETE-20230095-IBA2-EN Phasen C2, C4, D
Dämmung, XPS nach DIN EN 13164	2.2.03 Extrudiertes Polystyrol	thermische Verwertung (Verbrennung)
Dämmung, Zellulose (Einblasdämmung)	2.11.01 Zellulosefaser Einblas-Dämmstoff	End of Life - Zellulosefaser
Dämmung. PUR-Hartschaum, alukaschiert nach DIN EN 13165	2.2.04 Polyurethan-Hartschaum (PU) / PIR-Hartschaum	thermische Verwertung (Verbrennung)
Dampfbremse	6.6.02 Dampfbremse PE	thermische Verwertung (Verbrennung)
Estrich (Zementestrich)	1.4.03 Zementestrich	Bauschutt - Aufbereitung
Fenster Holz (U-Wert < 0,8 W/(m²K))	BAU-EPD-PLATTFORM- FENSTER-FVHOLZ-2023-1- Ecoinvent-Holzfenster (gültig bis: 09.11.2027)	BAU-EPD-PLATTFORM- FENSTER-FVHOLZ-2023-1- Ecoinvent-Holzfenster Glas: Bauschutt-Aufbereitung Rahmen: C3
Fenster Holz-Aluminium (U-Wert < 0,8 W/(m²K))	BAU-EPD-PLATTFORM- FENSTER-FVHOLZ-2023-1- Ecoinvent-Holz-Alu-Fenster (gültig bis: 14.02.2028)	BAU-EPD-PLATTFORM- FENSTER-FVHOLZ-2023-1- Ecoinvent-Holz-Alu-Fenster Glas: Bauschutt-Aufbereitung Rahmen: C3
Fenster Kunststoff (U-Wert < 0,8 W/(m²K))	EPD-QKE-20220456-IBG1-DE (gültig bis: 14.09.2027)	EPD-QKE-20220456-IBG1-DE Glas: Bauschutt-Aufbereitung Rahmen: C3

Fenster Kunststoff (U-Wert < 1,3 W/(m²K))	EPD-QKE-20220002-IBG1-DE (gültig bis: 14.02.2028)	EPD-QKE-20220002-IBG1-DE Glas: Bauschutt-Aufbereitung Rahmen: C3
GK-Platte	1.3.13 Gipskartonplatte	Bauschutt - Aufbereitung
Holzwerkstoffplatte (OSB)	3.2.04 OSB-Platte	End of Life - OSB (Durchschnitt)
Klebespachtel	2.21.01 WDVS Verklebung und Beschichtung Kratzputz mineralisch	Bauschutt - Deponierung
Konstruktionsvollholz	3.1.02 Konstruktionsvollholz	End of Life - Holz naturbelassen
Linoleum	6.2.04 Linoleum	thermische Verwertung (Verbrennung)
Putz (Kalkgipsputz)	1.4.04 Kalk-Gips-Innenputz	Bauschutt - Aufbereitung
Putz (Kalkzementputz)	1.4.04 Normalputz	Bauschutt - Aufbereitung
Schnittholz, Lärche	3.1.01 Schnittholz Lärche (12% Feuchte, 10,7% H2O)	End of Life - Holz naturbelassen
Wassersperrschicht/ Feuchteschutzbahn (PE-Folie)	6.6.04 PE/PP Vlies	thermische Verwertung (Verbrennung)
Wassersperrschicht/ Feuchteschutzbahn (Noppenbahn)	6.6.03 PE-Noppenfolie zur Abdichtung	thermische Verwertung (Verbrennung)
Wassersperrschicht/ Feuchteschutzbahn (PE-Folie)	6.6.01 Unterspannbahn PE	thermische Verwertung(Verbrennung)

Anhang V

Ökobilanzierung Rückbau Bestand – LP C3/4

Bauteil	Typ	Bauteilaufbau Bestand (A-I)			U-Wert	Ökologische Bewertung Rückbau			
		Bauteilschicht	Dicke	WLG		GWP	PE _{n.e.}	PE _{e.}	PE _{ges.}
Decke ü. KG	2A	Fußbodenbelag Lino	3		1,30	0,11	0,03	0,16	0,19
	2B	Hartfaserplatte	2,5			0,05	-0,04	-0,56	-0,61
	2O	Estrich	40			0,04	0,52	0,08	0,60
		Mineralfaserdämm.	15			0,00	0,03	0,00	0,03
		Stahlbetondecke							
		Putz			0,20	0,538	-0,32		
Decke ü. KG	3A	Fußbodenbelag Lino	3		1,00	0,11	0,03	0,16	0,19
	3B	Hartfaserplatte	2,5			0,05	-0,04	-0,56	-0,61
	3O	Estrich	40			0,04	0,52	0,08	0,60
		Mineralfaserdämm.	30			0,00	0,06	0,01	0,07
		Stahlbetondecke							
		Putz			0,2002	0,57	-0,318		
EG		Fußbodenbelag Lino	3			0,11	0,03	0,16	0,19
		Hartfaserplatte	2,5			0,05	-0,04	-0,56	-0,61
		Estrich	40			0,04	0,52	0,08	0,60
		Mineralfaserdämm.	15			0,00	0,03	0,00	0,03
		Stahlbetondecke							
					0,20	0,54	-0,32		
EG		Fußbodenbelag Lino	3		1,00	0,11	0,03	0,16	0,19
		Hartfaserplatte	2,5			0,05	-0,04	-0,56	-0,61
		Estrich	40			0,04	0,52	0,08	0,60
		Mineralfaserdämm.	30			0,00	0,06	0,01	0,07
		Stahlbetondecke					0,2002	0,57	-0,318
oberste GD	3A	Estrich	40		0,6	0,04	0,52	0,08	0,60
		Mineralfaserdämm.	30			0,00	0,06	0,01	0,07
		Stahlbetondecke	200			0,04	0,58	0,09	
		Putz	15						
		Innenfarbe	2						
Flach- dach / Pultdach	2B	Abdichtung 2-lagig	8		1,70	0,11	-4,77	0,06	-4,71
		Bimsestrich i. Gefälle	50						
		Stahlbetondecke	210						
		Innenputz	15						
		Innenfarbe	2						
Flach- dach / Pultdach	3B	Abdichtung 2-lagig	8		1,30	0,11	-4,77	0,06	-4,71
	3O	Dämmung Polystyrol	50			0,12	0,15	0,01	0,15
		Dampfsperre	0,2			0,01	0,02	0,00	0,02
		Gefällebeton	50						
		Stahlbetondecke	240			0,24	-4,61	0,06	
		Innenputz	15						
Fenster	BAK 2 +3 Alle	Holz-Einfachfenster Einfachverglasung			5,00	keine Angaben			
		Holz-Verbundfenster Zweifachverglasung			2,70				

Hellgrau: Bestand bleibt bestehen.

Ökobilanzierung Sanierungsmaßnahmen

Bauteil	Typ	Bauteilaufbau			Ökologische Bewertung					Ökologische Bewertung						
		SM	Bauteilschicht	Dicke	WL	Sanierungsmaßnahme A1-3 - C 3/4				Sanierungsmaßnahme D						
					GWP (ges.)	PE _{n.e.}	PE _{e.}	PE _{ges.}	B4 Zyklus	GWP (ges.)	PE _{n.e.}	PE _{e.}	PE _{ges.}			
AW	2A	WDVS 1	Fassadenfarbe, Silikat-Dispersionsfarbe	0,3		0,04	0,48	0,14	0,62	2	-1,12E-04	-1,73E-03	-6,54E-04	-2,39E-03		
	2O		Außenputz (Kalk-Zement)	15	1	0,12	0,82	0,46	1,27	0	-	-	-	-		
Giebel	2B		Wärmedämmung													
			EPS	120	0,035	0,47	6,59	0,14	6,73	1	-0,10	-1,73	-0,34	-2,08		
			PU-Hartschaum (aluka.)	100	0,025	0,60	8,99	0,97	9,96	1	-0,11	-1,78	-0,51	-2,29		
			Mineralwolle	120	0,035	0,34	4,22	0,86	5,08	1	-	-	-	-		
			Holzfasern	160	0,042	0,53	11,14	7,13	18,27	1	-0,73	-12,85	11,71	-1,15		
			Kork	180	0,05	0,37	4,58	12,83	17,41	1	-0,28	-4,26	-1,62	-5,88		
			Klebe- & Spachtelputz	5	1	0,15	2,59	0,49	3,08	1	-	-	-	-		
		WDVS 2	Fassadenfarbe, Silikat-Dispersionsfarbe	0,3		0,04	0,48	0,14	0,62	2	-1,12E-04	-1,73E-03	-6,54E-04	-2,39E-03		
			Außenputz (Kalk-Zement)	15	0,82	0,12	0,82	0,46	1,27	0	-	-	-	-		
			Wärmedämmung			0,00	0,00	0,00			0,00	0,00	0,00			
			EPS	220	0,035	0,86	12,08	0,25	12,34	1	-0,18	-3,18	-0,63	-3,81		
			PU-Hartschaum	160	0,025	0,95	14,38	1,56	15,94	1	-0,17	-2,85	-0,81	-3,67		
			Mineralwolle	220	0,035	0,62	7,74	1,57	9,31	1	-	0,00	0,00			
			Holzfasern	260	0,042	0,87	18,10	11,58	29,69	1	-1,18	-20,88	19,02	-1,86		
			Kork	300	0,05	0,62	7,64	21,38	29,02	1	-0,46	-7,10	-2,70	-9,80		
			Klebe- & Spachtelputz	5	1	0,15	2,59	0,49	3,08	1	-	-	-	-		
	VF 1		Außenbekleidung Holz	24	0,14	0,29	2,63	13,17	15,80	1	-0,35	-5,42	-2,07	-7,49		
			Lattung (10%) mit Luftschicht	30	0,13	0,01	0,08	0,14	0,22	0	-0,02	-0,28	0,36	0,08		
			Fassadenbahn	5	160	0,03	0,44	0,05	0,49	1	0,00	-0,07	-0,03	-0,09		
			Wärmedämmung													
			Mineralwolle	120	0,035	0,17	2,11	0,43	2,54	0	-	-	-	-		
			Holzfasern	140	0,042	0,23	4,87	3,12	7,99	0	-0,32	-5,62	5,12	-0,50		
			Hanf	140	0,039	0,10	1,54	1,74	3,28	0	-0,07	-1,15	-0,25	-1,40		
	VF 2		Außenbekleidung Holz	24	0,14	0,29	2,63	13,17	15,80	1	-0,35	-5,42	-2,07	-7,49		
			Lattung (10%) mit Luftschicht	30	0,13	0,01	0,08	0,14	0,22	0	-0,02	-0,28	0,36	0,08		
			Fassadenbahn	5	160	0,03	0,44	0,05	0,49	1	0,00	-0,07	-0,03	-0,09		
			Wärmedämmung													
			Mineralwolle	220	0,035	0,31	3,87	0,78	4,65	0	-	-	-	-		
			Holzfasern	260	0,042	0,43	9,05	5,79	14,84	0	-0,59	-10,44	9,51	-0,93		
			Hanf	240	0,039	0,17	2,64	2,99	5,63	0	-0,12	-1,98	-0,42	-2,40		
	ID 1		Klebe- & Spachtelputz	5	1	0,15	2,59	0,49	3,08	1	-	-	-	-		
			Wärmedämmung													
			Vakuumsolationspaneel	25	0,007	0,45	10,07	1,52	11,59	0	-0,01	0,03	0,76	0,80		
			PU-Hartschaum alukas.	100	0,025	0,30	4,49	0,49	4,98	0	-0,05	-0,89	-0,25	-1,15		
			Mineralwolle	120	0,035	0,10	1,24	0,25	1,49	0	-	-	-	-		
			Holzfasern (flex)	140	0,039	0,10	2,10	0,93	3,04	0	-0,09	-1,76	1,43	-0,33		
			Hanf	140	0,039	0,10	1,54	1,74	3,28	0	-0,07	-1,15	-0,25	-1,40		
			Dampfbremse, PE	0,2	0,22	0,04	0,55	0,05	0,60	1	-0,01	-0,14	-0,05	-0,19		
Gipskartonplatte	25		0,08	1,30	0,42	1,73	0	-	-	-	-					
Innenfarbe Dispersionsfarbe	0,2		0,06	1,14	0,18	1,32	3	-1,16E-04	-1,78E-03	-6,80E-04	0,00					
	ID 2		Klebe- & Spachtelputz	5	1	0,15	2,59	0,49	3,08	1	-	-	-	-		
			Wärmedämmung													
			Vakuumsolationspaneel	45	0,007	0,80	18,12	2,74	20,86	0	-0,03	0,06	1,37	1,43		
			PU-Hartschaum alukas.	160	0,025	0,48	7,19	0,78	7,97	0	-0,09	-1,43	-0,41	-1,83		
			Mineralwolle	220	0,035	0,18	2,27	0,46	2,73	0	-	-	-	-		
			Holzfasern (flex)	240	0,039	0,16	3,61	1,60	5,21	0	-0,15	-3,02	2,44	-0,57		
			Hanf	240	0,039	0,17	2,64	2,99	5,63	0	-0,12	-1,98	-0,42	-2,40		
			Dampfbremse	0,2	0,22	0,04	0,55	0,05	0,60	1	-0,01	-0,14	-0,05	-0,19		
			Gipskartonplatte	25		0,08	1,30	0,42	1,73	0	-	-	-	-		
			Innenfarbe Dispersionsfarbe	0,2		0,06	1,14	0,18	1,32	3	-1,16E-04	-1,78E-03	-6,80E-04	0,00		
	Seriiell 2 alt. Putz		Außenbekleidung Holz	24	0,14	0,29	2,63	13,17	15,80	1	-0,35	-5,42	-2,07	-7,49		
			Lattung (10%) mit Luftschicht	30	0,13	0,01	0,08	0,14	0,22	0	-0,02	-0,28	0,36	0,08		
			Holzfasernleichtbauplatte	40	0,042	0,13	2,78	1,78	4,57	1	-0,18	-3,21	2,93	-0,29		
			Holzkonstruktion (12%-Holzanteil) mit Wärmedämmung (88%)													
			Mineralwolle	180	0,035	0,17	2,18	1,36	3,55	0	-0,15	-2,00	2,58	0,58		
			Zellulose Einblasdämmung	200	0,039	0,09	1,01	4,15	5,17	0	-0,24	-3,47	2,40	-1,07		
			Holzfasern (flex)	200	0,039	0,17	3,26	2,32	5,58	0	-0,27	-4,44	2,94	-1,50		
			OSB-Platte	15	0,13	0,11	2,49	0,89	3,39	0	-0,07	-1,56	2,22	0,66		
			Holzfasern dämmplatte	20	0,039	0,03	0,60	0,27	0,87	1	-0,03	-0,50	0,41	-0,10		
AW	2B	WDVS 1	Fassadenfarbe, Silikat-Dispersionsfarbe	3		0,04	0,48	0,14	0,62	2	-1,12E-04	-1,73E-03	-6,54E-04	-2,39E-03		
			Brüstung	Außenputz (Kalk-Zement)	15	1	0,12	0,82	0,46	1,27	0	-	-	-	-	
				Wärmedämmung												
				EPS	140	0,035	0,55	7,69	0,16	7,85	1	-0,12	-2,02	-0,40	-2,42	
				PU-Hartschaum	100	0,025	0,60	8,99	0,97	9,96	1	-0,11	-1,78	-0,51	-2,29	
				Mineralwolle	140	0,035	0,40	4,98	1,00	5,98	1	-	-	-	-	
				Holzfasern	160	0,042	0,53	11,14	7,13	18,27	1	-0,73	-12,85	11,71	-1,15	
				Kork	180	0,05	0,37	4,58	12,83	17,41	1	-0,28	-4,26	-1,62	-5,88	
				Klebe- & Spachtelputz	5	1	0,15	2,59	0,49	3,08	1	-	-	-	-	
		WDVS 2	Fassadenfarbe, Silikat-Dispersionsfarbe	3		0,04	0,48	0,14	0,62	2	-1,12E-04	-1,73E-03	-6,54E-04	-2,39E-03		
			Außenputz (Kalk-Zement)	15	0,82	0,12	0,82	0,46	1,27	0	-	-	-	-		
			Wärmedämmung													
			EPS	220	0,035	0,86	12,08	0,25	12,34	1	-0,18	-3,18	-0,63	-3,81		
			PU-Hartschaum	160	0,025	0,95	14,38	1,56	15,94	1	-0,17	-2,85	-0,81	-3,67		
			Mineralwolle	220	0,035	0,62	7,74	1,57	9,31	1	-	0,00	0,00			
			Holzfasern	260	0,042	0,87	18,10	11,58	29,69	1	-1,18	-20,88	19,02	-1,86		
			Kork	300	0,05	0,62	7,64	21,38	29,02	1	-0,46	-7,10	-2,70	-9,80		
			Klebe- & Spachtelputz	5	1	0,15	2,59	0,49	3,08	1	-	-	-	-		

	VF 1 kon	Außenbekleidung Holz	24	0,14		0,29	2,63	13,17	15,80	1			-0,35	-5,42	-2,07	-7,49	
		Lattung (10%) mit Luftschicht	30	0,13		0,01	0,08	0,14	0,22	0			-0,02	-0,28	0,36	0,08	
		Fassadenbahn	5	160		0,03	0,44	0,05	0,49	1			0,00	-0,07	-0,03	-0,09	
		Wärmedämmung															
		Mineralwolle	140	0,035		0,20	2,49	0,50	2,99	0							
		Holzfasern	160	0,042		0,27	5,57	3,56	9,13	0			-0,36	-6,43	5,85	-0,57	
		Hanf	140	0,039		0,10	1,54	1,74	3,28	0			-0,07	-1,15	-0,25	-1,40	
	VF 2 kon	Außenbekleidung Holz	24	0,14		0,29	2,63	13,17	15,80	1			-0,35	-5,42	-2,07	-7,49	
		Lattung (10%) mit Luftschicht	30	0,13		0,01	0,08	0,14	0,22	0			-0,02	-0,28	0,36	0,08	
		Fassadenbahn	5	160		0,03	0,44	0,05	0,49	1			0,00	-0,07	-0,03	-0,09	
		Wärmedämmung															
		Mineralwolle	220	0,035		0,31	3,87	0,78	4,65	0							
		Holzfasern	260	0,042		0,43	9,05	5,79	14,84	0			-0,59	-10,44	9,51	-0,93	
		Hanf	240	0,039		0,17	2,64	2,99	5,63	0			-0,12	-1,98	-0,42	-2,40	
	ID 1	Klebe- & Spachtelputz	5	1		0,15	2,59	0,49	3,08	1							
		Wärmedämmung															
		Vakuumsolationspaneel	25	0,007		0,45	10,07	1,52	11,59	0			-0,01	0,03	0,76	1,43	
		PU-Hartschaum alukas.	100	0,025		0,30	4,49	0,49	4,98	0			-0,05	-0,89	-0,25	-1,15	
		Mineralwolle	140	0,035		0,11	1,44	0,29	1,74	0							
		Holzfasern (flexibel)	140	0,039		0,10	2,10	0,93	3,04	0			-0,09	-1,76	1,43	-0,33	
		Hanf	140	0,039		0,10	1,54	1,74	3,28	0			-0,07	-1,15	-0,25	-1,40	
		Dampfbremse	0,2	0,22		0,04	0,55	0,05	0,60	1			-0,01	-0,14	-0,05	-0,19	
		Gipskartonplatte	25			0,08	1,30	0,42	1,73	0							
		Innenfarbe Dispersionsfarbe	0,2			0,06	1,14	0,18	1,32	3			-1,16E-04	-1,78E-03	-6,80E-04	-2,46E-03	
	ID 2	Klebe- & Spachtelputz	5	1		0,15	2,59	0,49	3,08	1							
		Wärmedämmung															
		Vakuumsolationspaneel	45	0,007		0,80	18,12	2,74	20,86	0			-0,03	0,06	1,37	1,43	
		PU-Hartschaum alukas.	160	0,025		0,48	7,19	0,78	7,97	0			-0,09	-1,43	-0,41	-1,83	
		Mineralwolle	220	0,035		0,18	2,27	0,46	2,73	0							
		Holzfasern (flexibel)	240	0,039		0,16	3,61	1,60	5,21	0			-0,15	-3,02	2,44	-0,57	
		Hanf	240	0,039		0,17	2,64	2,99	5,63	0			-0,12	-1,98	-0,42	-2,40	
		Dampfbremse	0,2	0,22		0,04	0,55	0,05	0,60	1			-0,01	-0,14	-0,05	-0,19	
		Gipskartonplatte	25			0,08	1,30	0,42	1,73	0							
		Innenfarbe Dispersionsfarbe	0,2			0,06	1,14	0,18	1,32	3			-1,16E-04	-1,78E-03	-6,80E-04	-0,12	
	Seriell 2	Außenbekleidung Holz	24	0,14		0,29	2,63	13,17	15,80	1			-0,35	-5,42	-2,07	-7,49	
	alt. Putz	Lattung (10%) mit Luftschicht	30	0,13		0,01	0,08	0,14	0,22	0			-0,02	-0,28	0,36	0,08	
		Holzfasernleichtbauplatte	40	0,42		0,13	2,78	1,78	4,57	1			-0,18	-3,21	2,93	-0,29	
		Holzkonstruktion (X%-Holzanteil) mit Wärmedämmung															
		Mineralwolle	180	0,035		0,17	2,18	1,36	3,55	0			-0,15	-2,00	2,58	0,58	
		Zellulose Einblasdämmung	200	0,039		0,09	1,01	4,15	5,17	0			-0,24	-3,47	2,40	-1,07	
		Holzfasern	200	0,039		0,17	3,26	2,32	5,58	0			-0,27	-4,44	2,94	-1,50	
		OSB-Platte	15	0,13		0,11	2,49	0,89	3,39	0			-0,07	-1,56	2,22	0,66	
		Holzfaserndämmplatte	20	0,041		0,03	0,60	0,27	0,87	1			-0,03	-0,50	0,41	-0,10	
AW	3A	WDVS 1	Fassadenfarbe, Silikat-Dispersionsfarbe	0,3			0,04	0,48	0,14	0,62	2		-1,12E-04	-1,73E-03	-6,54E-04	-2,39E-03	
	3B		Außenputz (Kalk-Zement)	15	1		0,12	0,82	0,46	1,27	0						
	3C		Wärmedämmung														
			EPS	120	0,035		0,47	6,59	0,14	6,73	1			-0,10	-1,73	-0,34	-2,08
			PU-Hartschaum	80	0,025		0,48	7,19	0,78	7,97	1			-0,09	-1,43	-0,41	-1,83
			Mineralwolle	120	0,035		0,34	4,22	0,86	5,08	1						
			Holzfasern	140	0,042		0,47	9,75	6,24	15,98	1			-0,64	-11,24	10,24	-1,00
			Kork	160	0,05		0,33	4,08	11,40	15,48	1			-0,25	-3,79	-1,44	-5,23
			Klebe- & Spachtelputz	5	1		0,15	2,59	0,49	3,08	1						
	WDVS 2	Fassadenfarbe, Silikat-Dispersionsfarbe	0,3			0,04	0,48	0,14	0,62	2			-1,12E-04	-1,73E-03	-6,54E-04	-2,39E-03	
		Außenputz (Kalk-Zement)	15	0,82		0,12	0,82	0,46	1,27	0							
		Wärmedämmung															
			EPS	200	0,035		0,78	10,99	0,23	11,22	1			-0,17	-2,89	-0,57	-3,46
			PU-Hartschaum	160	0,025		0,95	14,38	1,56	15,94	1			-0,17	-2,85	-0,81	-3,67
			Mineralwolle	220	0,035		0,62	7,74	1,57	9,31	1						
			Holzfasern	240	0,042		0,80	16,71	10,69	27,40	1			-1,09	-19,28	17,56	-1,72
			Kork	300	0,05		0,62	7,64	21,38	29,02	1			-0,46	-7,10	-2,70	-9,80
			Klebe- & Spachtelputz	5	1		0,15	2,59	0,49	3,08	1						
	VF 1 kon	Außenbekleidung Holz	24	0,14		0,29	2,63	13,17	15,80	1			-0,35	-5,42	-2,07	-7,49	
		Lattung (10%) mit Luftschicht	30	0,13		0,01	0,08	0,14	0,22	0			-0,02	-0,28	0,36	0,08	
		Fassadenbahn	5	160		0,03	0,44	0,05	0,49	1			0,00	-0,07	-0,03	-0,09	
		Wärmedämmung															
		Mineralwolle	120	0,035		0,34	4,22	0,86	5,08	1							
		Holzfasern	140	0,042		0,23	4,87	3,12	7,99	0			-0,32	-5,62	5,12	-0,50	
		Hanf	120	0,039		0,09	1,32	1,49	2,81	0			-0,06	-0,99	-0,21	-1,20	
	VF 2 kon	Außenbekleidung Holz	24	0,14		0,29	2,63	13,17	15,80	1			-0,35	-5,42	-2,07	-7,49	
		Lattung (10%) mit Luftschicht	30	0,13		0,01	0,08	0,14	0,22	0			-0,02	-0,28	0,36	0,08	
		Fassadenbahn	5	160		0,03	0,44	0,05	0,49	1			0,00	-0,07	-0,03	-0,09	
		Wärmedämmung															
		Mineralwolle	200	0,035		0,57	7,03	1,43	8,46	1							
		Holzfasern	240	0,042		0,40	8,35	5,35	13,70	0			-0,54	-9,64	8,78	-0,86	
		Hanf	220	0,039		0,16	2,42	2,74	5,16	0			-0,11	-1,81	-0,39	-2,20	
	ID 1	Klebe- & Spachtelputz	5	1		0,15	2,59	0,49	3,08	1							
		Wärmedämmung															
		Vakuumsolationspaneel	25	0,007		0,45	10,07	1,52	11,59	0			-0,01	0,03	0,76	0,80	
		PU-Hartschaum alukas.	80	0,025		0,24	3,60	0,39	3,98	0			-0,04	-0,71	-0,20	-0,92	
		Mineralwolle	120	0,035		0,10	1,24	0,25	1,49	0							
		Holzfasern (flexibel)	120	0,039		0,08	1,80	0,80	2,60	0			-0,08	-1,51	1,22	-0,29	
		Hanf	120	0,039		0,09	1,32	1,49	2,81	0			-0,06	-0,99	-0,21	-1,20	
		Dampfbremse	0,2	0,22		0,04	0,55	0,05	0,60	1			-0,01	-0,14	-0,05	-0,19	
		Gipskartonplatte	25			0,08	1,30	0,42	1,73	0							
		Innenfarbe Dispersionsfarbe	0,2			0,06	1,14	0,18	1,32	3			-1,16E-04	-1,78E-03	-6,80E-04	-2,46E-03	

		ID 2	Klebe- & Spachtelputz	5	1	0,15	2,59	0,49	3,08	1	-	-	-	-
			Wärmedämmung											
			Vakuumsulationspaneel	40	0,007	0,71	16,11	2,43	18,54	0	-0,02	0,06	1,22	1,27
			PU-Hartschaum akukas.	140	0,025	0,42	6,29	0,68	6,97	0	-0,07	-1,25	-0,36	-1,60
			Mineralwolle	200	0,035	0,16	2,06	0,42	2,48	0	-	-	-	-
			Holzfaser (flexibel)	220	0,039	0,15	8,35	5,35	13,70	0	-0,54	-9,64	8,78	-0,86
			Hanf	220	0,039	0,16	2,42	2,74	5,16	0	-0,11	-1,81	-0,39	-2,20
			Dampfbremse	0,2	0,22	0,04	0,55	0,05	0,60	1	-0,01	-0,14	-0,05	-0,19
			Gipskartonplatte	25		0,08	1,30	0,42	1,73	0	-	-	-	-
			Innenfarbe Dispersionsfarbe	0,2		0,06	1,14	0,18	1,32	3	-1,16E-04	-1,78E-03	-6,80E-04	0,00
		Seriell 2	Außenbekleidung Holz	24	0,14	0,29	2,63	13,17	15,80	1	-0,35	-5,42	-2,07	-7,49
			alt. Putz	30	0,13	0,01	0,08	0,14	0,22	0	-0,02	-0,28	0,36	0,08
			Holzfaserleichtbauplatte	40	0,42	0,13	2,78	1,78	4,57	1	-0,18	-3,21	2,93	-0,29
			Holzkonstruktion (X%-Holzanteil)											
			mit Wärmedämmung											
			Mineralwolle	180	0,035	0,17	2,18	1,36	3,55	0	-0,15	-2,00	2,58	0,58
			Zellulose Einblasdämmung	180	0,039	0,08	0,91	3,74	4,65	0	-0,22	-3,12	2,16	-0,96
			Holzfaser	180	0,039	0,15	2,93	2,09	5,02	0	-0,25	-3,99	4,20	0,20
			OSB-Platte	15	0,13	0,11	2,49	0,89	3,39	0	-0,07	-1,56	2,22	0,66
			Holzfaserdämmplatte flexi	20	0,041	0,03	0,60	0,27	0,87	1	-0,03	-0,50	0,41	-0,10
AW	2A	AD 1	Perimeterdämmung											
Keller	2B		XPS	100	0,035	0,85	11,27	0,96	12,23	1	-0,17	-2,53	-0,97	-3,50
	2O		Schaumglas	100	0,037	0,29	4,64	2,79	7,42	0	-0,01	-0,18	-0,04	-0,22
			Abdichtung (Sperrschicht)	3	0,93	0,05	3,18	0,28	3,47	1	-	-	-	-
		AD 2	Perimeterdämmung											
			XPS	160	0,035	1,36	18,03	1,53	19,57	1	-0,26	-4,05	-1,56	-5,60
			Schaumglas	170	0,037	0,50	7,88	4,73	12,62	0	-0,02	-0,29	-0,06	-0,35
			Abdichtung (Sperrschicht)	3	0,93	0,05	3,18	0,28	3,47	1	-	-	-	-
		ID 1	Klebe- & Spachtelputz	5	1	0,15	2,59	0,49	3,08	1	-	-	-	-
			Wärmedämmung											
			Vakuumsulationspaneel	20	0,007	0,36	8,05	1,22	9,27	0	-0,01	0,03	0,61	0,64
			Mineralwolle	100	0,035	0,08	1,03	0,21	1,24	0	-	-	-	-
			Holzfaser (flexibel)	100	0,039	0,07	1,50	0,67	2,17	0	-0,06	-1,26	1,02	-0,24
			Dampfsperre	0,2	0,22	0,04	0,55	0,05	0,60	1	-0,01	-0,14	-0,05	-0,19
			Gipskartonplatte	25		0,08	1,30	0,42	1,73	0	-	-	-	-
			Innenfarbe	0,2		0,06	1,14	0,18	1,32	3	-1,16E-04	-1,78E-03	-6,80E-04	-2,46E-03
		ID 2	Klebe- & Spachtelputz	5	1	0,15	2,59	0,49	3,08	1	-	-	-	-
			Wärmedämmung											
			Vakuumsulationspaneel	35	0,007	0,62	14,09	2,13	16,22	0	-0,02	0,05	1,06	1,11
			Mineralwolle	160	0,035	0,13	1,65	0,34	1,99	0	-	-	-	-
			Holzfaser (flexi)	180	0,039	0,12	2,71	1,20	3,91	0	-0,11	-2,26	1,83	-0,43
			Dampfsperre	0,2	0,22	0,04	0,55	0,05	0,60	1	-0,01	-0,14	-0,05	-0,19
			Gipskartonplatte	25		0,08	1,30	0,42	1,73	0	-	-	-	-
			Innenfarbe	0,2		0,06	1,14	0,18	1,32	3	-1,16E-04	-1,78E-03	-6,80E-04	-2,46E-03
AW	3A	AD 1	Perimeterdämmung											
Keller	3B		XPS	80	0,035	0,68	9,02	0,77	9,78	1	-0,13	-2,02	-0,78	-2,80
	3O		Schaumglas	100	0,037	0,29	4,64	2,79	7,42	0	-0,01	-0,18	-0,04	-0,22
			Abdichtung (Sperrschicht)	3	0,93	0,05	3,18	0,28	3,47	1	-	-	-	-
		AD 2	Perimeterdämmung											
			XPS	160	0,035	1,36	18,03	1,53	19,57	1	-0,26	-4,05	-1,56	-5,60
			Schaumglas	160	0,037	0,47	7,42	4,46	11,88	0	-0,02	-0,28	-0,06	-0,33
			Abdichtung (Sperrschicht)	3	0,93	0,05	3,18	0,28	3,47	1	-	-	-	-
		ID 1	Klebe- & Spachtelputz	5	1	0,15	2,59	0,49	3,08	1	-	-	-	-
			Wärmedämmung											
			Vakuumsulationspaneel	20	0,007	0,36	8,05	1,22	9,27	0	-0,01	0,03	0,61	0,64
			Mineralwolle	80	0,035	0,06	0,83	0,17	0,99	0	-	-	-	-
			Holzfaser (flexi)	100	0,039	0,07	1,50	0,67	2,17	0	-0,06	-1,26	1,02	-0,24
			Dampfsperre	0,2	0,22	0,04	0,55	0,05	0,60	1	-0,01	-0,14	-0,05	-0,19
			Gipskartonplatte	25		0,08	1,30	0,42	1,73	0	-	-	-	-
			Innenfarbe	0,2		0,06	1,14	0,18	1,32	3	-1,16E-04	-1,78E-03	-6,80E-04	-2,46E-03
		ID 2	Klebe- & Spachtelputz	5	1	0,15	2,59	0,49	3,08	1	-	-	-	-
			Wärmedämmung											
			Vakuumsulationspaneel	30	0,007	0,53	12,08	1,83	13,91	0	-0,02	0,04	0,91	0,95
			Mineralwolle	160	0,035	0,13	1,65	0,34	1,99	0	-	-	-	-
			Holzfaser (flexi)	180	0,039	0,12	2,71	1,20	3,91	0	-0,11	-2,26	1,83	-0,43
			Dampfsperre	0,2	0,22	0,04	0,55	0,05	0,60	1	-0,01	-0,14	-0,05	-0,19
			Gipskartonplatte	25		0,08	1,30	0,42	1,73	0	-	-	-	-
			Innenfarbe	0,2		0,06	1,14	0,18	1,32	3	-1,16E-04	-1,78E-03	-6,80E-04	-2,46E-03
Decke	2A													
ü. KG	2B	AD 1	Dämmung											
	2O	n. verfügb.	Vakuumsulationspaneel	10	0,007	0,18	4,03	0,61	4,64	0	-0,01	0,01	0,30	0,32
			EPS (25 kg/m³)	50	0,035	0,16	2,24	0,05	2,28	0	-0,03	-0,60	-0,12	-0,72
			Mineralwolle (Boden)	50	0,035	0,13	1,83	0,37	2,21	0	-	-	-	-
			Holzfaser	60	0,042	0,10	2,09	1,34	3,43	0	-0,14	-2,41	2,19	-0,21
			Kork	70	0,05	0,07	0,89	2,49	3,39	0	-0,05	-0,83	-0,32	-1,14
			Trennschicht PE-Folie	0,2	0,4	0,04	0,55	0,05	0,60	1	-0,01	-0,14	-0,05	-0,19
			Estrich Zement	45		0,44	3,24	0,84	4,08	0	-	-	-	-
			Fußbodenbelag Linoleum	3		0,61	6,90	6,83	13,73	2	-0,10	-1,50	-0,58	-2,07

oberste GD	3A	AD 1 kon begehbar	OSB-Platte	15	0,13	0,11	2,49	0,89	3,39	0	-0,07	-1,56	2,22	0,66			
			Wärmedämmung														
			EPS (25 kg/m³)	140	0,035	0,45	6,26	0,13	6,39	0	-0,10	-1,68	-0,33	-2,01			
			PU-Hartschaum	100	0,025	0,30	4,49	0,49	4,98	0	-0,05	-0,89	-0,25	-1,15			
			Mineralwolle	140	0,035	0,37	5,13	1,05	6,18	0	-	-	-	-			
	Dampfsperre	0,5	0,22	0,04	0,55	0,05	0,60	1	-0,01	-0,14	-0,05	-0,19					
			AD 1 öko begehbar	OSB-Platte	15	0,13	0,11	2,49	0,89	3,39	0	-0,07	-1,56	2,22	0,66		
				Wärmedämmung (88%) mit Tragkonstruktion Holz (12%)													
				Holzfasern (flex)	180	0,039	0,15	2,93	2,09	5,02	0	-0,25	-3,99	4,20	0,20		
				Hanfaser	180	0,039	0,15	2,29	3,00	5,30	0	-0,22	-3,31	2,30	-1,00		
				Zellulose Einblasdämmung	180	0,039	0,08	0,91	3,74	4,65	0	-0,22	-3,12	2,16	-0,96		
	Dampfsperre	0,2	0,22	0,04	0,55	0,05	0,60	1	-0,01	-0,14	-0,05	-0,19					
			AD 2 kon begehbar	OSB-Platte			0,11	2,49	0,89	3,39	0	-0,07	-1,56	2,22	0,66		
				Wärmedämmung													
				EPS (25 kg/m³)	300	0,035	0,97	13,41	0,27	13,69	0	-0,21	-3,59	-0,71	-4,31		
PU-Hartschaum				220	0,025	0,66	9,89	1,07	10,96	0	-0,12	-1,96	-0,56	-2,52			
Mineralwolle				300	0,035	0,80	10,99	2,24	13,24	0	-	-	-	-			
Dampfsperre	0,2	0,22	0,04	0,55	0,05	0,60	1	-0,01	-0,14	-0,05	-0,19						
		AD 2 öko begehbar	OSB-Platte	15	0,13	0,11	2,49	0,89	3,39	0	-0,07	-1,56	2,22	0,66			
			Wärmedämmung (88%) mit Tragkonstruktion Holz (12%)														
			Holzfasern (flex)	400	0,039	0,33	6,51	4,64	11,15	0	-0,55	-8,88	9,33	0,45			
			Hanfaser	400	0,039	0,34	5,10	6,67	11,77	0	-0,50	-7,35	5,12	-2,23			
			Zellulose Einblasdämmung	400	0,039	0,18	2,02	8,31	10,33	0	-0,49	-6,93	4,80	-2,13			
Dampfsperre	0,2	0,22	0,04	0,55	0,05	0,60	1	-0,01	-0,14	-0,05	-0,19						
Flachdach / Pultdach	2B	AD 1 Warm	Kiesabdeckung	50		0,03	0,53	0,10	0,63	1	-0,01	-0,08	-0,03	-0,11			
			Dachabdichtung 2-lagig	8	0,23	0,62	3,75	0,53	4,28	1	-0,13	-1,99	-0,75	-2,74			
			Wärmedämmung i. Gefälle														
			EPS (25 kg/m³)	160	0,035	0,52	7,15	0,15	7,30	0	-0,11	-1,92	-0,38	-2,30			
			PU-Hartschaum	120	0,025	0,36	5,39	0,59	5,99	0	-0,06	-1,07	-0,30	-1,37			
				Mineralwolle (Flachdach)	180	0,04	0,76	8,00	1,61	9,61	0	-	-	-	-		
				Holzfasern	200	0,042	0,33	6,96	4,46	11,42	0	-0,45	-8,03	7,32	-0,72		
				Kork	240	0,05	0,25	3,06	8,55	11,61	0	-0,19	-2,84	-1,08	-3,92		
				Dampfsperre	0,15		0,07	0,64	0,24	0,88	1	-0,01	-0,21	-0,04	-0,25		
						AD 2 Warm	Kiesabdeckung	50		0,03	0,53	0,10	0,63	1	-0,01	-0,08	-0,03	-0,11
	Dachabdichtung 2-lagig	8	0,23				0,62	3,75	0,53	4,28	1	-0,13	-1,99	-0,75	-2,74		
	Wärmedämmung i. Gefälle																
	EPS (25 kg/m³)	300	0,035				0,97	13,41	0,27	13,69	0	-0,21	-3,59	-0,71	-4,31		
	PU-Hartschaum	220	0,025				0,66	9,89	1,07	10,96	0	-0,12	-1,96	-0,56	-2,52		
				Mineralwolle (Flachdach)	340	0,04	1,44	15,11	3,03	18,15	0	-	-	-	-		
Holzfasern				360	0,042	0,60	12,53	8,02	20,55	0	-0,82	-14,46	13,17	-1,29			
Kork				420	0,05	0,43	5,35	14,96	20,31	0	-0,33	-4,97	-1,89	-6,86			
Dampfsperre				0,15		0,07	0,64	0,24	0,88	1	-0,01	-0,21	-0,04	-0,25			
					AD 1 Umkehr	Kiesabdeckung	50		0,03	0,53	0,10	0,63	1	-0,01	-0,08	-0,03	-0,11
	Trennlage, Vlies	1,3				0,13	1,84	0,17	2,01	1	-0,01	-0,21	-0,08	-0,29			
	Wärmedämmung																
	XPS	160	0,035			0,68	9,02	0,77	9,78	0	-0,13	-2,02	-0,78	-2,80			
	Schaumglasschotter	170	0,037			0,50	7,88	4,73	12,62	0	-0,02	-0,29	-0,06	-0,35			
			Dampfsperre, Bitumen 2-lag.	8	0,23	0,62	3,75	0,53	4,28	1	-0,13	-1,99	-0,75	-2,74			
					AD 2 Umkehr	Kiesabdeckung	50		0,03	0,53	0,10	0,63	1	-0,01	-0,08	-0,03	-0,11
						Trennlage, Vlies	1,3		0,13	1,84	0,17	2,01	1	-0,01	-0,21	-0,08	-0,29
						Wärmedämmung											
						XPS	300	0,035	1,27	16,91	1,44	18,34	0	-0,25	-3,79	-1,46	-5,25
Schaumglasschotter	320	0,037				0,94	14,84	8,91	23,75	0	-0,03	-0,55	-0,11	-0,67			
Dampfsperre, Bitumen 2-lag.	8	0,23	0,62	3,75	0,53	4,28	1	-0,13	-1,99	-0,75	-2,74						
Flachdach / Pultdach	3B	AD 1 3C	Kiesabdeckung	50		0,03	0,53	0,10	0,63	1	-0,01	-0,08	-0,03	-0,11			
			Dachabdichtung 2-lagig	10	0,23	0,62	3,75	0,53	4,28	1	-0,13	-1,99	-0,75	-2,74			
			Wärmedämmung i. Gefälle														
			EPS (25 kg/m³)	160	0,035	0,52	7,15	0,15	7,30	0	-0,11	-1,92	-0,38	-2,30			
			PU-Hartschaum	120	0,025	0,36	5,39	0,59	5,99	0	-0,06	-1,07	-0,30	-1,37			
				Mineralwolle	180	0,04	0,76	8,00	1,61	9,61	0	-	-	-	-		
				Holzfasern	200	0,042	0,33	6,96	4,46	11,42	0	-0,45	-8,03	7,32	-0,72		
				Kork	240	0,05	0,25	3,06	8,55	11,61	0	-0,19	-2,84	-1,08	-3,92		
				Dampfsperre	0,5		0,07	0,64	0,24	0,88	1	-0,01	-0,21	-0,04	-0,25		
						AD 2 Warm	Kiesabdeckung	50		0,03	0,53	0,10	0,63	1	-0,01	-0,08	-0,03	-0,11
	Dachabdichtung 2-lagig	10	0,23				0,62	3,75	0,53	4,28	1	-0,13	-1,99	-0,75	-2,74		
	Wärmedämmung i. Gefälle																
	EPS (25 kg/m³)	300	0,035				0,97	13,41	0,27	13,69	0	-0,21	-3,59	-0,71	-4,31		
	PU-Hartschaum	220	0,025				0,66	9,89	1,07	10,96	0	-0,12	-1,96	-0,56	-2,52		
				Mineralwolle	340	0,04	1,44	15,11	3,03	18,15	0	-	-	-	-		
Holzfasern				360	0,042	0,60	12,53	8,02	20,55	0	-0,82	-14,46	13,17	-1,29			
Kork				420	0,05	0,43	5,35	14,96	20,31	0	-0,33	-4,97	-1,89	-6,86			
Dampfsperre				0,5		0,07	0,64	0,24	0,88	1	-0,01	-0,21	-0,04	-0,25			
					AD 1 Umkehr	Kiesabdeckung	50		0,03	0,53	0,10	0,63	1	-0,01	-0,08	-0,03	-0,11
	Trennlage, Vlies	0,5				0,13	1,84	0,17	2,01	1	-0,01	-0,21	-0,08	-0,29			
	Wärmedämmung																
	XPS	160	0,035			0,68	9,02	0,77	9,78	0	-0,13	-2,02	-0,78	-2,80			
	Schaumglas	170	0,037			0,50	7,88	4,73	12,62	0	-0,02	-0,29	-0,06	-0,35			
Dampfsperre, Bitumen 2-lag.	10	0,23	0,62	3,75	0,53	4,28	1	-0,13	-1,99	-0,75	-2,74						
		AD 2 Umkehr	Kiesabdeckung	50		0,03	0,53	0,10	0,63	1	-0,01	-0,08	-0,03	-0,11			
			Trennlage, Vlies	5		0,13	1,84	0,17	2,01	1	-0,01	-0,21	-0,08	-0,29			
			Wärmedämmung														
			XPS	300	0,035	1,27	16,91	1,44	18,34	0	-0,25	-3,79	-1,46	-5,25			
			Schaumglas	320	0,037	0,94	14,84	8,91	23,75	0	-0,03	-0,55	-0,11	-0,67			
Dampfsperre, Bitumen 2-lag.	10	0,23	0,62	3,75	0,53	4,28	1	-0,13	-1,99	-0,75	-2,74						

Fenster	BAK	Neu	Holz-Fenster			keine Angaben aufgrund fehlender EPD									
	2 +3	1 (WSV)													
		Alle	Kunststoff-Fenster			3,36	57,23	3,16	60,38	1		-0,28	-6,16	-0,44	-6,60
			Holz-Alu-Fenster			keine Angaben aufgrund fehlender EPD									
		Neu	Holz-Fenster			2,64	37,38	28,45	65,83	1		-0,36	-5,12	-1,04	-6,16
		2 (Passiv)													
			Kunststoff-Fenster			4,02	66,42	3,95	70,36	1		-0,29	-6,20	-0,44	-6,64
			Holz-Alu-Fenster			8,15	95,02	49,61	144,63	1		-1,26	-18,68	-6,00	-24,68

Ökologische Bewertung

Bauteil	Typ	Bauteilaufbau			Ökologische Bewertung				Ökologische Bewertung + Kategorisierung								
		SM	Bauteilschicht	Dicke	Sanierungsmaßnahme Gesamt A-C				Sanierungsmaßnahme Gesamt A-C								
					GWP (ges.)	PE _{n.e.}	PE _{e.}	PE _{ges.}	GWP (ges.)	PE _{e.}	PE _{ges.}						
AW	2A	WDVS 1	Fassadenfarbe, Silikat-Dispersionsfarbe	0,3													
			Außenputz (Kalk-Zement)	15													
Giebel	2B		Wärmedämmung														
			EPS	120	0,77	10,48	1,22	11,70	50	3	10	5	22	2			
			PU-Hartschaum (aluka.)	100	0,90	12,88	2,06	14,94	64	4	14	5	33	2			
			Mineralwolle	120	0,65	8,11	1,94	10,05	37	2	19	5	17	1			
			Holzfasern	160	0,84	15,03	8,21	23,24	57	3	35	4	61	4			
			Kork	180	0,68	8,47	13,91	22,39	41	3	62	2	58	3			
			Klebe- & Spachtelputz	5													
			WDVS 2	Fassadenfarbe, Silikat-Dispersionsfarbe	0,3												
			Außenputz (Kalk-Zement)	15													
			Wärmedämmung														
EPS	220	1,16	15,97	1,34	17,31	90	5	8	5	41	3						
PU-Hartschaum	160	1,26	18,27	2,64	20,91	100	5	13	5	53	3						
Mineralwolle	220	0,93	11,62	2,66	14,28	66	4	19	5	31	2						
Holzfasern	260	1,18	21,99	12,67	34,66	91	5	37	4	100	5						
Kork	300	0,93	11,53	22,46	33,99	66	4	66	2	98	5						
Klebe- & Spachtelputz	5																
VF 1			Außenbekleidung Holz	24													
			Lattung (10%) mit Luftschicht	30													
			Fassadenbahn	5													
			Wärmedämmung														
			Mineralwolle	120	0,50	5,26	13,78	19,04	22	2	72	2	47	3			
Holzfasern	140	0,56	8,02	16,48	24,50	29	2	67	2	66	4						
Hanf	140	0,57	6,36	15,48	21,84	29	2	71	2	57	3						
VF 2			Außenbekleidung Holz	24													
			Lattung (10%) mit Luftschicht	30													
			Fassadenbahn	5													
			Wärmedämmung														
			Mineralwolle	220	0,64	7,02	14,14	21,16	36	2	67	2	54	3			
Holzfasern	260	0,76	12,20	19,15	31,35	49	3	61	2	89	5						
Hanf	240	0,50	5,79	16,34	22,13	22	2	74	2	58	3						
ID 1			Klebe- & Spachtelputz	5													
			Wärmedämmung														
			Vakuumsisolationspaneel	25	0,78	15,65	2,67	18,32	51	3	15	5	45	3			
			PU-Hartschaum alukas.	100	0,59	9,53	1,58	11,11	32	2	14	5	20	2			
			Mineralwolle	120	0,28	4,23	0,91	5,14	0	1	18	5	0	1			
			Holzfasern (flexi)	140	0,28	5,10	1,59	6,68	0	1	24	4	5	1			
			Hanf	140	0,29	4,53	2,40	6,93	1	1	35	4	6	1			
			Dampfbremse, PE	0,2													
			Gipskartonplatte	25													
			Innenfarbe Dispersionsfarbe	0,2													
ID 2			Klebe- & Spachtelputz	5													
			Wärmedämmung														
			Vakuumsisolationspaneel	45	1,14	23,70	3,88	27,59	87	5	14	5	76	4			
			PU-Hartschaum alukas.	160	0,77	12,22	1,87	14,10	50	3	13	5	30	2			
			Mineralwolle	220	0,36	5,26	1,12	6,38	9	1	17	5	4	1			
			Holzfasern (flexi)	240	0,35	6,60	2,25	8,85	7	1	25	4	13	1			
			Hanf	240	0,36	5,63	3,64	9,27	8	1	39	4	14	1			
			Dampfbremse	0,2													
			Gipskartonplatte	25													
			Innenfarbe Dispersionsfarbe	0,2													
Seriell 2	alt. Putz		Außenbekleidung Holz	24													
			Lattung (10%) mit Luftschicht	30													
			Holzfasernleichtbauplatte	40													
			Holzkonstruktion (12%-Holzanteil)														
			mit Wärmedämmung (88%)														
			Mineralwolle	180	0,74	10,77	17,61	28,39	47	3	62	2	79	4			
			Zellulose Einblasdämmung	200	0,66	9,60	20,41	30,01	39	2	68	2	84	5			
			Holzfasern (flexi)	200	0,74	11,85	18,57	30,42	47	3	61	2	86	5			
OSB-Platte	15																
Holzfasern dämmplatte	20																
AW	2B	WDVS 1	Fassadenfarbe, Silikat-Dispersionsfarbe	3													
			Außenputz (Kalk-Zement)	15													
			Wärmedämmung														
			EPS	140	0,85	11,58	1,25	12,83	58	3	10	5	25	2			
			PU-Hartschaum	100	0,90	12,88	2,06	14,94	64	4	14	5	33	2			
			Mineralwolle	140	0,70	8,87	2,08	10,96	43	3	19	5	19	1			
			Holzfasern	160	0,84	15,03	8,21	23,24	57	3	35	4	61	4			
			Kork	180	0,68	8,47	13,91	22,39	41	3	62	2	58	3			
Klebe- & Spachtelputz	5																

		ID 1	Klebe- & Spachtelputz	5															
			Wärmedämmung																
			Vakuuminisulationspaneel	25	0,78	15,65	2,67	18,32	51	3	15	5	46	3					
			PU-Hartschaum alukas.	80	0,53	8,63	1,49	10,11	27	2	15	5	17	1					
			Mineralwolle	120	0,28	4,23	0,91	5,14	1	1	18	5	0	1					
			Holzfaser (flexibel)	120	0,27	4,79	1,45	6,25	0	1	23	4	4	1					
			Hanf	120	0,27	4,31	2,15	6,46	0	1	33	4	5	1					
			Dampfbremse	0,2															
			Gipskartonplatte	25															
			Innenfarbe Dispersionsfarbe	0,2															
		ID 2	Klebe- & Spachtelputz	5															
			Wärmedämmung																
			Vakuuminisulationspaneel	40	1,05	21,69	3,58	25,27	78	4	14	5	70	4					
			PU-Hartschaum alukas.	140	0,71	11,33	1,78	13,10	45	3	14	5	28	2					
			Mineralwolle	200	0,35	5,05	1,07	6,13	8	1	18	5	3	1					
			Holzfaser (flexibel)	220	0,34	11,35	6,00	17,35	7	1	35	4	42	3					
			Hanf	220	0,34	5,41	3,39	8,80	7	1	39	4	13	1					
			Dampfbremse	0,2															
			Gipskartonplatte	25															
			Innenfarbe Dispersionsfarbe	0,2															
		Seriell 2	Außenbekleidung Holz	24															
		alt. Putz	Lattung (10%) mit Luftschicht	30															
			Holzfaserleichtbauplatte	40															
			Holzkonstruktion (X%-Holzanteil)																
			mit Wärmedämmung																
			Mineralwolle	180	0,74	10,77	17,61	28,39	48	3	62	2	81	5					
			Zellulose Einblasdämmung	180	0,65	9,50	19,99	29,49	39	2	68	2	84	5					
			Holzfaser	180	0,72	11,52	18,34	29,86	45	3	61	2	86	5					
			OSB-Platte	15															
			Holzfaserdämmplatte flexi	20															
AW	2A	AD 1	Perimeterdämmung																
Keller	2B		XPS	100	0,90	14,45	1,24	15,69	52	3	8	5	51	3					
	2O		Schaumglas	100	0,35	7,82	3,07	10,89	0	1	28	4	19	1					
			Abdichtung (Sperrschicht)	3															
		AD 2	Perimeterdämmung																
			XPS	160	1,41	21,21	1,82	23,03	100	5	8	5	100	5					
			Schaumglas	170	0,55	11,07	5,02	16,08	19	1	31	4	54	3					
			Abdichtung (Sperrschicht)	3															
		ID 1	Klebe- & Spachtelputz	5															
			Wärmedämmung																
			Vakuuminisulationspaneel	20	0,69	13,64	2,36	16,00	32	2	15	5	53	3					
			Mineralwolle	100	0,41	6,62	1,35	7,97	6	1	17	5	0	1					
			Holzfaser (flexibel)	100	0,40	7,09	1,81	8,90	5	1	20	4	6	1					
			Dampfsperre	0,2															
			Gipskartonplatte	25															
			Innenfarbe	0,2															
		ID 2	Klebe- & Spachtelputz	5															
			Wärmedämmung																
			Vakuuminisulationspaneel	35	0,96	19,68	3,27	22,95	57	3	14	5	99	5					
			Mineralwolle	160	0,46	7,23	1,48	8,71	11	1	17	5	5	1					
			Holzfaser (flexi)	180	0,46	8,29	2,34	10,63	10	1	22	4	18	1					
			Dampfsperre	0,2															
			Gipskartonplatte	25															
			Innenfarbe	0,2															
AW	3A	AD 1	Perimeterdämmung																
Keller	3B		XPS	80	0,73	12,20	1,05	13,25	36	2	8	5	36	2					
	3O		Schaumglas	100	0,35	7,82	3,07	10,89	0	1	28	4	21	2					
			Abdichtung (Sperrschicht)	3															
		AD 2	Perimeterdämmung																
			XPS	160	1,41	21,21	1,82	23,03	100	5	8	5	100	5					
			Schaumglas	160	0,52	10,60	4,74	15,34	16	1	31	4	50	3					
			Abdichtung (Sperrschicht)	3															
		ID 1	Klebe- & Spachtelputz	5															
			Wärmedämmung																
			Vakuuminisulationspaneel	20	0,69	13,64	2,36	16,00	32	2	15	5	54	3					
			Mineralwolle	80	0,40	6,41	1,31	7,72	5	1	17	5	0	1					
			Holzfaser (flexi)	100	0,40	7,09	1,81	8,90	5	1	20	4	8	1					
			Dampfsperre	0,2															
			Gipskartonplatte	25															
			Innenfarbe	0,2															
		ID 2	Klebe- & Spachtelputz	5															
			Wärmedämmung																
			Vakuuminisulationspaneel	30	0,87	17,66	2,97	20,63	49	3	14	5	84	5					
			Mineralwolle	160	0,46	7,23	1,48	8,71	11	1	17	5	6	1					
			Holzfaser (flexi)	180	0,46	8,29	2,34	10,63	10	1	22	4	19	1					
			Dampfsperre	0,2															
			Gipskartonplatte	25															
			Innenfarbe	0,2															

		AD 1	Kiesabdeckung	50													
		Umkehr	Trennlage, Vlies	0,5													
			Wärmedämmung														
			XPS	160	1,70	10,54	1,63	12,17	41	3	13	5	26	2			
			Schaumglas	170	1,52	9,41	5,60	15,01	26	2	37	4	41	3			
			Dampfsperre, Bitumen 2-lag.	10													
		AD 2	Kiesabdeckung	50													
		Umkehr	Trennlage, Vlies	5													
			Wärmedämmung														
			XPS	300	2,29	18,43	2,30	20,73	91	5	11	5	70	4			
			Schaumglas	320	1,96	16,36	9,78	26,14	63	4	37	4	99	5			
			Dampfsperre, Bitumen 2-lag.	10													
Fenster	BAK	Neu	Holz-Fenster														
	2 +3	1 (WSV)															
	Alle		Kunststoff-Fenster		3,36	57,23	3,16	60,38	13	1	5	5	0	1			
			Holz-Alu-Fenster														
		Neu	Holz-Fenster		2,64	37,38	28,45	65,83	0	1	43	3	6	1			
		2 (Passiv)															
			Kunststoff-Fenster		4,02	66,42	3,95	70,36	25	2	6	5	12	1			
			Holz-Alu-Fenster		8,15	95,02	49,61	144,63	100	5	34	4	100	5			

Anhang VI

Energetische Bewertung

BAK	Typ	Bauteil	U-Wert Bestand [W/(m ² K)]	Ziel U-Wert [W/(m ² K)]	energet. Einsparung [%]	Gebäudetyp- bezogen		Baualtersklassen- übergreifend	
						% Einteil- ung	Kenn- zahl	% Einteil- ung	Kenn- zahl
2	A	AW	1,40	0,24	82,9	64,2	2	73,4	2
				0,15	89,3	83,5	1	87,8	1
		Wände gg.	1,40	0,30	78,6	51,3	3	63,8	2
		Erdreich		0,19	86,4	74,9	2	81,4	1
		Decke gg.	1,30	0,50	61,5	0,0	5	25,8	4
		Erdreich oder		0,30	76,9	46,3	3	60,1	2
		unbeheizte Räume		0,19	85,4	71,8	2	79,1	2
		Decke gg.	2,10	0,24	88,6	81,4	1	86,2	1
		unbeheizte Dachräume		0,11	94,8	100,0	1	100,0	1
		Fenster	5,00	1,30	74,0	37,5	4	53,6	3
				0,80	84,0	67,6	2	76,0	2
2	B	AW	1,40	0,24	82,9	74,4	2	73,4	2
				0,15	89,3	89,8	1	87,8	1
		Wände gg.	1,40	0,30	78,6	64,1	2	63,8	2
		Erdreich		0,19	86,4	83,0	1	81,4	1
		Decke gg.	1,30	0,50	61,5	23,2	4	25,8	4
		Erdreich oder		0,30	76,9	60,2	2	60,1	2
		unbeheizte Räume		0,19	85,4	80,5	1	79,1	2
		Dachfläche	1,70	0,20	88,2	87,3	1	85,4	1
				0,11	93,5	100,0	1	97,2	1
		Fenster	2,70	1,30	51,9	0,0	5	4,1	5
				0,80	70,4	44,4	3	45,5	3
2	O	AW	1,40	0,24	82,9	64,2	2	73,4	2
				0,15	89,3	83,5	1	87,8	1

		Wände gg.	1,40	0,30	78,6	51,3	3	63,8	2
		Erdreich		0,19	86,4	74,9	2	81,4	1
		Decke gg.	1,30	0,50	61,5	0,0	5	25,8	4
		Erdreich oder		0,30	76,9	46,3	3	60,1	2
		unbeheizte Räume		0,19	85,4	71,8	2	79,1	2
		Decke gg.	2,10	0,24	88,6	81,4	1	86,2	1
		unbeheizte Dachräume		0,11	94,8	100,0	1	100,0	1
		Fenster	5,00	1,30	74,0	37,5	4	53,6	3
				0,80	84,0	67,6	2	76,0	1
3	A	AW	1,00	0,24	76,0	76,5	2	58,1	3
				0,15	85,0	100,0	1	78,2	2
		Wände gg.	1,00	0,30	70,0	57,1	3	44,7	3
		Erdreich		0,19	81,0	88,6	1	69,3	2
		Decke gg.	1,00	0,50	50,0	0,0	5	0,0	5
		Erdreich oder		0,30	70,0	57,1	3	44,7	3
		unbeheizte Räume		0,19	81,0	88,6	1	69,3	2
		Decke gg.	0,60	0,24	60,0	28,6	4	22,3	4
		unbeheizte Dachräume		0,11	81,7	90,5	1	70,7	2
		Fenster	5,00	1,30	74,0	68,6	2	53,6	3
				0,80	84,0	97,1	1	76,0	2
3	B	AW	1,00	0,24	76,0	62,6	2	58,1	3
				0,15	85,0	84,3	1	78,2	2
		Wände gg.	1,00	0,30	70,0	48,1	3	44,7	3
		Erdreich		0,19	81,0	74,6	2	69,3	2
		Decke gg.	1,00	0,50	50,0	0,0	5	0,0	5
		Erdreich oder		0,30	70,0	48,1	3	44,7	3
		unbeheizte Räume		0,19	81,0	74,6	2	69,3	2
		Flachdach	1,30	0,20	84,6	83,3	1	77,3	2
				0,11	91,5	100,0	1	92,8	1
		Fenster	2,70	1,30	51,9	4,5	5	4,1	5

				0,80	70,4	49,0	3	45,5	3
3	O	AW	1,00	0,24	76,0	62,6	2	35,1	4
				0,15	85,0	84,3	1	63,8	2
		Wände gg.	1,00	0,30	70,0	48,1	3	44,7	3
		Erdreich		0,19	81,0	74,6	2	69,3	2
		Decke gg.	1,00	0,50	50,0	0,0	5	0,0	5
		Erdreich oder		0,30	70,0	48,1	3	44,7	3
		unbeheizte Räume		0,19	81,0	74,6	2	69,3	2
		Flachdach	1,30	0,20	84,6	83,3	1	77,3	2
				0,11	91,5	100,0	1	92,8	1
		Fenster	2,70	1,30	51,9	4,5	5	4,1	5
				0,80	70,4	49,0	3	45,5	3
		80-100 %	1						
		60-80 %	2						
		40-60 %	3						
		20-40 %	4						
		0-20 %	5						

Anhang VII

Ökonomische Bewertung:

Bauteil	Typ	Bauteilaufbau Sanierungsmaßnahme				U-Wert	Kosten SM [€]	Kosten Ges. K [€]	Ökonomische Bewertung + Kategorisierung				
		SM	Bauteilschicht	Dicke	WLG				Differenz U-Wert	Jährl. Einsparung k	Amortisationszeit		
AW	2A	WDVS 1	Fassadenfarbe, Silikat-Dispensionsfarbe	0,3		≤ 0,24			1,16	12,54	14,08	1	
	2B		Außenputz (Kalk-Zement)	15									
	2O		Wärmedämmung										
			EPS	120	0,035		145	145					
			PU-Hartschaum	100	0,027		167	167					
			Mineralwolle	120	0,035		163	163					
			Holzfaser	160	0,042		174	174					
			Kork	180	0,05		k.A.	k.A.					
			Klebe- & Spachtelputz	5									
		WDVS 2	Fassadenfarbe, Silikat-Dispensionsfarbe	0,3		≤ 0,15			1,25	13,52	15,70	1	
			Außenputz (Kalk-Zement)	15									
			Wärmedämmung										
			EPS	220	0,035		171	171					
			PU-Hartschaum	160	0,025		188	188					
			Mineralwolle	220	0,035		189	189					
			Holzfaser	260	0,042		207	207					
			Kork	300	0,05		k.A.	k.A.					
			Klebe- & Spachtelputz	5									
	VF 1	Außenbekleidung Holz	24		≤ 0,24			1,16	12,54	27,58	3		
		Lattung (10%) mit Luftschicht	30										
		Fassadenbahn	5										
		Wärmedämmung											
		Mineralwolle	120	0,035		244	244						
		Holzfaser	140	0,042		257	257						
			Hanf	140	0,039	260	260		29,73	3			
									30,25	3			
	VF 2	Außenbekleidung Holz	24		≤ 0,15			1,25	13,52	28,80	3		
		Lattung (10%) mit Luftschicht	30										
		Fassadenbahn	5										
		Wärmedämmung											
		Mineralwolle	220	0,035		271	271						
		Holzfaser	260	0,042		303	303						
			Hanf	240	0,039	299	299		34,08	4			
									33,38	4			

		ID 1	(Klebe- & Spachtelputz)	5									
			Wärmedämmung										
			Vakuumisolationspaneel	25	0,007		254	254				29,22	3
			PU-Hartschaum alukas.	100	0,025		124	124				11,71	1
			Mineralwolle	120	0,035	≤ 0,24	107	107	1,16	12,54		9,89	1
			Holzfaser (flexi)	140	0,039		113	113				10,53	1
			Hanf	140	0,039		113	113				10,53	1
			Dampfbremse, PE	0,2									
			Innenputz /	10									
			Gipskartonplatte	25									
			Innenfarbe Dispersionsfarbe	0,2									
		ID 2	(Klebe- & Spachtelputz)	5									
			Wärmedämmung										
			Vakuumisolationspaneel	45	0,007		359	359				45,36	5
			PU-Hartschaum alukas.	160	0,025		137	137				12,06	1
			Mineralwolle	220	0,035	≤ 0,15	117	117	1,25	13,52		10,06	1
			Holzfaser (flexi)	240	0,39		126	126				10,95	1
			Hanf	240	0,039		127	127				11,05	1
			Dampfbremse	0,2									
			Innenputz /	10									
			Gipskartonplatte	25									
			Innenfarbe Dispersionsfarbe	0,2									
		Seriell 2	Außenbekleidung Holz	24									
		alt. Putz	Lattung (10%) mit Luftschicht	30									
			Holzfaserleichtbauplatte	40	0,042								
			Holzkonstruktion (12%-Holzanteil)										
			mit Wärmedämmung (88%)			≤ 0,15			1,25	13,52			
			Mineralwolle	180	0,035		367	367				47,26	5
			Zellulose Einblasdämmung	200	0,039		357	357				44,90	5
			Holzfaser (flexi)	200	0,039		379	379				50,29	
			OSB-Platte	15									
			Holzfaserdämmplatte	20	0,039								
AW	2B	WDVS 1	Fassadenfarbe, Silikat-Dispersionsfarbe	3									
Brüstung			Außenputz (Kalk-Zement)	15		≤ 0,24			1,56	16,87			
			Wärmedämmung										
			EPS	140	0,035		148	148				10,22	1
			PU-Hartschaum	100	0,025		167	167				11,73	1
			Mineralwolle	140	0,035		167	167				11,73	1

		Holzfaser	160	0,042		174	174			12,31	2	
		Kork	180	0,05		k.A.	k.A.					
		Klebe- & Spachtelputz	5									
		WDVS 2	Fassadenfarbe, Silikat-Dispersionsfarbe	3								
			Außenputz (Kalk-Zement)	15								
			Wärmedämmung									
			EPS	220	0,035	≤	171	171	1,65	17,84	11,30	1
			PU-Hartschaum	160	0,025	0,15	188	188			12,62	2
			Mineralwolle	220	0,035		189	189			12,70	2
			Holzfaser	260	0,042		207	207			14,14	2
			Kork	300	0,05		k.A.	k.A.				
			Klebe- & Spachtelputz	5								
		VF 1	Außenbekleidung Holz	24								
			Lattung (10%) mit Luftschicht	30								
			Fassadenbahn	5								
			Wärmedämmung			≤			1,56	16,87		
			Mineralwolle	140	0,035	0,24	250	250			19,13	3
			Holzfaser	160	0,042		263	263			20,41	3
			Hanf	140	0,039		260	260			20,11	3
		VF 2	Außenbekleidung Holz	24								
			Lattung (10%) mit Luftschicht	30								
			Fassadenbahn	5								
			Wärmedämmung			≤			1,65	17,84		
			Mineralwolle	220	0,035	0,15	271	271			19,74	3
			Holzfaser	260	0,042		303	303			22,85	4
			Hanf	240	0,039		299	299			22,45	4
		ID 1	(Klebe- & Spachtelputz)	5								
			Wärmedämmung									
			Vakuuminisolationpaneel	25	0,007		254	254			19,52	3
			PU-Hartschaum alukas.	100	0,025		124	124			8,37	1
			Mineralwolle	140	0,035	≤	108	108	1,56	16,87	7,19	1
			Holzfaser (flexibel)	140	0,039	0,24	113	113			7,56	1
			Hanf	140	0,039		113	113			7,56	1
			Dampfbremse	0,2								
			Innenputz /	10								
			Gipskartonplatte	25								
			Innenfarbe Dispersionsfarbe	0,2								
		ID 2	(Klebe- & Spachtelputz)	5		≤			1,65	17,84		
			Wärmedämmung			0,15						

			Vakuumisolationspaneel	45	0,007		359	359			28,95	5
			PU-Hartschaum alukas.	160	0,025		137	137			8,79	1
			Mineralwolle	220	0,035		117	117			7,38	1
			Holzfaser (flexibel)	240	0,039		126	126			8,01	1
			Hanf	240	0,039		127	127			8,08	1
			Dampfbremse	0,2								
			Innenputz /	10								
			Gipskartonplatte	25								
			Innenfarbe Dispersionsfarbe	0,2								
		Seriell 2	Außenbekleidung Holz	24								
		alt. Putz	Lattung (10%) mit Luftschicht	30								
			Holzfaserleichtbauplatte	40	0,42							
			Holzkonstruktion (X%-Holzanteil)									
			mit Wärmedämmung			≤ 0,15			1,65	17,84		
			Mineralwolle	180	0,035		367	367			29,91	5
			Zellulose Einblasdämmung	200	0,039		357	357			28,72	5
			Holzfaser	200	0,039		379	379			31,38	5
			OSB-Platte	15								
			Holzfaserdämmplatte	20								
AW	3A	WDVS 1	Fassadenfarbe, Silikat-Dispersionsfarbe	0,3								
	3B		Außenputz (Kalk-Zement)	15								
	3O		Wärmedämmung									
			EPS	120	0,035	≤ 0,24	145	145	0,76	8,22	24,06	3
			PU-Hartschaum	80	0,025		160	160			27,61	4
			Mineralwolle	120	0,035		163	163			28,36	4
			Holzfaser	140	0,042		168	168			29,63	4
			Kork	160	0,05		k.A.	k.A.				
			Klebe- & Spachtelputz	5								
		WDVS 2	Fassadenfarbe, Silikat-Dispersionsfarbe	0,3								
			Außenputz (Kalk-Zement)	15								
			Wärmedämmung									
			EPS	200	0,035	≤ 0,15	168	168	0,85	9,19	25,26	3
			PU-Hartschaum	160	0,025		188	188			29,66	4
			Mineralwolle	200	0,035		183	183			28,51	4
			Holzfaser	240	0,042		202	202			33,05	5
			Kork	300	0,05		k.A.	k.A.				
			Klebe- & Spachtelputz	5								
		VF 1	Außenbekleidung Holz	24		≤ 0,24			0,76	8,22		

			mit Wärmedämmung													
			Mineralwolle	180	0,035			367	367				#ZAHL!			
			Zellulose Einblasdämmung	180	0,039			352	352				#ZAHL!			
			Holzfaser	180	0,039			372	372				#ZAHL!			
			OSB-Platte	15												
			Mineralfaserdämmma tte	20	0,041											
AW	2A	AD 1	Perimeterdämmung													
Kelle r	2B		XPS	100	0,035	≤ 0,3		83	83	1,10	11,90		7,91	1		
	2O		Schaumglas	100	0,037				175			175			18,95	3
			Abdichtung (Sperrschicht)	3												
		AD 2	Perimeterdämmung													
			XPS	160	0,035	≤ 0,19		93	93	1,21	13,09		8,07	1		
			Schaumglas	170	0,037				227			227			23,52	3
			Abdichtung (Sperrschicht)	3												
		ID 1	(Klebe- & Spachtelputz) Wärmedämmung	5												
			Vakuumisolationssp aneel	20	0,007	≤ 0,3		229	229	1,10	11,90		27,17	4		
			Mineralwolle	100	0,035				103			103			10,06	1
			Holzfaser (flexibel)	100	0,039				108			108			10,62	1
			Dampfsperre	0,2												
			Innenputz /	10												
			Gipskartonplatte	25												
			Innenfarbe	0,2												
		ID 2	(Klebe- & Spachtelputz) Wärmedämmung	5												
			Vakuumisolationssp aneel	35	0,007	≤ 0,19		300	300	1,21	13,09		35,31	5		
			Mineralwolle	160	0,035				111			111			9,83	1
			Holzfaser (flexi)	180	0,039				118			118			10,54	1
			Dampfsperre	0,2												
			Innenputz /	10												
			Gipskartonplatte	25												
			Innenfarbe	0,2												
AW	3A	AD 1	Perimeterdämmung													
Kelle r	3B		XPS	80	0,035	≤ 0,3		80	80	0,70	7,57		12,66	1		
	3O		Schaumglas	100	0,037				175			175			35,78	5
			Abdichtung (Sperrschicht)	3												
		AD 2	Perimeterdämmung							0,81	8,76					

			XPS	160	0,035		93	93			12,73	1
			Schaumglas	160	0,037	≤ 0,19	220	220			41,07	5
			Abdichtung (Sperrschicht)	3								
		ID 1	Klebe- & Spachtelputz	5								
			Wärmedämmung									
			Vakuumisolationspaneel	20	0,007	≤ 0,3	229	229	0,70	7,57	59,00	
			Mineralwolle	80	0,035		101	101			16,76	1
			Holzfaser (flexi)	100	0,039		108	108			18,23	1
			Dampfsperre	0,2								
			Innenputz /	10								
			Gipskartonplatte	25								
			Innenfarbe	0,2								
		ID 2	Klebe- & Spachtelputz	5								
			Wärmedämmung									
			Vakuumisolationspaneel	30	0,007	≤ 0,19	277	277	0,81	8,76	65,52	
			Mineralwolle	160	0,035		111	111			15,73	1
			Holzfaser (flexi)	180	0,039		118	118			16,96	1
			Dampfsperre	0,2								
			Innenputz /	10								
			Gipskartonplatte	25								
			Innenfarbe	0,2								
Decke	2A	AD 1	Dämmung									
ü. KG	2B		Vakuumisolationspaneel	10	0,007	≤ 0,5	176	203,5	0,80	8,65	36,80	5
	2O		EPS	50	0,035		78	105,5			15,02	1
			Mineralwolle (Boden)	50	0,035		91	118,5			17,32	2
			Holzfaser	60	0,042		99	126,5			18,80	2
			Kork	70	0,05		k.A	k.A				
			Trennschicht PE-Folie	0,2								
			Estrich Zement	45								
			Fußbodenbelag Linoleum	2,5								
		AD 2	Dämmung									
			Vakuumisolationspaneel	35	0,007	≤ 0,19	277	304,5	1,11	12,00	41,79	5
			EPS	160	0,035		91	118,5			11,70	1
			Mineralwolle (Boden)	160	0,035		131	158,5			16,55	2
			Holzfaser	200	0,042		165	192,5			21,18	2
			Kork	240	0,05		k.A	k.A				
			Trennschicht PE-Folie	0,2	0,4							
			Estrich	45								
			Fußbodenbelag Linoleum	2,5								

			Gipskartonplatte	12,5									
			Innenfarbe	2									
		UD 2	Klebe- & Spachtelputz	5									
			Wärmedämmung										
			EPS	160	0,035	≤ 0,19	112	112	0,81	8,76	15,91	1	
			PU-Hartschaum	120	0,025		112	112			15,91	1	
			Mineralwolle	160	0,035		98	98			13,54	1	
			Holzfaser	180	0,042		105	105			14,71	1	
			Hanf	180	0,039		108	108			15,22	1	
			Gipskartonplatte	12,5									
			Innenfarbe	2									
Boden	2A	AD 1	Abdichtung/ Dampfsperre	0,2									
gg-ER	2B		Dämmung										
	2O		Vakuumisolationspaneel	15	0,007	≤ 0,5	200	200	0,80	8,65	35,78	5	
Keller			PU-Hartschaum	40	0,023		92	92			12,76	1	
			Mineralwolle (Boden)	60	0,035		102	102			14,42	1	
			Holzfaser	80	0,042		123	123			18,15	2	
			Kork	80	0,05		k.A.	k.A.					
			Trennschicht PE-Folie	0,2									
			Estrich	45									
			Fußbodenbelag Linoleum	2,5									
		AD 2	Abdichtung/ Dampfsperre	0,2									
			Dämmung										
			Vakuumisolationspaneel	35	0,007	≤ 0,19	286	286	1,11	12,00	37,58	5	
			PU-Hartschaum	120	0,023		110	110			10,74	1	
			Mineralwolle (Boden)	180	0,035		145	145			14,85	1	
			Holzfaser	200	0,042		178	178			19,14	2	
			Kork	240	0,05		k.A.	k.A.					
			Trennschicht PE-Folie	0,2									
			Estrich	45									
			Fußbodenbelag Linoleum	2,5									
EG		AD 1	Abdichtung/ Dampfsperre	0,2									
			Dämmung										
			Vakuumisolationspaneel	15	0,007	≤ 0,5	200	227,5	0,80	8,65	44,55	5	
			PU-Hartschaum	40	0,023		92	119,5			17,50	1	
			Mineralwolle (Boden)	60	0,035		102	129,5			19,37	1	
			Holzfaser	80	0,042		123	150,5			23,61	2	
			Kork	80	0,05		k.A.	k.A.					

			Trennschicht PE-Folie	0,2										
			Estrich	45										
			Fußbodenbelag Linoleum	2,5										
		AD 2	Abdichtung/Dampfsperre	0,2										
			Dämmung											
			Vakuumisolationspaneel	35	0,007		286	313,5		1,11	12,00	44,00	5	
			PU-Hartschaum	120	0,023		110	137,5				13,93	1	
			Mineralwolle (Boden)	180	0,035		145	172,5				18,39	1	
			Holzfaser	200	0,042	≤ 0,19	178	205,5				23,10	2	
			Kork	240	0,05		k.A.	k.A.						
			Trennschicht PE-Folie	0,2										
			Estrich	45										
			Fußbodenbelag Linoleum	2,5										
Boden	3A	AD 1	Abdichtung/Dampfsperre	0,2										
gg. ER	3B		Dämmung											
	3O		Vakuumisolationspaneel	15	0,007		200	200				111,75		
Keller			PU-Hartschaum	40	0,023		92	92				22,91	2	
			Mineralwolle (Boden)	60	0,035		102	102		0,50	5,41	26,40	3	
			Holzfaser	80	0,042	≤ 0,5	123	123				34,88	5	
			Kork	80	0,05		k.A.	k.A.						
			Trennschicht PE-Folie	0,2										
			Estrich	45										
			Fußbodenbelag Linoleum	2,5										
		AD 2	Abdichtung/Dampfsperre	0,2										
			Dämmung											
			Vakuumisolationspaneel	35	0,007		286	286				71,19		
			PU-Hartschaum	120	0,023		110	110				15,56	1	
			Mineralwolle (Boden)	180	0,035		145	145		0,81	8,76	22,09	2	
			Holzfaser	200	0,042	≤ 0,19	178	178				29,38	4	
			Kork	240	0,05		k.A.	k.A.						
			Trennschicht PE-Folie	0,2										
			Estrich	45										
			Fußbodenbelag Linoleum	2,5										
EG		AD 1	Abdichtung/Dampfsperre	0,2										
			Dämmung											
			Vakuumisolationspaneel	15	0,007	≤ 0,5	200	231		0,50	5,41	#ZAHL!		
			PU-Hartschaum	40	0,023		92	123				34,88	4	

			Mineralwolle (Boden)	60	0,035		102	133			39,63	5
			Holzfaser	80	0,042		123	154			51,90	
			Kork	80	0,05		k.A.	k.A.				
			Trennschicht PE-Folie	0,2								
			Estrich	45								
			Fußbodenbelag Linoleum	2,5								
		AD 2	Abdichtung/ Dampfsperre	0,2								
			Dämmung									
			Vakuumisulationspaneel	35	0,007							
			PU-Hartschaum	120	0,023		286	317			100,61	
			Mineralwolle (Boden)	180	0,035	\leq	110	141	0,81	8,76	21,29	1
			Holzfaser	200	0,042	0,19	145	176			28,90	3
			Kork	240	0,05		178	209			37,67	5
			Trennschicht PE-Folie	0,2			k.A.	k.A.				
			Estrich	45								
			Fußbodenbelag Linoleum	2,5								
obers	2A	AD 1	OSB-Platte	15								
te		kon										
GD	2O	begehbar	Wärmedämmung									
			EPS	140	0,035	\leq	53	53	1,86	20,11	2,81	1
			PU-Hartschaum	100	0,025	0,24	64	64			3,42	1
			Mineralwolle (Boden)	140	0,035		64	64			3,42	1
			Dampfsperre	0,2								
		AD 2	OSB-Platte									
		kon										
		begehbar	Wärmedämmung									
			EPS	300	0,035	\leq	71	71	1,99	21,52	3,55	1
			PU-Hartschaum	220	0,025	0,11	96	96			4,87	2
			Mineralwolle (Boden)	300	0,035		96	96			4,87	2
			Dampfsperre	0,2								
		AD 1	OSB-Platte	15								
		öko										
		begehbar	Wärmedämmung (88%) mit Tragkonstruktion Holz (12%)									
		Mehr-	Holzfaser (flexi)	180	0,039	\leq	86	86	1,86	20,11	4,66	2
		kosten	Hanffaser	180	0,039	0,24	90	90			4,89	2
		durch	Zellulose Einblasdämmung	180	0,039		67	67			3,58	1
		Konstr.	Dampfsperre	0,2								
		AD 2	OSB-Platte	15		\leq			1,99	21,52		
		öko				0,11						

		begehbar	Wärmedämmung (88%) mit Tragkonstruktion Holz (12%)											
			Holzfaser (flexi)	400	0,039		145	145				7,61	5	
			Hanfaser	400	0,039		152	152				8,01	5	
			Zellulose Einblasdämmung	400	0,039		104	104				5,31	3	
			Dampfsperre	0,2										
oberste	3A	AD 1 kon	OSB-Platte	15										
GD		begehbar	Wärmedämmung											
			EPS	140	0,035	≤ 0,24	53	75,5	0,36	3,89		27,46	1	
			PU-Hartschaum	100	0,025		64	86,5				33,61	2	
			Mineralwolle	140	0,035		64	86,5				33,61	2	
			Dampfsperre	0,5										
		AD 2 kon	OSB-Platte											
		begehbar	Wärmedämmung											
			EPS	300	0,035	≤ 0,11	71	93,5	0,49	5,30		24,07	1	
			PU-Hartschaum	220	0,025		96	118,5				33,95	2	
			Mineralwolle	300	0,035		96	118,5				33,95	2	
			Dampfsperre	0,2										
		AD 1 öko	OSB-Platte	15										
		begehbar	Wärmedämmung (88%) mit Tragkonstruktion Holz (12%)											
		Mehr-	Holzfaser (flexi)	180	0,039	≤ 0,24	86	108,5	0,36	3,89		49,70	5	
		kosten	Hanfaser	180	0,039		90	112,5				53,46	0	
		durch	Zellulose Einblasdämmung	180	0,039		67	89,5				35,47	3	
		Konstr.	Dampfsperre	0,2										
		AD 2 öko	OSB-Platte	15										
		begehbar	Wärmedämmung (88%) mit Tragkonstruktion Holz (12%)											
			Holzfaser (flexi)	400	0,039	≤ 0,11	145	167,5	0,49	5,30		65,45		
			Hanfaser	400	0,039		152	174,5				72,88		
			Zellulose Einblasdämmung	400	0,039		104	126,5				37,70	3	
			Dampfsperre	0,2										
Flach-	2B	AD 1	Kiesabdeckung	50										
dach /		Warm	Dachabdichtung 2-lagig	8										
Pultdach			Wärmedämmung i. Gefälle			≤ 0,2			1,50	16,22				
			EPS	160	0,035		98	121,6				8,56	1	
			PU-Hartschaum	120	0,025		121	144,6				10,40	1	

			Mineralwolle (Flachdach)	180	0,04		116	139,6			9,99	1
			Holzfaser	200	0,042		154	177,6			13,20	2
			Kork	240	0,05		k.A.	k.A.				
			Dampfsperre	0,15								
		AD 2	Kiesabdeckung	50								
		Warm	Dachabdichtung 2-lagig	8								
			Wärmedämmung i. Gefälle									
			EPS	300	0,035	$\leq 0,11$	116	139,6	1,59	17,19	9,36	1
			PU-Hartschaum	220	0,025		157	180,6			12,57	2
			Mineralwolle (Flachdach)	340	0,04		151	174,6			12,09	2
			Holzfaser	360	0,042		216	239,6			17,69	3
			Kork	420	0,05		k.A.	k.A.				
			Dampfsperre	0,15								
		AD 1	Kiesabdeckung	50								
		Umkehr	Trennlage, Vlies	1,3								
			Wärmedämmung									
			XPS	160	0,035	$\leq 0,2$	83	106,6	1,50	16,22	7,40	1
			Schaumglasschotter	170	0,037		201	224,6			17,55	3
			Dampfsperre, Bitumen 2-lag.	8								
		AD 2	Kiesabdeckung	50								
		Umkehr	Trennlage, Vlies	1,3								
			Wärmedämmung									
			XPS	300	0,035	$\leq 0,11$	120	143,6	1,59	17,19	9,66	1
			Schaumglasschotter	320	0,037		324	347,6			29,16	5
			Dampfsperre, Bitumen 2-lag.	8								
Flachdach / Pultdach	3B	AD 1	Kiesabdeckung	50								
	3O	Warm	Dachabdichtung 2-lagig	10								
			Wärmedämmung i. Gefälle									
			EPS	160	0,035	$\leq 0,2$	98	136,89	1,10	11,90	14,01	1
			PU-Hartschaum	120	0,025		121	159,89			16,92	2
			Mineralwolle	180	0,04		116	154,89			16,27	2
			Holzfaser	200	0,042		154	192,89			21,49	3
			Kork	240	0,05		k.A.	k.A.				
			Dampfsperre	0,5								
		AD 2	Kiesabdeckung	50								
		Warm	Dachabdichtung 2-lagig	10		$\leq 0,11$			1,19	12,87		
			Wärmedämmung i. Gefälle									

		Holz-Alu-Fenster	1,1		911,3 1	976,2 6			#ZAHL!	
		Kunststoff-Fenster	1,1		540,3 5	605,3			#ZAHL!	
		Austausch	Holz-Fenster	0,7	654,5 8	719,5 3			88,38	
		2 (Passiv)	3-fach WSV							
		Holz-Alu-Fenster	0,7	0,8	971,9 3	1036,88	1,90	20,55	#ZAHL!	
		3-fach WSV								
		Kunststoff-Fenster	0,7		590,8 6	655,8 1			67,07	
		3-fach WSV								

Die Investitionskosten wurden auf Grundlage des BKI in Ergänzung mit Herstellerangaben nach aktuellem Stand ermittelt.

Allgemeine Angaben:

Gradtagzahl		Energieeinsparung
3755	Kd	90,12

Energiepreis Erdgas	
0,12	€

Differenz U-Wert

Jährlicher Zinssatz		q
4,25	%	1,0425

Jährliche Energiepreissteigerung		y
1,72	%	1,0172

Kosten Rückbau (nach Angaben des BKI):

Bauteil	Typ	Bauteilschicht Rückbau	Kosten Rückbau
AW	2A	kein Rückbau	-
	-		
	3O		
AW	2A	kein Rückbau	-
Keller	-		
	3O		
Decke	2A	Fußbodenbelag Lino	27,50 €
ü. KG	2B	Hartfaserplatte	
	2O	Estrich Mineralfaserdämm.	
Decke	3A	Fußbodenbelag Lino	31,00 €
ü. KG	3B	Hartfaserplatte	
	3O	Estrich Mineralfaserdämm.	
Boden	2A	kein Rückbau	-
gg. ER	2B		
Keller	2O		
EG		Fußbodenbelag Lino Estrich Mineralfaserdämm.	27,50 €
Boden	3A	kein Rückbau	-
gg. ER	3B		
Keller	3O		
EG		Fußbodenbelag Lino Hartfaserplatte Estrich Mineralfaserdämm.	31,00 €
oberste	2A	kein Rückbau	-
GD	2O		
oberste	3A	Estrich	22,50 €
GD		Mineralfaserdämm.	
Flach-	2B	Abdichtung 2-lagig	23,60 €
dach /			
Pulldach			
Flach-	3B	Abdichtung 2-lagig	38,89 €
dach /	3O	Dämmung Polystyrol/ HWL	
Pulldach		Dampfsperre	
Fenster	BAK	Holzfenster	64,95 €
	2+3	Einfachverglasung	
		Holzfenster	64,95 €
		Zweifachverglasung	

Anhang VIII

Maßnahmenkatalog

Für Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle von Schulgebäuden der BAK 2 | 3

Digitaler Anhang.

Die Seitennummerierung erfolgt nach interner Struktur des Katalogs.