

GEOLOGIE • UMWELT • ROHSTOFFE • BAUGRUND



JENA-GEOS-Ingenieurbüro GmbH · Saalbahnhofstraße 25 c · 07743 Jena

Fachbeiträge
der
JENA-GEOS
Nº 01/2023

JG	WEBER, T.E.: Ökologische, energetische und finanzielle Auswirkungen von Dachbegrünung und Baumrigolen-Systemen auf Wohngebäude – JENA-GEOS, Fachbeiträge, Jg. 2023, Band 1	2023/04
----	--	---------

Fachbereich Ingenieurwissenschaften

- Energetisch-ökologischer Stadtumbau -

*Ökologische, energetische und finanzielle Auswirkungen von
Dachbegrünung und Baumrigolen-Systemen auf Wohngebäude*

Abschlussarbeit zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Engineering (M.Eng.)

vorgelegt von

Tamina Elisa Weber

Betreuer(in): *Prof. Dr. Ariane Ruff, HS Nordhausen*

Zweitbetreuer(in): *Dr. rer. nat. Kersten Roselt, JENA-GEOS®-Ingenieurbüro
GmbH*

Abstract

Die Auswirkungen des Klimawandels, der wachsende Energieverbrauch und steigende CO₂-Emissionen, international und national, veranlassen Deutschland zur Umsetzung von Energie- und CO₂-einsparenden Maßnahmen in allen Sektoren. Die Sanierung von Bestandsgebäuden zur Verbesserung der Energieeffizienz und Klimaschutz gehört zu diesen Maßnahmen. Ökologische Sanierungs- und Anpassungsmaßnahmen, die neben der energetischen Verbesserung einen Beitrag zum Umweltschutz und zum Erhalt der Biodiversität leisten, spielen bisher eine untergeordnete Rolle. Ziel der Masterarbeit ist es daher Aufklärungsarbeit für ökologische Sanierungs- und Anpassungsmaßnahmen zu leisten, Anreize für eine vermehrte Umsetzung zu schaffen und Handlungsempfehlungen für ein gewähltes Praxisbeispiel abzuleiten. Dafür wurden neben Literatur- und Internetrecherche, der bauliche und energetische Ist-Zustand des Praxisbeispiels analysiert und ein Vergleich ausgewählter konventioneller und ökologischer Sanierungsmaßnahmen unter Berücksichtigung energetischer, ökologischer und finanzieller Kenngrößen durchgeführt. Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass zwar die konventionellen Maßnahmen die besseren energetischen Werte erzielen, aber kaum ökologische Auswirkungen vorweisen können. Die Kosten für die ökologische Sanierungs- und Anpassungsmaßnahmen fallen im Vergleich höher aus, können aber energetisch betrachtet ähnliche Ergebnisse und bessere ökologische Effekte erzielen. Die Umsetzungsquote der ökologischen Sanierungs- und Anpassungsmaßnahmen sollte in Anbetracht der klimatischen und energetischen Situation, trotz der zunächst höheren Investitionskosten, gesteigert werden. Im Ergebnis zeigt sich, dass es in Deutschland einen weiteren Ausbau an Förderungen für ökologischer Sanierungs- und Anpassungsmaßnahmen bedarf, um Bürger und Unternehmen bei der Umsetzung finanziell zu entlasten und Anreize zu schaffen.

Abstract

The effects of climate change, growing energy consumption and rising CO₂ emissions, internationally and nationally, are prompting Germany to implement energy and CO₂-saving measures in all sectors. The renovation of existing buildings to improve energy efficiency and climate protection is one of these measures. Conventional re-insulation of the building envelope is one of these measures. Ecological renovation and adaptation measures that contribute to environmental protection and the preservation of biodiversity in addition to energy improvements have played a subordinate role up to now. The aim of the master's thesis is therefore to raise awareness for ecological renovation and adaptation measures, to create incentives for increased implementation and to derive recommendations for action for a selected practical example. In addition to literature and internet research, the actual structural and energetic condition of the practical example was analysed and a comparison of selected conventional and ecological refurbishment measures was conducted, taking into account energetic, ecological and financial parameters. The results of the work show that although the conventional measures achieve the better energy values, they have hardly any ecological effects. The costs for the ecological renovation and adaptation measures are higher in comparison but can achieve similar results and better ecological effects in terms of energy. The implementation rate of ecological renovation and adaptation measures should be increased in view of the climatic and energetic situation, despite the initially higher investment costs. As a result, Germany needs a further expansion of subsidies for ecological renovation and adaptation measures in order to relieve the financial burden on citizens and companies and to create incentives for implementation.

Danksagung

Ein herzlicher Dank gebührt meiner Betreuerin Prof. Dr. Ariane Ruff und meinem Zweitbetreuer Dr. Kersten Roselt, deren Ratschläge in den letzten Monaten stets eine große Hilfe bei der Erstellung dieser Masterarbeit waren.

Außerdem richtet sich ein besonderer Dank an die WSG Walterhausen eG, die mir zahlreiche Daten und Dokumente für das ausgewählte Praxisbeispiel „Am Mönchhof 22-26“ zur Verfügung gestellt hat.

Ein herzliches Dankeschön gilt meiner Familie, meinem Verlobten, Alexandra, Laura und Anne, die mich in den letzten Jahren und Monaten tatkräftig unterstützt und ermutigt haben.

Abschließend möchte ich mich bei Hans und meinen Großeltern Karin und Helmut bedanken, die immer an mich geglaubt haben. Ihr bleibt unvergessen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
Einleitung	1
1 State of the Art	3
1.1 Notwendigkeit der energetischen Gebäudesanierung.....	3
1.2 Gesetzliche Regelungen	7
1.3 Sanierungsmaßnahmen zur Energieeinsparung.....	9
1.3.1 Ausgewählte konventionelle energetische Sanierungsmaßnahmen....	9
1.3.1.1 Äußere Fassadendämmung.....	9
1.3.2.1 Dachdämmung	11
1.4 Gründe für ökologisch-energetisches Sanieren und Anpassen	13
1.4.1 Ausgewählte ökologische Sanierungs- und Anpassungsmaßnahmen	15
1.4.1.1 Dachbegrünung	15
1.4.1.2 Baumrigolen-Systeme.....	21
2 Praxisbeispiel „Am Mönchhof 22-26“ in Bad Tabarz	24
2.1 Klimatische Eckdaten und Verortung – Bad Tabarz	24
2.2 „Am Mönchhof 22-26“	26
2.3 Resümee zur Auswahl des Praxisbeispiels.....	26
3 Frage- und Zielstellungen.....	27
4 Methodisches Vorgehen	28
4.1 Allgemeines Vorgehen	28
4.2 Datenerhebung – Kenngrößen	29
5 Datenerhebung	31

5.1 Energetischer und baulicher Ist-Zustand des Gebäudes.....	31
5.1.1 Maße und Aufbau	31
5.1.2 Dach und Dachdämmung	32
5.1.3 Fassade und Fassadendämmung	33
5.1.4 Ausgeführte Sanierungsmaßnahmen.....	33
5.1.5 Energetische Ist-Werte	34
5.2 Variante 1 – konventionelle Sanierung.....	35
5.2.1 Äußere Fassadendämmung.....	35
5.2.1.1 Energetische Auswirkungen	35
5.2.1.2 Ökologische Auswirkungen.....	36
5.2.1.3 Finanzielle Auswirkungen.....	37
5.3 Variante 2 – konventionelle Sanierung.....	38
5.3.1 Dachdämmung	38
5.3.1.1 Energetische Auswirkungen	38
5.3.1.2 Ökologische Auswirkungen.....	39
5.3.1.3 Finanzielle Auswirkungen.....	39
5.4 Variante 3 – ökologische Sanierung.....	40
5.4.1 Extensive Dachbegrünung.....	40
5.4.1.1. Energetische Auswirkungen (wassergesättigt, bei 20 °C)	41
5.4.1.2 Ökologische Auswirkungen.....	42
5.4.1.3 Finanzielle Auswirkungen.....	43
5.5 Variante 4 – ökologische Anpassung.....	44
5.5.1 Baumrigolen-Systeme.....	44
5.5.1.1 Ökologische Auswirkungen.....	46
5.5.1.2 Finanzielle Auswirkungen.....	47
5.6 Vergleich der Varianten.....	48

5.6.1 Energetische Auswirkungen	48
5.6.2 Ökologische Auswirkungen.....	49
5.6.3 Finanzielle Auswirkungen.....	50
6 Datenauswertung und Interpretation.....	51
7 Diskussion.....	52
8 Handlungsempfehlungen	55
9 Zusammenfassung und Ausblick.....	58
Literatur- und Quellenverzeichnis.....	61
Anhang.....	75

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung des Umweltmodell – Mobile (Quelle: YTONG, Laußig o.J.).....	13
Abbildung 2: Beispieldarstellung einer extensiven Dachbegrünung (Quelle: ZinCO GmbH Nürtingen o.J.).....	16
Abbildung 3: Beispieldarstellung einer intensiven Dachbegrünung (Quelle: BuGG o.J.).....	17
Abbildung 4: Beispieldarstellung eines Baumrigolen-Systems (Quelle: Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH o.J.)	22
Abbildung 5: „Am Mönchhof 22-26“ (Quelle: Eigene Darstellung)	26
Abbildung 6: Beispieldarstellung eines fünfgeschossigen WBS70-Gebäudes (Quelle: Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau 1997)	31
Abbildung 7: Ostseite des Wohnblockes (Quelle: WSG Waltershausen eG o.J.)	33
Abbildung 8: Beispieldarstellung des Kugel-Weißdorns (Quelle: Häussermann Stauden+Gehölze GmbH o.J.)	45
Abbildung 9: Luftbild des Plattenbauquartiers „Am Mönchhof“ in Bad Tabarz (Quelle: © GDI-Th o.J.)	54

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleichende Darstellung von intensiver und extensiver Dachbegrünung (Quelle: Eigene Darstellung).....	17
Tabelle 2: Übersicht über die klimatischen Eckdaten von Bad Tabarz	25
Tabelle 3: Übersicht der geschätzten Kosten für eine Fassadensanierung mit einem 20 cm starken WDVS.....	37
Tabelle 4: Übersicht der geschätzten Kosten der Dachsanierung mit einer 32 cm starken Mineralfaser-Dämmung	39
Tabelle 5: Übersicht der geschätzten Kosten der Dachsanierung mit einer Dachbegrünung und einer zusätzlichen 16 cm starken Polystyrol-Dämmung.	43
Tabelle 6: Übersicht der geschätzten Kosten der Baumrigolen-Systeme	47
Tabelle 7: Vergleich der energetischen Auswirkungen der Varianten	48
Tabelle 8: Vergleich der ökologischen Auswirkungen der Varianten	49
Tabelle 9: Vergleich der finanziellen Auswirkungen der Varianten	50

Abkürzungsverzeichnis

CO₂ – Kohlenstoffdioxid

°C – Grad Celsius

dB(A) – Dezibel

m² – Quadratmeter

km² – Quadratkilometer

cm – Zentimeter

m – Meter

mm – Millimeter

ha- Hektar

kg – Kilogramm

g – Gramm

m³ – Kubikmeter

l – Liter

W – Watt

kW – Kilo-Watt

kWh – Kilo-Watt-Stunde

h – Stunde

K – Kelvin

kKh – Kilo-Kelvin-Stunde

d – Tag

a – Jahr

€ – Euro

% – Prozent

EnSimiMaV – Mittelfristenergieversorgungssicherungsmaßnahmenverordnung

EnSikuMaV – Kurzfristenergieversorgungssicherungsmaßnahmenverordnung

Gender-Hinweis

Aufgrund aktueller Diskussionen über gendergerechte Sprache wurde sich in der Arbeit für geschlechtsneutrale Wortformulierungen entschieden. Bei Wörtern, bei denen sich eine Geschlechtszuweisung nicht vermeiden lässt, wurde sich aufgrund besserer Lesbarkeit für das generische Maskulin entschieden. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten werden dabei ausdrücklich mitgemeint, soweit es für die Aussage relevant ist.

„Der Mensch hat viele Fähigkeiten, aber das größte Talent entwickelt er bei der Vernichtung der Natur.“ Dschalal ad-Din Muhammad Rumi (1207 - 1273)

(Aphorismen.de o.J.)

Einleitung

Trotz der circa 800 Jahre, die seit Rumis Aussage vergangen sind, ist deren Inhalt aktueller denn je. Die Menschen sind mit den Konsequenzen ihrer Lebensweise und des Klimawandels konfrontiert: dem Anstieg von Energieverbrauch, CO₂-Ausstoß, Ressourcenverbrauch und globaler Durchschnittstemperatur, nur um eine Auswahl zu nennen (Enerdata 2022a, 2022b). Neben dem Bestreben globale Lösungen zu finden, versucht Deutschland mithilfe von gesetzlichen Regelungen und festgelegten Klimaschutzziele Energie einzusparen und den CO₂-Ausstoß zu reduzieren (BMWK 2021). Betroffen ist davon unter anderem der Immobiliensektor. Mit einem Anteil von 30 % am Gesamtenergieverbrauchs Deutschlands (dena 2021, S. 9) und der täglichen Neuversiegelung für Wohnen und Industrie von 54 ha (BMUV 2022) müssen Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Eine dieser Maßnahmen ist die Erhöhung der energetischen Sanierungsrate von Bestandsgebäuden. Die energetische Sanierung bezeichnet Maßnahmen an Gebäuden, die den Energieverbrauch reduzieren (Paschotta o.J.). Die konventionellen Sanierungsmaßnahmen wie die nachträgliche Dach- oder Fassadendämmung werden regelmäßig eingesetzt, während ökologische Sanierungs- und Anpassungsmaßnahmen, wie Dachbegrünung und Baumrigolen-Systeme, noch eine untergeordnete Rolle spielen. Aber können diese Maßnahmen gleichwertige energetische Ergebnisse für Wohngebäude erzielen?

Anhand des selbstgewählten Praxisbeispiels, das kommunale Wohngebäude „Am Mönchhof 22-26“ der WSG Waltershausen eG in Bad Tabarz, sollen diese und weitere Fragen in dieser Masterarbeit beantwortet und Umsetzungsimpulse für ökologische Sanierungs- sowie Anpassungsmaßnahmen gegeben werden. Bei dem aus DDR-Zeiten stammenden kommunalen Wohngebäude wurden die letzten energetischen Sanierungsmaßnahmen vor mehr als 15 Jahren ausgeführt. Des Weiteren entsteht durch die klimatischen Gegebenheiten, wie hohem

Jahresniederschlag und steigender Durchschnittstemperatur (climate-data.org 2021, meteoblue AG 2022), ein Regenwassernutzungspotenzial, welches mithilfe von Verdunstungs- und Versickerungsmöglichkeiten ausgeschöpft werden sollte. Zu diesen Möglichkeiten gehören die Dachbegrünung und Baumrigolen-Systeme, die Regenwasser nutzbar machen und mit Verdunstungskälte steigende Temperaturen ausgleichen können.

Die Masterarbeit geht daher der Frage, nach welche energetischen, ökologischen und finanziellen Auswirkungen Dachbegrünung und Baumrigolen-Systeme auf Wohngebäude im Vergleich zu konventionellen Sanierungsmaßnahmen haben. Ziel ist es, Aufklärungsarbeit für ökologische Sanierungs- und Anpassungsmaßnahmen zu leisten, Anreize für die vermehrte Umsetzung solcher Maßnahmen zu schaffen sowie Handlungsempfehlungen für die WSG Waltershausen eG abzuleiten.

Die Basis der Methodik bilden Literatur- und Internetrecherche, Ist-Zustands-Analyse und die Berechnung festgelegter Kenngrößen. Die für den theoretischen Teil durchgeführten Literatur- und Internetrecherchen dienen der Wissenssammlung, unterstützen die Findung der Frage- und Zielstellung und die Auswahl der zu berechnenden Kenngrößen. Danach wird der energetische und bauliche Ist-Zustand des Gebäudes analysiert. Anschließend werden die Sanierungsvarianten der Fassadendämmung, Dachdämmung und Dachbegrünung ausgewählt und die energetischen, ökologischen und finanziellen Kenngrößen ermittelt. Die Baumrigolen-Systeme zählen zu den Anpassungsmaßnahmen und werden aus diesem Grund gesondert betrachtet. Auf Grundlage der Berechnungen werden die Varianten ausgewertet und miteinander verglichen. Dies geschieht unter Berücksichtigung der energetischen, ökologischen und finanziellen Auswirkungen sowie des energetischen Ist-Zustandes des Gebäudes. Daraus ergeben sich die abschließenden Ergebnisse, die Diskussion und die möglichen Handlungsempfehlungen.

Die Arbeit teilt sich in Theorie- und Praxisteil, um das gewonnene Wissen auf das Praxisbeispiel und die damit verbundenen Berechnungen anwenden zu können. Das erste Kapitel befasst sich mit der Notwendigkeit der energetischen

Sanierung und den gesetzlichen Regelungen im Immobiliensektor, die die formelle Grundlage des Sanierens bilden. In diesem Kapitel werden zudem die Gründe für ökologisches Sanieren genannt und die konventionellen und ökologischen Sanierungs- und Anpassungsmaßnahmen vorgestellt, die auf das Praxisbeispiel angewendet werden. Im zweiten Kapitel wird das Praxisbeispiel „Am Mönchhof 22-26“ vorgestellt. Die Datenauswertung wird in Form der energetischen und baulichen Analyse des „Am Mönchhof 22-26“ sowie den energetischen, ökologischen und finanziellen Berechnungen der Sanierungs-Varianten durchgeführt. Abschließend erfolgen die Vorstellung der Ergebnisse, Diskussion, die möglichen Handlungsempfehlungen für die WSG Waltershausen eG sowie das Fazit und Ausblick.

1 State of the Art

1.1 Notwendigkeit der energetischen Gebäudesanierung

Energie- und Ressourcenverbrauch

Nicht nur die globale Bevölkerungszahl steigt kontinuierlich an (bpb 2022), sondern auch folgende Faktoren sind Wachstumsprozessen unterworfen. Wachstum benötigt allerdings Ressourcen, die aufgrund der exzessiven Lebensweise der Menschen immer limitierter werden und neue Lösungsansätze fordern. Der weltweite jährliche Energiebedarf ist zwischen den Jahren 1990 und 2021 um circa 60 % gestiegen. Auch der weltweite Anteil der fossilen Energieträger, Gas, Kohle und Erdöl, die zur Erzeugung der benötigten Energie gebraucht werden, beläuft sich weiterhin auf 80 % (Enerdata 2022b). Dieser Anstieg des Energiebedarfes schlägt sich in den globalen CO₂-Emissionen nieder. Seit 1990 hat sich der weltweite CO₂-Ausstoß durch die genutzten fossilen Brennstoffe ebenfalls um circa 62 % erhöht (Enerdata 2022a).

Der wachsende Energieverbrauch und die damit verbundenen steigenden CO₂-Emissionen wirken sich drastisch auf das Weltklima aus. Die Erderwärmung wird primär durch diesen weltweiten Energieverbrauch verursacht. Ohne Halbierung der weltweiten CO₂-Emissionen wird ein Anstieg der globalen

Durchschnittstemperatur immer realistischer (Kerschberger et al. 2007, S. 16). Deutschlands Energieverbrauch ist zwar seit 1990 um ein Drittel gesunken (Enderdata 2022b), allerdings scheint das festgelegte Klimaschutzziel der Senkung des CO₂-Ausstoßes um 65 % bis 2030 gegenüber 1990 (BMWK 2021) laut dem Expertenrat für Klimafragen als nicht erreichbar (ERK 2022, S. 15). Dieser globale und nationale Energietrend verläuft somit nicht zugunsten des Weltklimas und der Verbrauchssenkung. In Konflikt zu dieser Entwicklung steht die Endlichkeit der fossilen Energieträger, welche durch den steigenden Verbrauch in den nächsten Jahrzehnten spürbarer werden wird (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2022).

Ein Umdenken und eine Energiewende sind zum Schutz der Umwelt und der Menschheit global und national gesehen unablässig. Die Energiewende, der Ersatz fossiler Energieträger durch erneuerbare Energien zur Energieerzeugung, ist hierbei das Schlüsselement, um die CO₂-Emissionen zu kompensieren und zu reduzieren (bpb 2016). Laut Bericht der McKinsey & Company soll der weltweite Anteil des globalen Energiemixes an erneuerbaren Energien bis 2050 um bis 90 % ansteigen (McKinsey & Company 2022). Ob dies allerdings ausreicht, um die Folgen des Klimawandels zu reduzieren, kann aktuell nicht ausreichend abgeschätzt werden.

Energieverbrauch im Immobiliensektor

Deutschland weist einen Wohngebäudebestand mit circa 19 Millionen Wohnhäusern auf, wovon sich circa sechs Millionen in Mehrfamilienhäuser und circa 13 Millionen in Einfamilienhäuser aufgliedern. Des Weiteren macht das Beheizen dieser Räume circa 30 % am Energieverbrauch Deutschlands aus (Statista GmbH 2022a, dena 2021, S. 9). Die Anzahl des Wohngebäudebestandes sowie der Anteil am Energieverbrauch zeigen, dass der Wohngebäudebestand einen Einfluss auf den Energie- und Ressourcenverbrauch Deutschlands hat. Die Bundesregierung hat sich in diesem Bereich das Ziel gesetzt, bis 2050 einen klimaneutralen Gebäudebestand und 25 % verminderten Stromverbrauch im Vergleich zum Jahr 2008 zu erreichen. Da 75 % der Wohngebäude vor dem Inkrafttreten der ersten Wärmeschutzverordnung (EnEV) 1977 erbaut wurden, würde

sich durch energetisches Sanieren ein erhebliches Einsparpotenzial ergeben. Mit nur 1 % haben die Neubauten mit modernen energetischen Standards einen geringen Einfluss auf die Reduzierung des Heizenergieverbrauchs. Somit liegt es an den Eigentümern der Bestandsgebäude durch Sanierungsmaßnahmen Energie einzusparen (Metzger et al. 2019, S. 26). Bisher wurden von den 75 % Bestandsgebäuden nur 20 % nachträglich gedämmt. Dabei könnten durch eine Vollsanierung bei Altbauten bis zu 50 % an Heizenergie gespart werden (Metzger et al. 2019, S. 41 f.).

Weitere Gründe, warum die energetische Sanierung notwendig ist, sind die ökonomischen Aspekte. Energie wird nicht nur während der Nutzung des Gebäudes, sondern auch während des gesamten Lebenszyklus des Gebäudes, bei der Errichtung und bei dem späteren Abriss, verbraucht. Die Herstellung eines Einfamilienhauses nach heutigem Energiestandard entspricht dem Heizenergiebedarf von 15 bis 30 Jahren (Kerschberger et al. 2007, S. 18). Neben dem Energieverbrauch wird hierbei auch Abfall generiert. Circa 55 % der Abfallmengen in Deutschland waren im Jahr 2020 Bau- und Abbruchabfälle (Umweltbundesamt 2022). Hinzu kommen die dadurch entstehenden Emissionen und Gefahrenpotenziale der Stoffe bei Abbruch, Transport und anschließender Deponierung (Kerschberger et al. 2007, S. 18). Durch Sanierungen würde somit nicht nur Energie eingespart, sondern auch Umweltrisiken, wie die oben genannten Gefahrenpotenziale, reduziert werden.

Die Versorgungssicherheit ist ein aktuell stark diskutiertes Thema in Deutschland. Durch den Krieg in der Ukraine seit Februar 2022, steigen und schwanken die Preise für Erdgas und andere fossile Brennstoffe, die in der Vergangenheit über Russland bezogen wurden (ZDF 2022). Deutschland ist stark abhängig von Energieimporten. Durch energetische Sanierungsmaßnahmen in Verbindung mit erneuerbaren Energien würden die Haushalte nicht nur energetisch unabhängiger werden. Auch in finanzieller Hinsicht würden die Haushalte unabhängiger agieren können, da sie den selbst und in Deutschland erzeugten Strom nutzen könnten und keine Ausgaben für Energieimporte tätigen müssten. Gelder in

Gebäudesanierungen anstatt in Energieimporten zu investieren, ist essentiell, um Versorgungssicherheit zu garantieren (Kerschberger et al. 2007, S. 19).

Die Industrie ist durch die Rationalisierung in vielen Bereichen bestrebt ihre Effektivität und Produktivität zu steigern, was durch die Streichung von Arbeitsplätzen erreicht werden könnte. Um die Arbeitsplätze zu erhalten oder neue zu schaffen, müssen lohnintensive statt kapitalintensive Branchen ausgebaut werden. Zu den lohnintensiven Branchen zählt die Gebäudesanierung, da sich die Sanierungsmaßnahmen nicht automatisierbar, sondern durch erfahrenes Fachpersonal ausführen lassen (Kerschberger et al. 2007, S. 18). Im Jahr 2019 betrug der Umsatz von energetischen Verbesserungsmaßnahmen an Gebäuden circa neun Milliarden €, doppelt so hoch im Vergleich zum Jahr 2011 (Statista GmbH 2021b). Nach Berechnungen des Forschungsinstituts für Wärmeschutz e.V. München aus dem Jahr 2018 würden durch Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen zur Erreichung der damaligen angestrebten Klimaschutzziele bis 2050 circa 215.000 neue Arbeitsplätze entstehen (Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München 2018, S. 28). Die energetische Sanierung von Gebäuden schaffe demnach eine zukunftssichere Branche mit positiven Effekten auf die Umwelt, wie die Verminderung des CO₂-Ausstoßes und des Flächenverbrauches.

Flächenverbrauch

Ein weiteres Thema ist der Flächenverbrauch durch den Neubau von Wohngebäuden. So sagte Bundesbauministerin Klara Geywitz im April 2022: *„Es ist ökonomisch und ökologisch unsinnig, wenn jede Generation neue Einfamilienhäuser baut.“* (Norddeutscher Rundfunk 2022). Der Neubau von Gebäuden verbraucht demnach nicht nur finanzielle und materielle Ressourcen, sondern auch die Ressource Boden. Statistisch sei zwar der Anteil an Neubau (30 %) geringer im Vergleich zu Bauleistungen an Bestandsgebäuden (70 %) im Jahr 2020 (Statista GmbH 2022b), aber eine positive Wirkung auf den Flächenverbrauch ist nicht feststellbar. Weiterhin werden täglich 54 ha an Boden für Wohnen und Gewerbe verbraucht (BMUV 2022). Durch die Sanierung von bereits bestehenden Gebäuden wird diesem Verbrauch entgegengewirkt. Die Bundesregierung setzt zur

Einsparung von Energie und der Sanierung von Gebäuden auf Gesetze und Verordnungen, wie die EnEV.

1.2 Gesetzliche Regelungen

Geschichtliche Entwicklung

Die Genese der gesetzlichen Verankerung des Energieeinsparens begann in Deutschland in den 1970er Jahren. Aufgrund der weltweiten Ölkrise, welche die Preise für Heizöl steigen ließ und deren Verfügbarkeit stark einschränkte, wurde 1976 das erste Energieeinsparungsgesetz (EnEG) beschlossen. Erst mit dem Bewusstsein der Bevölkerung über die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern, vor allem in Bezug auf die Ölkrise, veranlasste die Bundesregierung die erste Wärmeschutzverordnung 1977 auf Grundlage der EnEG zu veröffentlichen. Da diese Maßnahmen zur Lösung der Energiefrage national nicht ausreichend waren, wurde auf den UN-Konferenzen versucht eine globale Lösung zur CO₂-Reduzierung in Form des Kyoto-Protokolls zu erwirken (Dirk 2014, S. 1). Weil bis zu den Anfängen des neuen Jahrtausends der Großteil der Einsparungspotenziale nicht erschlossen worden war, wurde 2003 vom Europäischen Parlament eine Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden veröffentlicht. Durch die europäischen Erneuerungen wurden die EnEG im Jahr 2005 und die Energieeinsparungsverordnung (EnEV) im Jahr 2007 überarbeitet (Dirk 2014, S. 1). Seit der Einführung der EnEG und EnEV gab es zahlreiche Novellierungen. Zu Beginn wurde sich auf die Beschränkung des Jahresheizwärmebedarfs von Wohngebäuden konzentriert, welche sich in im Verlauf der nächsten 20 Jahre weiter verschärfte (Dirk 2014, S. 1 f.). Nach der dritten Wärmeschutzverordnung von 1994 wurden die Begriffe des Endenergiebedarfs beziehungsweise des Primärenergiebedarfs in der Verordnung mit einbezogen.

Als Endenergiebedarf wird hierbei die benötigte Menge an Energie bezeichnet, die zur Deckung des Jahresenergieverbrauchs, zur Wassererwärmung und für Anlagentechnik verbraucht wird. Hierbei spielen die Energieausweise eine wesentliche Rolle, um den Status Quo aufzuzeigen und die Umsetzungsquote zu erhöhen. Im Jahr 2020 wurde die EnEV vom Gebäudeenergiegesetz (GEG)

abgelöst (Deutscher Bundestag 2020, S. 8). Das anfängliche Ziel der Energieeinsparung wurde mit dem Ziel der CO₂-Einsparung im Zuge des Klimawandels und der Deutschen Klimaziele erweitert (Dirk 2014, S. 2).

Der Energieausweis und aktuelle Anforderungen an Wohngebäude

Die Ausstellung von Energieausweisen ist seit 2007 für Neubauten und für bestehende Gebäude seit dem Jahr 2009 verpflichtend (Dirk 2014, S. 81). Primärer Bestandteil des Energieausweises ist die Einteilung der Wohngebäude in Energieeffizienzklassen, welche mit den Buchstaben von A bis H und den entsprechenden Endenergieverbräuchen dargestellt werden. Somit stellt beispielsweise die Energieeffizienzklasse A+ mit unter 30 kWh/m²a das energetisch effizienteste Gebäude und die Energieeffizienzklasse H mit über 250 kWh/m²a das energetisch ineffizienteste Gebäude dar (Dirk 2014, S. 76). Aufgrund der immer weitreichenderen Verschärfungen der Endenergieverbräuche vor allem für den Neubau von Wohngebäuden als auch Nicht-Wohngebäuden in den vergangenen Jahren sind energetische Sanierungsmaßnahmen dringend erforderlich. Die aktuelle Situation seit Februar 2022 in der Ukraine und die daraus resultierende globale Energiekrise veranlasste die Bundesregierung kurzfristig zu einer vorübergehenden Änderung der Energieeinsparmaßnahmen. Die Kurzfristenergieversorgungssicherungsmaßnahmenverordnung (EnSikuMaV) und die Mittelfristenergieversorgungssicherungsmaßnahmenverordnung (EnSimiMaV), die auf Grundlage des Energiesicherungsgesetzes erlassen worden, sollen die Versorgungslage mit Gas und Strom in Deutschland trotz des Krieges sichern. Die EnSikuMaV gilt seit dem 1. September 2022 und beinhaltet Energieeinsparmaßnahmen, die auf ein halbes Jahr befristet sind. Konkret wird das Heizen und Beleuchten von Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden eingeschränkt (Bundesregierung Deutschland 2022a). Die über zwei Jahre laufende EnSimiMaV betrifft die Optimierung und Überprüfung von Gas-Heizungsanlagen (Bundesregierung Deutschland 2022b).

Eine weitere Norm, die eingeführt wurde und das GEG ergänzt, ist die DIN 4108-2: 2013-02. Sie ist die Grundlage der Wärmedämmung von Bauteilen, der Gebäudehülle und Wärmebrücken. Neben der Verhinderung der Schimmelbildung

werden auch energetische Mindeststandards definiert, um Energie einzusparen und ein erträgliches Raumklima zu schaffen. Damit soll das zusätzliche Heizen und Kühlen reduziert werden (ift Rosenheim et al. 2013, S. 1 ff.).

1.3 Sanierungsmaßnahmen zur Energieeinsparung

Ein Gebäude ist ein komplexes System aus mehreren sich überschneidenden Subsystemen, wie Beheizung, Lüftung, Warmwasser, Beleuchtung, Kühlung und weiterer Haustechnik. Für jedes Subsystem muss eine gewisse Energiemenge aufgebracht werden, die durch Verbesserungen reduziert werden kann. Die Verbesserungen können unter anderem die Verringerung unerwünschter Energieabflüsse durch Wärmeverluste, optimierte Effizienz der Haustechnik oder Nutzung von erneuerbaren Energien sein (Kerschberger et al. 2007, S. 24). Im Folgenden wird auf ausgewählte Sanierungsmaßnahmen der Gebäudehülle eingegangen.

1.3.1 Ausgewählte konventionelle energetische Sanierungsmaßnahmen

1.3.1.1 Äußere Fassadendämmung

Die Außenwände eines Gebäudes haben aufgrund ihrer Größe und exponierten Lage einen wesentlichen Einfluss auf den Energiehaushalt eines Gebäudes (Drewer et al. 2013, S. 88). Seit Aufkommen der Fassaden-Wärmedämmung ist die durchschnittliche Stärke der Dämmschicht von vier cm auf heute bis zu 14 cm gestiegen, um den gesetzlichen Vorgaben des Gebäudeenergiegesetzes gerecht zu werden. Vor allem die Dämmformen des Wärmedämmverbundsystems (WDVS) und das vorgehängte hinterlüftete Fassadensystem (VHF) finden primär Anwendung (Kerschberger et al. 2007, S. 46).

Fassadendämmungen können bei Bestandsgebäuden die Energieverluste bis zu 75 % senken und damit Heizkosten, Ressourcen und Emissionen minimieren (Haefele et al. 2003, S. 86). Die Außenwand erhält durch erneuerte Fassadendämmung einen neuen Wetterschutz und die Größe der Wohnfläche im Inneren wird durch äußerliche Dämmmaßnahmen nicht negativ beeinflusst (Stahr 2011, S. 166 ff.). Die energetische Wirkung hängt von der Wahl des Dämmstoffes in

der Fassadendämmung ab. Grundsätzlich gilt: je kleiner der U-Wert, der Wärmedurchgangskoeffizient, des Dämmstoffes, umso geringer sind die Wärmeverluste. Der U-Wert setzt sich aus der Stärke der Bauteilschichten und dem Dämmwert des Dämmstoffes zusammen und gibt an, wie viel des Wärmestromes zwischen der Außen- und Innentemperatur hindurchdringt (Haefele et al. 2003, S. 86, Drewer et al. 2013, S. 22). Beispielsweise erzielt eine 11,5 cm starke Außenwand aus Sandstein ohne jegliche Dämmung einen U-Wert von $3,9 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$. Eine Außenwand aus Mauerwerk mit $1,6 \text{ W / m}^2$ in Verbindung mit einer Dämmschicht von 20 cm Stärke erreicht hingegen einen U-Wert von $0,18 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$ (Haefele et al. 2003, S. 43). Die Kosten einer Fassadendämmung hängen von der Wahl der gewählten Dämm-Form ab. Die Gesamtkosten einer WDVS belaufen sich auf 75 bis 200 € je m^2 , wovon circa 50 % für Gerüst, Putz- und Farbarbeiten veranschlagt wird. Die Ausgaben für eine aufwendigere VHF fallen zwischen 150 und 250 € je m^2 aus (marketeam creativ GmbH 2020).

Wärmedämmverbundsystem (WDVS)

Die am häufigsten angewendete Fassadendämm-Form ist das Wärmedämmverbundsystem. Als Dämmstoff werden feste und druckbelastbare Platten aus überwiegend Polystyrol oder auf Basis von Mineralwolle verwendet (Drewer et al. 2013, S. 92). Bei dem Installationsprozess wird zunächst der Untergrund vorbehandelt und anschließend die Dämmplatten per Klebstoff, Dübel oder Schienenhalterungen installiert. Auf der Dämmung wird anschließend eine Putzschicht mit integrierter Bewehrung und einem Oberputz aufgetragen, was in Anhang 1 zu sehen ist (Drewer et al. 2013, S. 92).

Vorgehängtes hinterlüftetes Fassadensystem (VHF)

Circa 15 % der Fassaden in Deutschland werden mit dem vorgehängten hinterlüfteten Fassadensystem gedämmt, das vor allem Anwendung an Gebäuden, wie Fachwerkhäusern, findet, deren Außenwände besonderen Schutz benötigen. Die nachträglich angebrachte Fassadendämmung besteht aus Dämmung, Tragekonstruktion und hinterlüfteter Außenschale. Die Vorhangfassade wird, wie in Anhang 2 zu erkennen, mittels der Unterkonstruktion an der Außenwand befestigt und die Wärmedämmung in die thermisch getrennte Tragekonstruktion

integriert (Drewer et al. 2013, S. 94). Die hinterlüftete Außenschale schützt die Wärmedämmung und die Tragekonstruktion vor Witterungseinflüssen. Durch eine Lüftungsschicht, zwischen Außenschale und Wärmedämmung, sind beide Komponenten funktionell voneinander getrennt. Aufgrund der bauphysikalischen Funktionssicherheit und der architektonischen Gestaltungsmöglichkeiten bietet sie eine Alternative zum WDVS. So kann die Außenschale aus Materialien wie Naturstein, Ton, Holz, Glas, Photovoltaikmodulen, Metall oder zementgebundenen Materialien bestehen (Drewer et al. 2013, S. 94 ff.).

1.3.2.1 Dachdämmung

Vor allem bei kleineren Gebäuden sind die Wärmeverluste über den Dachraum am größten (Kerschberger et al. 2007, S. 83). Die Dachfläche macht bei Häusern aus den 1950er und 1960er Jahren bis zu einem Drittel der Gebäudehülle aus, wodurch auch in diesem Fall eine Wärmedämmung notwendig wird. Durch die untergeordnete Nutzung des Dachraumes sind ältere Dächer meist nicht oder kaum gedämmt. Bei hohen als auch niedrigen Temperaturen wirkt sich die fehlende bis geringe Dämmung negativ auf das Wohnklima im Inneren aus (Kerschberger et al. 2007, S. 83). Im Folgenden wird konkret auf die Dämmung von Flachdächern eingegangen, da es sich bei dem ausgewählten Praxisbeispiel um einen Plattenbau mit Flachdach handelt.

Wie auch bei der Fassadendämmung wirken sich stärkere Dämmungen positiver auf den Energieverbrauch als dünnere aus. Bei bewohnten Dachgeschossen sollte sogar eine mindestens 15 cm starke Wärmedämmung realisiert werden, um ein angenehmes Raumklima zu schaffen und Wärmeverluste zu reduzieren. Bei jeder Flachdachsanie rung muss auf die Tragfähigkeit der Decke geachtet werden, da diese nur eine bestimmte Dämmstoffstärke tolerieren kann, die zusätzlich mit Kies und anderen Konstruktionen belastet wird (Haefele et al. 2003, S. 117). Da das Flachdach zu den kostenintensivsten Konstruktionen gehört, muss bei einer Sanierung mit einem Preis von 225 € je m² gerechnet werden (RENEWA GmbH o.J.). Ausschlaggebend ist hierbei vor allem der Zustand des zu sanierenden Flachdaches.

Dämmung von Flachdächern

Im Gegensatz zu den Steildächern gehören Flachdächer, die einen Neigungswinkel von maximal 10 % aufweisen, zu den vielfältigsten als auch sanierungsintensivsten Baukonstruktionen (Kerschberger et al. 2007, S. 90). Vor allem flache Dachkonstruktionen auf Wohngebäuden aus den 1950er und 1960er Jahren weisen eine maximale Dämmschicht von sechs cm auf, wodurch ein energetisches Einsparpotenzial entsteht. Wenn die bereits bestehende Wärmedämmung nicht beschädigt ist und die statischen Voraussetzungen gegeben sind, kann beispielsweise auf die bestehende eine neue Dachkonstruktion errichtet werden (Kerschberger et al. 2007, S. 90). Die Wahl der Dämmsanierung ist abhängig vom Aufbau des Flachdaches. Hierbei wird primär in Kaltdach und Warmdach unterschieden.

Kaltdach

Als Kaltdach werden Dächer bezeichnet, die wärmgedämmt und belüftet sind. Das bedeutet konkret, dass zwischen Dichtungs- und Dämmschicht ein Luftraum vorhanden ist, der zwischen 30 und 70 cm hoch ist und der wie bei dem Prinzip der vorgehängten Fassadendämmung eine Wasserdampfzirkulation ermöglicht und somit Feuchtigkeitsschäden verhindert. Die Dämmschicht kann dabei direkt auf oder unter der Rohdecke liegen (siehe Anhang 3) (Haefele et al. 2003, S. 117). Um das Kaltdach nachträglich dämmen zu können, kann einerseits die gesamte Dachkonstruktion ersetzt werden, oder andererseits die bestehende Dachkonstruktion mit Dämmgranulat aus Zellulose oder mineralischen Dämmstoffen aufgefüllt werden. Um weiterhin die Luftzirkulation zu ermöglichen wird der neue Dämmstoff maximal bis zehn cm unter die Dachhaut aufgefüllt (Drewer et al. 2013, S. 75 f.).

Warmdach

Bei Dächern, die zwar wärmegedämmt sind, aber keine Luftschicht vorweisen, wird von Warmdächern gesprochen. Die Dämmschicht liegt hierbei zwischen Rohdecke und Dachhaut (siehe Anhang 3). Im Zuge von Sanierungsmaßnahmen können weitere Dämmschichten als Innendämmung oder direkt auf der

Dachhaut, die dabei allerdings aus feuchtigkeitsbeständigen Materialien bestehen sollte, angebracht werden. (Haefele et al. 2003, S. 116).

Als weitere Sanierungsmaßnahme von Flachdächern ist es möglich durch Dachbegrünung positive energetische und auch ökologische Effekte zu erzielen (Haefele et al. 2003, S. 118).

1.4 Gründe für ökologisch-energetisches Sanieren und Anpassen

Die Natur befindet sich in einem Gleichgewicht, welches sich im Laufe der Zeit durch Klimaverschiebungen stetig verändert und wieder eingependelt hat. Mit der Entwicklung der Menschen und deren Lebensweise erfolgte ein Eingriff in diese natürlichen Veränderungen. Das ökologische Gleichgewicht lässt sich nicht klassisch als Waage darstellen, sondern viel mehr als ein Mobile, wie in Abbildung 1 zu erkennen ist (Stahr 2018, S. 1 ff.), welches unterschiedliche Ursachen und Wirkungen in komplexe Beziehungen setzt. Jede Änderung eines Faktors stört das Gleichgewicht, sodass die Auswirkungen solcher Änderungen zunächst schwer berechenbar sind (Stahr 2018, S. 1). Bis sich das Mobile wieder eingependelt hat und die Ursachen für die Störungen ermittelt wurden, vergeht eine gewisse Zeit. Somit wird meist von den Menschen zu spät erkannt, welche Verhaltensweisen und Stoffe die Umwelt langfristig schädigen (Stahr 2018, S. 2).

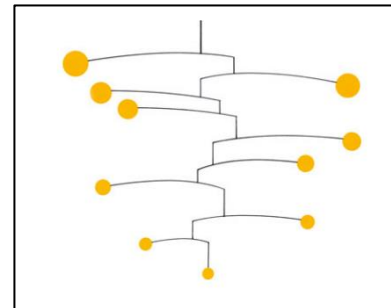


Abbildung 1: Darstellung des Umweltmodell – Mobile (Quelle: YTONG, Laußig o.J.)

Durch die städtischen Verdichtungsprozesse in den letzten Jahrzehnten, dem hohen Ausstoß von CO₂ in den Bereichen Industrie und Verkehr sowie steigenden innerstädtischen Temperaturen durch Versiegelung, fehlt es den Städten an sauerstoffreicher und schadstoffarmer Luft. Außerdem fehlt es an nicht gefährdenden Temperaturen, die das Leben von vulnerablen Gruppen, wie Kindern oder älteren Menschen, nicht beeinträchtigen (Minke 2006, S. 10). Es bilden sich sogenannte „urbane Hitzeinseln“ aus, die im Vergleich zu den umliegenden Vororten bis zu zehn °C höhere Temperaturen aufweisen können (Minke 2006, S. 10). Der natürliche Wasserhaushalt, der sich über geringen Oberflächenabfluss und

hohe Verdunstung sowie hohe Versickerung definiert, ist gestört. Durch den erhöhten Versiegelungsgrad kann Niederschlag nicht im Erdreich versickern und muss oberirdisch abfließen (Geiger et al. 2001, S. 2). Bei Starkregenereignissen, die durch die urbanen Hitzeinseln verstärkt werden, steigt die Hochwassergefahr, da die Kanalisationen auf die plötzlichen Wassermassen nicht ausgelegt sind und die natürliche Versickerung nicht greifen kann. Durch die versiegelten Flächen fehlt es ebenfalls an Verdunstung und der daraus resultierenden Verdunstungskälte, die temperatursinkende Effekte auf die aufgeheizte Luft hätte (Geiger et al. 2001, S. 3 ff.).

Ein Lösungsansatz, um das ökologische Gleichgewicht wieder herzustellen, ist das nachhaltige Regenwassermanagement in Form des Schwammstadt-Prinzips, welches zum Ziel hat, das Niederschlagswasser nutzbar zu machen und Hochwasser zu vermeiden. Dabei wird dem Regenwasser Versickerung und Verdunstung ermöglicht und bei stärkeren Regenereignissen Rückhalt geschaffen, um die Kanalisation zu entlasten. Dies steigert nicht nur die Verdunstung, welche die Hitzeinseleffekte reduziert, sondern kann die Überlastung und die Hochwassergefahr durch Starkregenereignisse mit Versickerungs- und Retentionsmöglichkeiten minimieren (Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH o.J.a). Die Stadt Leichlingen war beispielsweise im Sommer 2021 aufgrund von andauernden Starkregenereignissen von Hochwasser betroffen. Um das Hochwasserrisiko zu mildern und auch die steigende Anzahl an Hitzetagen im Sommer zu kompensieren, wird die Stadt nun zur Schwammstadt umgebaut (Stadtverwaltung Leichlingen o.J.). Maßnahmen, die zu dem Schwammstadt-Prinzip gehören, sind die bereits in dem Kapitel 1.4 angesprochene Dachbegrünung und die Baumriegen-Systeme, welche Versickerung, Retention und Verdunstung ermöglichen. Die Kombination von baulichen Maßnahmen, die den Energieverbrauch senken und nachhaltigem Regenwassermanagement kann durch ökologisches Sanieren und Anpassen umgesetzt werden. Der Begriff „ökologisch“ definiert sich über die „ökologische Nachhaltigkeit“ als den rücksichtsvollen Umgang mit natürlichen Ressourcen. Hierbei spielt das bereits angesprochene ökologische Gleichgewicht, welches zu erhalten gilt, eine wichtige Rolle (Aachener Stiftung Kathy Beys 2015). Ähnlich wie bei dem ökologisch orientierten Bauen wird beim

ökologischen Sanieren der minimale Verbrauch von Ressourcen und Energie sowie der Schonung der Umwelt angestrebt. Einige der Handlungsgrundsätze sind die Verringerung der Verschmutzung von Luft, Wasser und Boden sowie der Erhalt der Tier- und Pflanzenwelt (Umweltbundesamt 1997, S. 11). Die folgenden ausgewählten Sanierungs- und Anpassungsmaßnahmen gehören zum Schwammstadt-Prinzip, berücksichtigen die ökologischen Handlungsgrundsätze und versuchen energiesparende Effekte auf das Bestandsgebäude zu erwirken.

1.4.1 Ausgewählte ökologische Sanierungs- und Anpassungsmaßnahmen

1.4.1.1 Dachbegrünung

Dachflächen machen bis zu 50 % der Versiegelung in Deutschland aus und bleiben in vielen Städten und Gemeinden weitgehend ungenutzt (Brune et al. 2017, S. 6). Die Begrünung von Dächern bietet die Möglichkeit diese Flächen effektiv zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels und Energieeinsparung zu nutzen. Im Gegensatz zum normalen Bodensystem sind die Pflanzen allerdings vom natürlichen Kreislauf abgeschnitten. Die Dachbegrünungssysteme gleichen dies aus und sorgen für einen dauerhaften Lebensraum für Flora und Fauna (vgl. Stahr 2018: 193 ff.).

Aufbau

Der grundsätzliche Aufbau, wie in Anhang 4 zu sehen, ähnelt den Funktionen und Schichten des Erdbodens. Die unterste Schicht bildet die Dachkonstruktion mit der Dachabdichtung und Schutzlagen, um zu verhindern, dass Feuchtigkeit oder Pflanzenwurzeln in das Dach eindringen und dieses schädigen. Darauf folgt das Drainageelement, welches Wasser, was die Pflanzen und die Erde nicht mehr aufnehmen können, in den Rillen zwischenspeichert oder gedrosselt abgeben kann. Die Schicht des Systemfilters ahmt die Ton- und Verwitterungsschichten im Erdboden nach, die als Wasserfilter fungieren (Minke 2006, S. 35). Die oberste Schicht ist die Systemerde, in der die Pflanzen verwurzelt sind und mit Nährstoffen versorgt werden. Je nach Pflanzenart besitzt sie eine unterschiedliche Stärke. Damit die bauphysikalischen Effekte der Dachbegrünung vollumfänglich genutzt werden können, eignet sich als Unterkonstruktion das

Warmdach. Im Gegensatz zum Kaltdach befindet sich zwischen der Wärmedämmung und der Dachbegrünung keine belüftete Dampfdruckausgleichsschicht. Allerdings muss darauf geachtet werden, dass eine Dampfsperre eingebaut wird, um die Wasserkondensation in der Dämmschicht zu verhindern (Minke 2006, S. 36 f.).

Begrünungsarten

Wie der Aufbau der Vegetationsschichten der Dachbegrünung gestaltet wird, ist abhängig von der Neigung des Daches und der Art der Bepflanzung. Hierbei werden zwei Bepflanzungsarten unterschieden – die ohne gärtnerischen Pflegeaufwand auskommende extensive Begrünung und die anspruchsvolle intensive Dachbegrünung.

Bei der extensiven Begrünung wird eine einfache Bepflanzung statt klassischem Kiesbelag auf der Dachfläche angelegt. Sie benötigt kaum gärtnerische Pflege und kommt meist ohne Zusatzbewässerung aus (Stahr 2018, S. 195, Brune et al. 2017, S. 6). Ihre Bepflanzung besteht aus niedrigwachsenden und selbsterhaltenden Pflanzen, wie Moos oder Sedum bis hin zur Gras-Kraut-Begrünung (siehe Abbildung 2). Durch ihre geringe Aufbaustärke und ihr geringes Gewicht kann die extensive Begrünung auch nachträglich realisiert werden (Stahr 2018, S. 195, Brune et al. 2017, S. 6). Die extensive Dachbegrünung kann auf einschichtigen Flachdachaufbauten erfolgen, da die Moose und andere geeignete Pflanzen



Abbildung 2: Beispieldarstellung einer extensiven Dachbegrünung (Quelle: ZinCO GmbH Nürtingen o.J.)

von Natur aus Trockenperioden, Hitze und Überschwemmungen bewältigen können. Somit besteht die Pflanzschicht aus bis zu 15 cm starker mit Humus angereicherter Erde oder Rasenpflaster (siehe Tabelle 1). Ideal für die extensive Begrünung sind Dächer mit einem maximalen Gefälle von 3 % (Stahr 2018, S. 196).

Die intensive Begrünung hingegen besteht aus gestalteter Begrünung mit höherem Anspruch. Das heißt der Pflegeaufwand ist höher als bei der extensiven Begrünung, da die Pflanzen eine regelmäßige Bewässerung und Pflege benötigen. Es können Gras-Kraut-Gewächse bis hin zu Gehölzbegrünung angepflanzt werden.



Abbildung 3: Beispieldarstellung einer intensiven Dachbegrünung (Quelle: BuGG o.J.)

Die Aufbaustärke für die Begrünung muss 12 bis 25 cm betragen. Das Gewicht pro Quadratmeter nimmt durch die intensivere Begrünung zu (siehe Tabelle 1). Die Gestaltung kann individuell an die gegebene Dachfläche angepasst werden (Stahr 2018, S. 196). Neben dem Anlegen von Aufenthaltsflächen ist die Umsetzung von Dachgärten möglich, wie in Abbildung 3 zu sehen ist. Um den Pflanzen ideale Lebensbedingungen zu bieten, muss die Aufbaustärke bis zu zwei Meter betragen, was sich in dem Gewicht von 200 bis 3000 kg pro m² widerspiegelt (Brune et al. 2017, S. 7, Stahr 2018, S. 196). In Abbildung 3 ist beispielhaft eine Dachgartenanlage dargestellt. Die intensive Dachbegrünung benötigt mehrschichtige Flachdachaufbauten, da die gewählten anspruchsvollen Pflanzen keine Staunässe vertragen. Durch das größere Gewicht und die Möglichkeit der Nutzung ist die intensive Begrünung mit höheren Kosten und höherem statischen Aufwand verbunden (Brune et al. 2017, S. 7, Stahr 2018, S. 196). In der folgenden Tabelle sind alle wichtigen Faktoren zu einer Übersicht zusammengefasst.

Tabelle 1: Vergleichende Darstellung von intensiver und extensiver Dachbegrünung (Quelle: Eigene Darstellung)

	Extensive Begrünung	Intensive Begrünung
Aufbaustärke der Systemerde	5 bis 20 cm (Stahr 2018, S. 195)	bis 25 cm, bei Bäumen und Sträucher bis 200 cm möglich (Stahr 2018, S. 196)
Vegetation	Moss-Sedum bis Gras-Kraut (Stahr 2018, S. 195)	Gräser bis Bäume (Stahr 2018, S. 196)

	Extensive Begrünung	Intensive Begrünung
Pflegeaufwand	gering (Stahr 2018, S. 195)	hoch (Stahr 2018, S. 196)
Bewässerung	keine bis auf Anwachszeitraum (Brune et al. 2017, S. 8)	notwendig (periodisch oder regelmäßig) (Stahr 2018, S. 196)
Nutzung	keine (Brune et al. 2017, S. 8)	Dachgarten, Erholungsraum (Brune et al. 2017, S. 8)
Kosten pro m²	15 bis 40 € / m ² (Brune et al. 2017, S. 8)	ab 60 € / m ² (Brune et al. 2017, S. 8)
Gewicht pro m²	60 bis 250 kg / m ² (Stahr 2018, S. 195)	150 bis 3000 kg / m ² (Brune et al. 2017, S. 8, Stahr 2018, S. 196)

In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit lassen sich positive Schlüsse ziehen. Für die Herstellung eines Gründaches werden 1,3 % der baulichen Gesamtkosten bei einem Gebäude und lediglich 0,4 % bei mehrgeschossigem Wohnbau veranschlagt (IASP 2019, S. 11). Zudem werden durch die Bedeckung des Daches mit Begrünung bis zu 80 % der Sonneneinstrahlung reflektiert (IASP 2019, S. 11) und die Dachoberfläche vor Witterungseinflüssen wie Regen, Hitze, Kälte oder ultravioletter Strahlung geschützt (Minke 2006, S. 14). Dadurch verlängert sich die Dachlebensdauer auf bis zu 40 Jahre bei einer extensiven Begrünungsart, wodurch Kosten für Reparatur oder Austausch reduziert werden (IASP 2019, S. 11).

Die im vorangegangenen Kapitel erwähnte Versiegelung und der Flächenverbrauch kann durch Dachbegrünung reduziert und teilweise ausgeglichen werden. Da die Begrünungssysteme durch das Bundesnaturschutzgesetz als Ersatz- und Ausgleichsmaßnahmen bei Bauvorhaben genutzt werden können, kann sie zum Teil die Neuversiegelung kompensieren (Minke 2006, S. 11). Begrünte Dächer werten die Gebäude sowie die Umgebung ästhetisch auf und verbessern die Aufenthaltsqualität. Zu unterschiedlichen Gestaltungsmöglichkeiten und kühlenden Effekten kann zudem Lärm vermindert werden. Pflanzen können Schall durch Absorption reduzieren, indem sie die Schallenergie in Bewegungsenergie und Wärmeenergie umwandeln (Minke 2006, S. 16). Hierbei ist allerdings nicht die

Pflanzenwahl entscheidend, sondern die Substratstärke. So kann eine Erdschicht von 20 cm bis zu 46dB absorbieren (Minke 2006, S. 16). Straßenlärm kann durch Dachbegrünung um sechs dB und von oben kommender Lärm von nassem Substrat um bis zu 18 dB vermindert werden (IASP 2019, S. 10).

Des Weiteren nehmen die Pflanzen CO₂ aus der Luft auf, speichern den Kohlenstoff und geben Sauerstoff wieder ab. Sauerstoff ist eine essentielle Komponente, um Menschen, Flora und Fauna am Leben zu erhalten (Minke 2006, S. 12). Neben der Sauerstoffproduktion unterstützen Pflanzen die Luftreinigung. Sie können Schmutz- und Staubpartikel aus der Luft filtern und gasförmige Schadstoffe sowie Aerosole absorbieren. Durch ihre Blattoberfläche bleiben die Partikel haften und gelangen durch Niederschlag in den Boden. Pflanzen gelten demnach als so genannte „CO₂-Senken“, indem sie bis zu 375 g Kohlenstoff pro m² im Jahr aufnehmen können (IASP 2019, S. 10). Insbesondere Moose können bis zu 2,2 kg CO₂ im Jahr aufnehmen, was der Effizienz eines Intensivgrünlandes entspricht (Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Umwelt und Energie o.J., S. 7).

Begrünte Dächer haben sowohl wärmende als auch kühlende Dämmwirkungen. Für das Wohnklima ist die Dämmwirkung der Dachbegrünung in den Sommermonaten wesentlich bedeutsamer als in den Wintermonaten. Bei einer Lufttemperatur von 30 °C steigt die Temperatur im Gründachsubstrat nicht über 20 °C und verhindert somit das Aufheizen der Innenräume. Gründe dafür sind einerseits die Verschattung der Systemerde durch die Bepflanzung. Die Sonnenstrahlen können somit das Erdreich nicht erreichen und es nicht erwärmen. Andererseits sorgen Verdunstung, Photosynthese und Reflexion der Pflanzen für das Aufbrauchen der Sonnenergie, wodurch sie nicht in Wärme umgewandelt werden kann (Minke 2006, S. 16). Im Winter haben die Dachbegrünungssysteme einen Dämmeffekt von bis zu 10 % und verringern den Wärmeverlust bei einer Aufbaustärke zwischen zehn bis 15 cm um bis zu 10 % im Vergleich zu einem Kiesdach (IASP 2019, S. 11). Der Dämmeffekt entsteht durch die im Erdreich befindliche Luft, Wasser sowie den oben beschriebenen Effekten. Hierbei ist die Dämmwirkung von der Substratstärke, Durchfeuchtung und dem bestehenden

Dämmstandard des Gebäudes abhängig. So entspricht beispielsweise eine durchfeuchtete Substrathöhe von zehn cm mit einem Wärmedurchlasswiderstandes von 0,14 bis 0,40 m² * K / W einer konventionellen Dämmung von sechs bis 16 mm (Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Umwelt und Energie o.J., S. 9).

Im Kontext der urbanen Hitzeinseln reduzieren grüne Dächer deutlich die Oberflächentemperatur und erhöhen die Verdunstung. So verringert eine Dachbegrünung mit 15 cm Substratstärke den Wärmeeintrag an einen strahlungsintensiven Sommertag um bis zu 60 % und die Oberflächentemperatur um bis zu 25 °C gegenüber Dächern aus Bitumen oder Kies (IASP 2019, S. 6). Zudem wird die Einstrahlungsenergie um bis zu 67 % in latente Wärme umgewandelt, die nicht die Umgebungsluft erwärmt. Außerdem können bis zu 75 % des Jahresniederschlages bei extensiver Begrünung in Verdunstung umgesetzt werden (IASP 2019, S. 7). Neben dem Niederschlag wird auch die Strahlungsbilanz in den Sommermonaten zu 58 % bei extensiver Dachbegrünung in Verdunstungskälte umgewandelt. Die Luftfeuchtigkeit kann ebenfalls um bis zu 20 % gegenüber unbegrünter Flächen im Sommer erhöht werden und je nach Dimensionierung kann Dachbegrünung den Wärmeinseleffekt um bis zu drei °C reduzieren (IASP 2019, S. 7)

Eine weitere große Bedeutung besitzen Dachbegrünungen für den Wasserrückhalt und die Wasserspeicherung. Bei extensiver Begrünung können im Durchschnitt bis zu 90 % des Gesamtniederschlages zurückgehalten werden. Aufgrund dieses Rückhaltevermögen und des zeitlich versetzten Abflusses tragen sie zur Verringerung von Hochwasserspitzen und der Entlastung der Kanalisation bei. So können einige Dachbegrünungssysteme bis zu 53 l / m² temporär zwischenspeichern, während intensive Dachbegrünungssysteme bis 160 l / m² zwischenspeichern können. Auch hier ist dafür die Substratstärke entscheidend (Minke 2006, S. 17, IASP 2019, S. 8).

Einen weiteren Nutzen bietet die Dachbegrünung für die Fauna. Begrünte Dächer bieten vor allem flugfähigen Insekten, wie Bienen, Wespen oder Schmetterlingen einen Lebensraum. So konnten bisher 236 Wildbienenarten, darunter auch

bedrohte Arten, auf begrünten Dächern nachgewiesen werden, die sie als Lebensraum und Nahrungsquellen nutzen (IASP 2019, S. 9). Gründächer wirken demzufolge dem Verlust von Lebensraum entgegen und tragen zum Erhalt der Biodiversität bei (IASP 2019, S. 7).

1.4.1.2 Baumrigolen-Systeme

Im städtischen Raum ist der Anteil an versiegelten Flächen hoch und der natürliche Wasserhaushalt gestört, wodurch die Stadtbäume mit Bodenverdichtung, Trockenstress und Platzmangel konfrontiert sind. (Dickhaut et al. 2018). Lösungsansätze können hierbei nachhaltige Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen, wie beispielsweise die Baumrigolen-Systeme sein, die dafür sorgen, dass Bäume mit Wasser versorgt werden und mehr Wasser auf natürliche Weise versickern kann. Sie liegen dem Prinzip der Mulden-Rigolen-Elemente zugrunde (siehe Anhang 5), welches mit Bäumen kombiniert werden (Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH 2022a). Beispielsweise in Stockholm oder Philadelphia, kommen Baumrigolen-Systeme regelmäßig zum Einsatz. Trotz der positiven Effekte auf den Wasserhaushalt und der Wasser-Versorgungssicherheit der Bäume finden die Systeme bisher kaum Anwendung in Deutschland (Sommer et al. 2017, S. 22, Heiden et al. 2001, S. 36).

Aufbau, Funktionsweise und ökologischer Nutzen

Bei dem Grundprinzip sorgen Mulden und Vertiefungen im Boden dafür, dass sich Niederschlagswasser in diesen abgesenkten begrünten Flächen sammelt und kurzzeitig zwischengespeichert wird. Die Mulden sind mit versickerungsfähigem Mutterboden ausgekleidet, welcher ermöglicht, dass das Regenwasser leichter in die darunter befindliche Rigole sickern kann und gefiltert wird. Die Rigole besteht hauptsächlich aus hochporigen Materialien wie Lavagestein oder Grobkies und speichert das Regenwasser für eine längere Zeitperiode zwischen (Heiden et al. 2001, S. 31 f.). Neben der Zwischenspeicherung versickert das

Wasser im Erdreich und ermöglicht so eine Grundwasserneubildung (siehe Abbildung 4). Bei größeren Regenmengen wird das Wasser, das nicht mehr versickern oder zwischengespeichert werden kann, durch Drainageelemente gedrosselt abgeleitet. Neben Mulde und Rigole müssen weitere technische Anlagen ergänzt werden, um das System vor Überlastung zu schützen. Zwischen der Mulde an der Oberfläche und der Rigole im Untergrund wird eine direkte Verbindung in Form eines Muldenüberlaufs geschaffen. Dieser beför-



Abbildung 4: Beispieldarstellung eines Baumrigolen-Systems (Quelle: Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH o.J.)

dert im Fall von starken Regenfällen das Regenwasser direkt in die Rigole, wodurch eine Überlastung vermieden wird (Heiden et al. 2001, S. 33). Durch die Kombination von Mulden-Rigolen-System und Baum wird die unterirdische Rigole zu einem Teil zum Wurzelraum des Baumes. Diese Kombination ermöglicht, dass einerseits die Verdunstungskomponente durch den Baum hinzukommt und andererseits der Baum optimaler mit Wasser versorgt wird.

Unter dem Wurzelraum befindet sich der Rigolenteil, der das restliche Sickerwasser aufnimmt und überwiegend von einem Betonbecken begrenzt ist. Dieses Reservoir dient vor allem zur Wasserversorgung des Baumes, um in Trockenperioden seine erhöhte Verdunstungsrate auszugleichen. Das überschüssige Wasser kann durch umgebende Kiesschüttungen aufgenommen und abgeleitet werden, oder seitlich in das Erdreich versickern. Die Baumrigolen-Systeme können je nach Standort und Ausführung individuell geplant werden. Eine eigenständige Planungshilfe oder Regelwerke für Baumrigolen existieren nach aktuellem Stand nicht. Allerdings lassen sich aus anderen Regelwerken für Rigole und Mulde, wie DWA A-138 und DIN EN 752, Vorgaben ableiten. So sollte beispielsweise für einen Baum ein durchwurzelbares Bodenvolumen von mindestens 12 m³ und eine Mindesttiefe von 1,5 m nach den Vorgaben der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL) geschaffen werden (Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH 2022a).

Der Niederschlagszufluss bei Baumrigolen variiert je nach Gefälle und Dimensionierung der Mulde. Die Dimensionierung des Versickerungsraumes bemisst sich aufgrund von Platzmangel im städtischen Raum überwiegend nur an der Oberfläche der Baumscheibe, dem Baumstammdurchmesser, und hat dementsprechend nur eingeschränkte Aufnahmekapazitäten. Für optimale Versickerungsbedingungen sollte sich bei der Planung nicht an der Baumscheibe orientiert werden. Durch die Ausdehnung des Wurzelraums, je nach Baumart, sind die Sickerstrecken deutlich länger als bei Mulden-Rigolen-Systemen ohne Baum (Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH 2022a).

Solche Baumrigolen-Systeme werden primär in stark versiegelten und urbanisierten Räumen realisiert, um einerseits den Oberflächenabfluss zu minimieren und andererseits die Verdunstung und Versickerung zu erhöhen (Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH 2022a). Da Baumrigolen Einfluss auf alle drei Komponenten des Wasserhaushaltes, Verdunstung, Versickerung und Abfluss, haben, tragen sie zur Annäherung an den natürlichen Wasserhaushalt bei. Denn durch Transpiration der Blätter ist die Verdunstungskomponente im Vergleich zu allgemeinen Mulden-Rigolen-Systemen deutlich erhöht. Eine Eiche besitzt beispielsweise im Juni eine Transpirationsrate von bis zu drei Litern pro m^2 / d und sorgt damit für Verdunstungskälte und erhöhte Luftfeuchtigkeit. Jedoch ist die Anzahl der Bäume entscheidend, in welchem Ausmaß diese Effekte auftreten (Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH 2022a, Matzarakis o.J., S. 9). Des Weiteren tragen Bäume zur Verschattung bei und verhindern das Aufheizen der versiegelten Flächen und wirken somit urbanen Hitzeinseln entgegen. Studien deuten darauf hin, dass im Bereich dichter Kronen die UV-Strahlung um bis zu 90 % geringer sei. Des Weiteren kann die Lufttemperatur im Schatten der Baumkrone um bis zu 20°C geringer sein im Vergleich zur Lufttemperatur außerhalb des Schattenbereiches (Moser et al. 2017, S. 99). Wie die Pflanzen binden auch die Bäume CO_2 aus der Atmosphäre und wandeln es unter anderem in Sauerstoff um. Beispielsweise können Eichen mit 30 m Höhe und einem Stammdurchmesser von 32 cm eine Menge von circa 1,6 t CO_2 pro Jahr aus der Atmosphäre binden, als Kohlenstoff speichern und den Sauerstoff wieder an die Atmosphäre abgeben (Bayrische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft 2011, S. 6).

Diese Menge entspricht circa einer Autofahrstrecke von über 8.100 km (Westdeutscher Rundfunk Köln 2020). Andere Schadstoffe aus der Luft werden ebenfalls über die Blattoberfläche aufgenommen (Moser et al. 2017, S. 99 f.). Die quantitative Wirkung der Baumrigolen-Systeme auf den Wasserhaushalt und das Mikroklima ist abhängig von Faktoren, wie der Baumart und dem Baumalter, der Größe der Mulde, der Klimaregion und der Regenwasserabflussmenge. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass bei einem erhöhten Einsatz von Baumrigolen-Systemen positive mikroklimatische Effekte zu erwarten sind (Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH 2022a).

Durch das Umsetzungsdefizit in Deutschland können keine konkreten Angaben zu den Kosten pro Baumrigole gemacht werden. Allerdings setzen sich die Kosten aus den Erdarbeiten, den konstruktiven Elementen, dem Baum und dem benötigten Bodensubstrat sowie den laufenden Unterhaltungskosten zusammen, wodurch sich aus diesen Komponenten der Preis errechnen lassen kann (Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH 2022a). Mulden-Rigolen-Systeme kosten durchschnittlich circa 20 € / m² (Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH 2022b). Die Preise für die Bäume unterscheiden sich je nach Art und Größe.

2 Praxisbeispiel „Am Mönchhof 22-26“ in Bad Tabarz

2.1 Klimatische Eckdaten und Verortung – Bad Tabarz

Der Luftkurort Bad Tabarz, ehemals Tabarz, liegt im Landkreis Gotha am nordwestlichen Rand des Thüringer Waldes. Im Jahr 2017 wurde dem Ort der Zusatz „Bad“ staatlich anerkannt und gehört seit dem Jahr 2016 zu den Kneipp-Heilbädern (Verband Deutscher Kneippheilstädter und Kneippkurorte o.J.). Bad Tabarz weist eine Bevölkerungszahl von circa 4.000 Personen auf und erstreckt sich auf einer Fläche von circa 21 km² (TLS 2021).

Der Ort zeichnet sich klimatisch mit ganzjährigen Niederschlägen und gemäßigten Temperaturen aus. Im Zuge des Klimawandels hat sich die Niederschlagsmenge zwischen 1979 und 2022 zwar nur geringfügig verringert, aber dafür stieg die durchschnittliche Jahrestemperatur um circa 2 °C an (climate-data.org

2021, meteoblue AG 2022). Die Tabelle zeigt ausgewählte klimabezogene Eckdaten für Bad Tabarz auf.

Tabelle 2: Übersicht über die klimatischen Eckdaten von Bad Tabarz

Niederschlag	
Jahresniederschlagsmenge	729 mm (climate-data.org 2021)
Durchschnittliche Niederschlagsveränderung zwischen 1979 und 2022	– 34 mm (meteoblue AG 2022)
Durchschnittlicher Starkregenmen- genanteil zwischen 2001 und 2018	4 – 6 % (Technische Universität Dresden 2022)
Durchschnittliche Anzahl an Regenta- gen pro Monat	9 Tage (climate-data.org 2021)
Temperatur	
Durchschnittstemperatur	8,4 °C (climate-data.org 2021)
Durchschnittliche Temperaturverän- derung zwischen 1979 bis 2022	+ 2 °C (meteoblue AG 2022)
Hitzebelastung im Sommer 2019	sehr gering (Technische Universität Dresden 2022)
Anzahl heiße Tage im Sommer 2019	zwischen 3 und 16 Tagen (Technische Uni- versität Dresden 2022)

In Hinblick auf die jährliche Niederschlagsmenge, der steigenden Durchschnitts-
temperatur und der Anzahl an heißen Tagen, die in der Tabelle 2 aufgelistet
werden, entsteht ein Regenwasser-Nutzungspotenzial, welches für Versicke-
rungs- und Verdunstungsmöglichkeiten ausgeschöpft werden sollte.

2.2 „Am Mönchhof 22-26“

Das gewählte Wohngebäude „Am Mönchhof 22-26“ (siehe Abbildung 5), welches als Praxisbeispiel herangezogen wird, liegt im Nordwesten von Bad Tabarz. Eigentümerin ist die Wohnungs- und Siedlungsbaugenossenschaft Waltershausen eG. Im Gespräch mit der WSG Waltershausen eG wurde dieses Gebäude vorgeschlagen, da laut Aussagen der Genossenschaft Sanierungsbedarf besteht. Der fünfgeschossige und



Abbildung 5: „Am Mönchhof 22-26“ (Quelle: Eigene Darstellung)

unterkellerte DDR-Plattenbau des Typs „WBS 70“ aus dem Jahr 1989 hat mit zwei leicht versetzten Gebäudesegmenten eine Kapazität von 35 Wohnungen (siehe Anhang 24). Nach Angaben der WSG Waltershausen eG wurde das Gebäude im Jahr 2006 teilsaniert. Ursprünglich bestand der Gebäudekomplex aus drei Gebäudesegmenten, wovon ein Segment ebenfalls im Zuge der Sanierungsarbeiten im Jahr 2005 auf der Nordostseite abgerissen wurde (siehe Anhang 24). Das Gebäude befindet sich in Hanglage Richtung Südosten und hat dementsprechend einen Höhenversatz zwischen den zwei Gebäudesegmenten (siehe Anhang 20).

2.3 Resümee zur Auswahl des Praxisbeispiels

Seit November 2022 wird von der Ingenieurgenossenschaft EnergieWerkStadt® eG, wozu das Ingenieurbüro JENA-GEOS® gehört, ein energetisches Quartierskonzept für das Neubauprojekt „Gartenstadt Bad Tabarz“ erarbeitet (Gemeinde Bad Tabarz 2022). Im Zuge dessen wurde in Erwägung gezogen, energetische und ökologische Einsparungspotenziale im Detail an einem bereits bestehenden Gebäude, ebenfalls in Bad Tabarz, zu untersuchen. Die Auswahl eines kommunalen Wohngebäudes erfolgte aufgrund der quantitativen Wirkungen von Maßnahmen auf ein Mehrparteienhaus im Vergleich zu einem Einfamilienhaus. Bei

Sanierungsmaßnahmen profitieren demnach mehrere Haushalte. Des Weiteren besteht ein dringender Handlungsbedarf zu Themen wie Klimaschutz, Energieeffizienz und Sanierung für kommunale Wohngebäude. Neben steigenden Energiepreisen müssen sich kommunale Anbieter mit den Herausforderungen des Klimawandels und geringer Sanierungsrate auseinandersetzen (Jahn et al. 2015, S. 7). In Bad Tabarz ergibt sich außerdem durch die erhöhte jährliche Niederschlagsmenge und die zunehmende Durchschnittstemperatur ein Regenwassernutzungspotenzial. Die Masterarbeit knüpft daher an das energetische Quartierskonzept an und beleuchtet die energetischen Optimierungsmöglichkeiten im Rahmen von konventionellen und ökologischen Sanierungs- sowie Anpassungsmaßnahmen an dem kommunalen Bestandsgebäude der WSG Waltershausen eG.

3 Frage- und Zielstellungen

Die vorliegende Masterarbeit soll einen Anreiz schaffen konventionelle Sanierungsmaßnahmen zu überdenken und Maßnahmen einzusetzen, die nicht nur positive Wirkungen auf den Energieverbrauch haben, sondern auch einen Beitrag zur Klimaanpassung, zum Klimaschutz und zur Biodiversität leisten. Die Thesis geht der Frage nach, welche ökologischen, energetischen und finanziellen Auswirkungen Dachbegrünung und Baumrigolen-Systeme auf Wohngebäude gegenüber konventionellen Sanierungsmaßnahmen haben.

Ziel der Masterarbeit ist es, Aufklärungsarbeit für ökologisch-energetische Sanierungs- und Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel zu leisten. Zudem sollen hierdurch Anreize geschaffen werden, effiziente und klimafreundliche Maßnahmen zukünftig vermehrt umzusetzen. Die Masterarbeit kann durch die abschließenden Handlungsempfehlungen als möglicher Leitfaden für die WSG Waltershausen eG dienen.

4 Methodisches Vorgehen

4.1 Allgemeines Vorgehen

Das methodische Vorgehen kann in vier grundlegende Schritte unterteilt werden. Zunächst werden für den theoretischen Abschnitt der Masterarbeit Literatur- und Internetrecherchen durchgeführt. Auf der Grundlage dieser Recherchen wird die Forschungsfrage entwickelt und die zu berechnenden Kenngrößen festgelegt. Für die festgelegten Kenngrößen werden Informationen über das Gebäude eingeholt, die zur Berechnung benötigt werden. Im zweiten Schritt wird der energetische und bauliche Ist-Zustand des ausgewählten Gebäudes dargestellt und analysiert. Die Berechnungen der energetischen, ökologischen und finanziellen Kenngrößen für die Dachbegrünung sowie für die äußere Fassadendämmung und Dachdämmung werden anschließend durchgeführt. Die Baumrigolen-Systeme, die als Anpassungsmaßnahme gelten, werden gesondert unter den Gesichtspunkten den ökologischen und finanziellen Auswirkungen betrachtet, da keine direkten energetischen Einflüsse auf das Gebäude bestehen. Auf Grundlage der Berechnungen erfolgt die Auswertung der Ergebnisse und der Vergleich der ökologischen mit den konventionellen Sanierungs- und Anpassungsmaßnahmen hinsichtlich energetischer, ökologischer und finanzieller Auswirkungen. Der Vergleich erfolgt ebenfalls unter Berücksichtigung des energetischen Ist-Zustandes des Gebäudes. Daraus ergeben sich die Interpretation der Ergebnisse, eine Diskussion sowie das Ableiten von Handlungsempfehlungen.

Auswahl des Praxisbeispiels

Als ein mögliches Praxisbeispiel für die Masterthesis wurde zunächst die Tabarzer Wohnungsbaugesellschaft mbH kontaktiert, die jedoch keine weiteren zeitlichen Kapazitäten zur Verfügung hatte, um diese Arbeit zu unterstützen. Da die Wohnungsbau- und Siedlungsgenossenschaft Waltershausen eG ebenfalls kommunale Wohngebäude in Bad Tabarz besitzt, wurde diese kontaktiert. Nach positiver Rückmeldung wurde sich auf das Wohngebäude „Am Mönchhof 22-26“ für die Berechnungen und Vergleiche geeinigt, da laut Aussagen der WSG die letzten Sanierungsmaßnahmen bereits einige Jahre zurückliegen.

4.2 Datenerhebung – Kenngrößen

Für die Berechnungen und den anschließenden Vergleich der Sanierungs- und Anpassungsmaßnahmen wurden im Vorfeld die zu ermittelnden Kenngrößen festgelegt. Die Kenngrößen sind drei Bereichen, den energetischen, ökologischen und finanziellen Auswirkungen, zugeordnet:

Energetische Auswirkungen

Bei den energetischen Auswirkungen wurde sich für Wärmedurchlasswiderstand, Wärmedurchgangswiderstand und U-Wert entschieden, da die Werte zu den grundlegenden bauphysikalischen Grundlagen gehören, um ein Bauteil nach seiner Energieeffizienz zu beurteilen. Die inneren und äußeren Wärmeübergangswiderstände sind festgelegte Werte, die für die Berechnungen relevant sind.

- Innerer und äußerer Wärmeübergangswiderstand (R_{se} und R_{si}) (siehe Anhang 6)
 - Unterscheidung in inneren (R_{si} - beheizte Seite) und äußeren (R_{se} - unbeheizte Seite) Wärmeübergangswiderstand
 - Widerstände treten an Bauteiloberflächen auf und haben definierte Werte nach ISO 6946 je nach Richtung und Winkel des Wärmestromes (aufwärts, abwärts und horizontal) (energie-m Energieberatung 2021c)
- Wärmedurchlasswiderstand R (siehe Anhang 7)
 - beschreibt die Dämmwirkung eines Bauteils
 - je höher der Wert, umso besser sind die Wärmedämmeigenschaften eines Bauteils (energie-m Energieberatung 2021b)
- Wärmedurchgangswiderstand R_T ($m^2 \cdot K / W$) (siehe Anhang 8)
 - Summe der Wärmedurchlasswiderstände der einzelnen Bauteile sowie des inneren und äußeren Wärmeübergangswiderstandes
 - je höher der Wert, umso besser sind die Wärmedämmeigenschaften der Bauteile
- Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) ($W / m^2 \cdot K$) (siehe Anhang 8)
 - Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstands
 - Kennzahl des Wärmedurchgangs durch die Gebäudehülle

- gibt den Wärmestrom an, der das Bauteil auf 1 m² bei unterschiedlicher Außen- und Innentemperatur von einem K durchdringt
- je kleiner der Wert, umso besser sind Wärmedämmeigenschaften der Bauteile (Drewer et al. 2013, S. 22)

Ökologische Auswirkungen

Die Kenngrößen der ökologischen Auswirkungen wurden primär aufgrund des Regenwassernutzungspotenzials ausgewählt. Für die Verdunstungskälte als auch das Kompensieren von Starkregenereignissen sind die Kenngrößen der Verdunstung und Aufnahmekapazität essenziell. Die CO₂-Bindung und -Einsparung kann auf alle ausgewählten Sanierungs- und Anpassungsmaßnahmen angewendet werden.

- CO₂ – Bindung/-Einsparung (g / m² / a) / (kg / m² / a)
 - wie viel Gramm/Kilogramm CO₂ pro m² und pro Jahr gebunden wird
- Verdunstung (l / m²)
 - wie viel Liter Wasser pro m² verdunstet
- Wasseraufnahmekapazität (l / m²)
 - wie viel Liter Wasser pro m² aufgenommen wird

Finanzielle Auswirkungen

Wirtschaftlich betrachtet, spielen die Investitionskosten eine wichtige Rolle bei der Umsetzungsplanung. Hierbei werden nicht nur die Materialkosten betrachtet, sondern auch die Kosten für die Ausführungsarbeiten.

- Baukosten (€ / m²) / (€)
 - die Gesamtkosten für die Sanierungs-/Anpassungsmaßnahme und/oder der Quadratmeterpreis

5 Datenerhebung

Aufgrund der Übersichtlichkeit wurde sich für jeweils eine Sanierungs- und Anpassungsmaßnahme entschieden, die in den folgenden Unterkapiteln dargestellt werden. Die Auswahl der jeweiligen Varianten erfolgte nach dem Vergleich mehrerer Varianten. Die Varianten mit den vergleichbarsten energetischen Werten werden in dieser Arbeit vorgestellt. Des Weiteren orientieren sich die Berechnungen in diesem Kapitel an Durchschnittswerten und Ist-Preisen und können in Realität abweichen. Die Putz-, Armierungs- und Schutzfolienschichten werden durch ihre geringe Stärke in den Berechnungen vernachlässigt.

5.1 Energetischer und baulicher Ist-Zustand des Gebäudes

5.1.1 Maße und Aufbau

Das 1989 noch in der DDR erbaute Wohngebäude nach dem WBS-70-Standard besteht seit 2005 aus zwei unabhängigen Gebäudesegmenten, die leicht versetzt angeordnet und mit einem nach innen verlaufenden Drempelgeschoss konstruiert sind. Das ursprünglich mittlere Gebäudesegment ist circa 15 m tief, circa 19 m breit und hat zwei Hauseingänge (siehe Anhang 17). Die Gebäudesegmente, die an der westlichen und östlichen Seite des Mittelsegments angeschlossen haben und wovon nur noch das im Westen steht, ist circa 12 m tief, circa 14 m breit und hat einen Hauseingang (siehe Anhang 17). Die normierte Höhe des „WBS 70“ beträgt bei einem Fünfgeschosser circa 17 Meter je Ge-

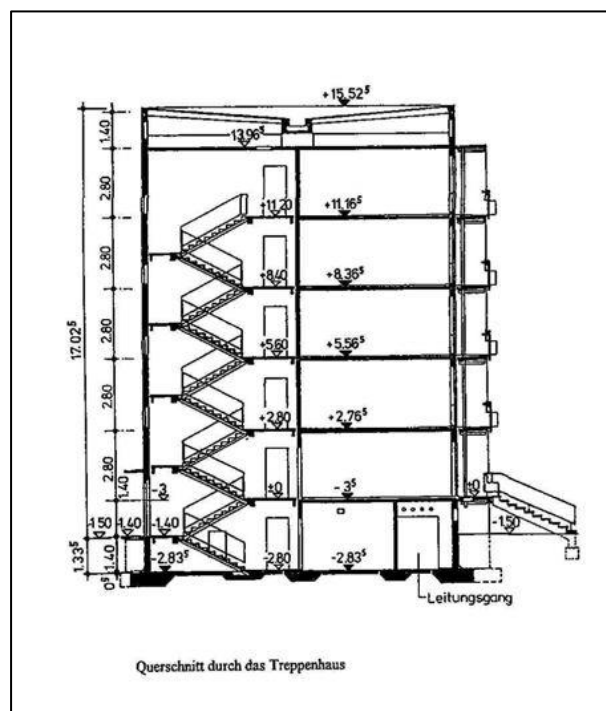


Abbildung 6: Beispieldarstellung eines fünfgeschossigen WBS70-Gebäudes (Quelle: Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau 1997)

bäudesegment (siehe Abbildung 6) (Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau 1997, S. 21). Der DDR-Plattenbau hat mit 35 Wohnungen

eine Nutzfläche von 2.293 m² (siehe Anhang 22) und wurde in modularer Bauweise errichtet. Da der Gebäudekomplex auf einer Hanglage erbaut wurde, betrug der Höhenversatz 1 m. Durch den Abriss des dritten Gebäudesegmentes ergibt sich zwischen erstem und zweitem Gebäudesegment ein Höhenversatz von 50 cm (siehe Anhang 20). Der Gebäudekomplex ist mit 35 Balkonen in südöstlicher Ausrichtung ausgestattet (siehe Anhang 18, 24).

5.1.2 Dach und Dachdämmung

Nach Angaben der WSG aus dem Jahr 2005 ist die oberste Geschossdecke zum belüfteten Kaltdach in Drempelgeschossbauweise mit Mineralfaserplatten und einer Schutzlage aus Dachpappe versehen (siehe Anhang 15) (Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau 1997, S. 92). Die Stärke der Wärmedämmung beträgt sechs cm und die Stärke der Betondecke 14 cm. Die Fläche der Geschossdecke zum Drempel beträgt 468,1 m² (siehe Anhang 19). Das Drempelgeschoss ist in Form eines Schmetterlingsdaches, der Umkehrung eines Satteldaches, aufgebaut, was in Abbildung 7 zu erkennen ist. Die Höhe des Dachraumes von circa 1,50 m, welche mit zunehmenden Neigungswinkel nach innen abnimmt, lässt nur ein eingeschränktes Bekriechen zu. Durch den Neigungsgrad von 6 % (Neigungswinkel 3,5°) der WBS70-Serie fließt das Regenwasser in die Mittelrinne und wird dort über innenliegende Rohre abgeleitet (Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau 1997, S. 115). Das Dach besteht aus Stahlbetondachkassettenplatten, die einerseits auf dem Drempel und andererseits auf dem innenliegenden Trogträger aufliegen (Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau 1997, S. 91). Nach Angaben der WSG sind durch Arbeiten im Drempelgeschoss die Mineralfaserplatten zusammengedrückt und die Dachpappe beschädigt (siehe Anhang 15). Die Dachhaut ist unverändert und wurde 1990 mit einem Pflegeanstrich versiegelt. Das Dach ist mit sechs Naturlüftungsschächten, sechs Sanitärlüftern und drei Regeneinläufen versehen (siehe Anhang 25). Bis auf die Geschossdecke ist das Schmetterlingsdach ungedämmt.

5.1.3 Fassade und Fassadendämmung

Die Fassade besteht aus WBS70-typischen Dreischichtenplatten mit offenem Fugensystem aus Beton und ist mit einer Wärmedämmung (Kerndämmung) ausgestattet. Der Aufbau von innen nach außen besteht aus der Betonwand mit 14 cm Stärke, einer Mineralfaser- als auch Styropordämmung mit sechs cm Stärke und einer Wetterschalung mit Waschbetonoberfläche mit ebenfalls sechs cm Stärke (siehe Anhang 19). Typisch für DDR-Plattenbauten sind die vorgefertigten Außenwandelemente, die in sogenannter „Sandwichbauweise“ vor Ort in der Außenwand verankert werden (Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau 1997, S. 37). Die Fläche der Fassade beträgt 1.173 m² und der Dämmungsaufbau entspricht des Wärmedämmverbundsystems.

5.1.4 Ausgeführte Sanierungsmaßnahmen

Im Jahr 2005 wurde das nordöstliche Gebäudesegment mit 15 Wohnungen abgerissen (siehe Anhang 24). Energetisch betrachtet hatte dies keine Negativeffekte, da die Trennwände der Gebäudesegmente als Außenwände errichtet worden sind. In den Monaten Juli bis September des Jahres 2006 wurde das Objekt teilsaniert. Bei dem Wohnblock „Am Mönchhof 22-26“ wurden die Holzfenster durch Kunststofffenster ausgetauscht und auf der abgerissenen Seite wurde in die freiliegende Giebelwand Fenster eingesägt und die Wärmedämmung erneuert (siehe Abbildung 7) (siehe Anhang 24). Ein neuer Anstrich der Gebäudehülle wurde ebenfalls realisiert. In den darauffolgenden Jahren wollte die WSG die Dämmung des DREMPELS und die Instandsetzung der Treppenhäuser durchführen. Zu den beiden Sanierungsmaßnahmen sind keine Umsetzungsdaten bekannt (siehe Anhang 24).



Abbildung 7: Ostseite des Wohnblockes (Quelle: WSG Waltershausen eG o.J.)

5.1.5 Energetische Ist-Werte

Nach dem ausgestellten Energieausweis im Jahr 2020 (siehe Anhang 22) gehört „Am Mönchhof 22-26“ zur Energieeffizienzklasse C mit einem durchschnittlichen Endenergieverbrauch von 80 kWh / m² / a, sprich 183.440 kWh / a (siehe Anhang 9).

Energetischer Ist-Wert der Außenwände

- R_{si} mit 0,13 m² * K / W
- Tragschale aus Beton: 14 cm mit 0,085 m² * K / W
- Wärmedämmung aus Mineralfaser: 6 cm mit 1,200 m² * K / W
- Wetterschale mit Waschbetonoberfläche: 6 cm mit 0,036 m² * K / W
- R_{se} mit 0,04 m² * K / W

→ daraus ergibt sich ein Wärmedurchgangswiderstand R von 1,49 m² * K / W und ein Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von 0,671 W / m² * K (siehe Anhang 9)

Nach den Vorgaben der DIN 4108:2013-02¹ beträgt der Mindestwert der Wärmedurchlasswiderstände für Wände beheizter Räume gegen Außenluft 1,2 m² * K / W (ift Rosenheim et al. 2013, S. 11). Der Ist-Zustand mit 1,32 m² * K / W erfüllt somit die Mindestanforderungen für Außenwände.

Energetischer Ist-Wert der Decke zum Drempegelgeschoss

- R_{si} mit 0,10 m² * K / W
- Betondecke: 14 cm mit 0,085 m² * K / W
- Wärmedämmung aus Mineralfaser: 6 cm mit 1,200 m² * K / W
- R_{se} mit 0,04 m² * K / W

→ daraus ergibt sich ein Wärmedurchgangswiderstand R von 1,42 m² * K / W und ein Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) von 0,702 W / m² * K (Siehe Anhang 9).

¹ Hierbei werden die Werte der inneren und äußeren Wärmeübergangswiderstände (R_{si} und R_{se}) des Wärmestroms vernachlässigt.

Nach den Vorgaben der DIN 4108:2013-02 beträgt der Mindestwert der Wärmedurchlasswiderstände für Decken beheizter Räume nach oben und für Flachdächer $1,2 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ (ift Rosenheim et al. 2013, S. 11). Der Ist-Zustand mit $1,28 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ erfüllt somit die Mindestanforderungen für Decken beheizter Räume nach oben.

Die Werte der Wärmedurchlasswiderstände von Fassade und Drempelgeschossdecke zeigen, dass die Mindestwerte nur knapp überschritten werden und dementsprechend Verbesserungsmaßnahmen erforderlich sind, um die Anforderungen an die zukünftigen Vorgaben des GEG erfüllen zu können. Die Erhöhung der Wärmedämmungsstärke ist hierbei die primäre Maßnahme.

5.2 Variante 1 – konventionelle Sanierung

5.2.1 Äußere Fassadendämmung

Bei dieser Variante wird ein WDVS mit 20 cm Dämmschichtstärke aus dem gängigen Dämmmaterial expandiertes Polystyrol (EPS) auf die bereits bestehende Fassade mit Klebermörtel angebracht und mit einer Armierungsschicht aus Gittergewebe und Mörtel bewehrt. Mit einem Unterputz und Oberputz wird das neue WDVS versiegelt. Spätere Malerarbeiten gleichen die Fassade an den farblichen Ausgangszustand an.

5.2.1.1 Energetische Auswirkungen

- R_{si} mit $0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$
- Tragschale aus Beton: 14 cm mit $0,085 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$
- Wärmedämmung aus Mineralfaser: 6 cm mit $1,200 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$
- Wetterschale mit Waschbetonoberfläche: 6 cm mit $0,036 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$
- Wärmedämmung aus Polystyrol-Hartschaumplatten (WLS² 035): 20 cm mit $5,714 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$

² Die WLS sind die Wärmeleitstufen und geben die Wärmeleitfähigkeit von Dämmmaterialien an. In der WLS 035 sind beispielsweise alle Dämmmaterialien, die eine Wärmeleitfähigkeit von $0,035 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ haben (BauNetz Wissen o.J.).

- R_{se} mit $0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$

→ daraus ergibt sich ein Wärmedurchgangswiderstand R von $7,205 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ (siehe Anhang 10)

und ein Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von $0,138 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$ (siehe Anhang 10)

Mit einer Dämmung von insgesamt 26 cm Stärke kann der U-Wert im Vergleich zum Ist-Zustand um das Fünffache verringert werden.

Energieeinsparung und Auswirkungen auf den Endenergieverbrauch

Die Differenz des U-Wertes zwischen Ist-Zustand und Variante 1 beträgt $0,533 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$. Somit ergibt sich eine Energieeinsparung bei 70 KKh Temperaturunterschied und einer 1.173 m^2 großen Fassadenfläche von circa $43.764 \text{ kWh} / \text{a}$ (siehe Anhang 10).

Der durchschnittliche Endenergieverbrauch von $183.440 \text{ kWh} / \text{a}$ könnte sich durch Variante 1 auf $139.675 \text{ kWh} / \text{a}$ reduzieren und damit die Energieeffizienzklasse des Gebäudes von C auf B mit circa $61 \text{ kWh} / \text{m}^2 / \text{a}$ statt $80 \text{ kWh} / \text{m}^2 / \text{a}$ verbessern (siehe Anhang 10).

5.2.1.2 Ökologische Auswirkungen

CO₂-Einsparung

Die Menge CO₂ beträgt bei dem Ist-Zustand der Wärmeversorgung mit Fernwärme circa $0,2 \text{ kg} / \text{kWh}$. Mit der Energieeinsparung der Fassadensanierung von $43.765 \text{ kWh} / \text{a}$ können pro Jahr 8.75 t eingespart werden (siehe Anhang 10).

5.2.1.3 Finanzielle Auswirkungen

Für die zusätzliche WDVS-Dämmung der 1.173 m² großen Fassade entstehen die folgenden Kosten für die Materialien sowie für die Ausführungsarbeiten:

Tabelle 3: Übersicht der geschätzten Kosten für eine Fassadensanierung mit einem 20 cm starken WDVS

Material	Geschätzte Kosten
Dämmplatten aus Polystyrol (20 cm)	23.660 € (bausep GmbH o.J.i)
Klebe- und Armierungsmörtel	9.620 € (bausep GmbH o.J.m)
WDVS-Dübel	6.205 € (bausep GmbH o.J.j)
Armierungsgewebe	1.525 € (bausep GmbH o.J.n)
Fassadenputzgrund	426 € (bausep GmbH o.J.l)
Fassadenoberputz	8.677 € (bausep GmbH o.J.k)
Sockelabschlussleiste	1.244 € (bauCompany24 GmbH o.J.)
Zwischenkosten:	51.357 €
Ausführungsarbeiten	Geschätzte Kosten
Fassadengerüst (Auf- und Abbau)	15.675 € (Anondi GmbH 2021) (Anhang 16)
Arbeitskosten WDVS-Anbringung	29.325 € (Carrot Media v.o.s. 2022)
Malerarbeiten (Vorarbeiten, Grundierung, Farbe, Anstrich)	32.492 € (FP Trading GmbH 2022)
Zwischenkosten:	77.492 €
<u>Gesamtkosten:</u>	<u>128.850 €</u>
<u>Preis je Quadratmeter:</u>	<u>110 €/m²</u>

Mit der Energieeinsparung von 43.765 kWh / a, einem kWh-Preis Fernwärme von 9,4 Cent (co2online gemeinnützige Beratungsgesellschaft mbH 2022) und einem Fassadensanierungszyklus von 40 Jahren laut dem BBSR

(Verbraucherzentrale NRW e.V. 2022) ergibt sich eine Ersparnis von 164.555 € nach 40 Jahren (siehe Anhang 10).

Die Mietparteien können somit jedes Jahr circa 4.115 € an Heizkosten sparen. Bei 35 Wohnungen ergibt dies eine Heizkosteneinsparung von durchschnittlich 117 € / a.

5.3 Variante 2 – konventionelle Sanierung

5.3.1 Dachdämmung

In dieser Variante wird die vorhandene 6 cm starke Wärmedämmung entfernt und mit einer 32 cm starken Wärmedämmung aus Glaswolle ersetzt. Die bereits verlegte, aber beschädigte Dachpappe wird durch eine neue Lage aus 6 mm starken Bautenschutzmatte ersetzt, um die neu verlegte Dämmung vor Witterungseinflüssen und Schäden zu schützen.

5.3.1.1 Energetische Auswirkungen

- R_{si} mit $0,10 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$
- Betondecke: 14 cm mit $0,085 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$
- Wärmedämmung aus Mineralfaser (Glaswolle) (WLS 035): 32 cm mit $9,142 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$
- Bautenschutzmatte: 0,6 cm mit $0,043 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$
- R_{se} mit $0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$

→ daraus ergibt sich ein Wärmedurchgangswiderstand R von $9,41 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ (siehe Anhang 11)

und ein Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von $0,106 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$ (Siehe Anhang 11)

Mit einer Dämmung von insgesamt 32 cm Stärke kann der U-Wert im Vergleich zum Ist-Zustand um circa das Siebenfache verringert werden.

Energieeinsparung und Auswirkungen auf Endenergieverbrauch

Die Differenz des U-Wertes zwischen Ist-Zustand und Variante 2 beträgt $0,596 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$. Somit ergibt sich eine Energieeinsparung bei 70 K Temperaturunterschied und einer $468,1 \text{ m}^2$ großen Geschosdecke von circa 19.530 kWh/a (siehe Anhang 11).

Der durchschnittliche Endenergieverbrauch von $183.440 \text{ kWh} / \text{a}$ könnte sich durch Variante 2 auf $163.911 \text{ kWh} / \text{a}$ reduzieren und damit die Energieeffizienzklasse des Gebäudes von C auf B mit $71,5 \text{ kWh} / \text{m}^2 / \text{a}$ statt $80 \text{ kWh} / \text{m}^2 / \text{a}$ verbessern (siehe Anhang 11).

5.3.1.2 Ökologische Auswirkungen

CO₂-Einsparung

Die Menge CO₂ beträgt bei dem Ist-Zustand der Wärmeversorgung mit Fernwärme circa $0,2 \text{ kg} / \text{kWh}$. Mit der Energieeinsparung der Dachsanierung von $19.530 \text{ kWh} / \text{a}$ können pro Jahr $3,9 \text{ CO}_2 \text{ t}$ eingespart werden (siehe Anhang 11).

5.3.1.3 Finanzielle Auswirkungen

Für Dämmungsmaßnahme der $468,1 \text{ m}^2$ großen Geschosdecke entstehen die folgenden Kosten für die Materialien sowie für die Ausführungsarbeiten:

Tabelle 4: Übersicht der geschätzten Kosten der Dachsanierung mit einer 32 cm starken Mineralfaser-Dämmung

Material	Geschätzte Kosten
Glaswolle (22 cm)	8.475 € (bausep GmbH o.J.c)
Glaswolle (10 cm)	3.889 € (bausep GmbH o.J.a)
Bautenschutzmatte (0,6 cm)	4.212 € (bausep GmbH o.J.g)
Zwischenkosten:	16.576 €

Ausführungsarbeiten	Geschätzte Kosten
Arbeitskosten (Zuschneiden, Verlegen)	14.430 € (about:publishing GmbH 2022a)
Zwischenkosten:	14.430 €
<u>Gesamtkosten:</u>	<u>31.006 €</u>
<u>Preis je Quadratmeter:</u>	<u>64 €/m²</u>

Mit der Energieeinsparung von 19.529 kWh / a, einem kWh-Preis Fernwärme von 9,4 Cent (co2online gemeinnützige Beratungsgesellschaft mbH 2022) und einem Sanierungszyklus von Flachdächern von 30 Jahren (Raiffeisen Schweiz Genossenschaft 2022) ergeben sich ein Ersparnis von 55.055 € nach 30 Jahren (siehe Anhang 11).

Die Mietparteien können somit jedes Jahr circa 1.835 € an Heizkosten sparen. Bei 35 Wohnungen ergibt dies eine Heizkosteneinsparung von durchschnittlich 52 € / a.

5.4 Variante 3 – ökologische Sanierung

5.4.1 Extensive Dachbegrünung³

Bei dieser Variante wird das bestehende geneigte Kaltdach entfernt und durch ein extensiv begrüntes flaches Warmdach ersetzt. Die 1,5 m hohen Drempegeschosswände und die Lüftungssysteme bleiben erhalten. Die vorhandenen Regenwassereinläufe des innenliegenden Regenwasserableitsystems werden mit Kontrollschächte ergänzt. Die vorhandene Dämmung und Schutzlage werden von der oberen Geschossdecke entfernt und die Betondecke mit einer Dampfsperre sowie einer druckfesten 16 cm Dämmung aus Polystyrol (WLS 035) versehen und mit einer nicht durchwurzelbaren Dachabdichtung abgedeckt. Darauf

³ Durch fehlende Informationen zur Statik des Gebäudes wird das Gewicht der Dachbegrünung und dessen Wirkung auf die Statik vernachlässigt. Des Weiteren wird bei der energetischen Betrachtung von einer wassergesättigten Systemerde ausgegangen, da die Erde nur in diesem Zustand wärmeleitende Eigenschaften besitzt.

folgen Drainage-, Wasserspeicher- und Filterschicht. Die Systemerde wird in einer Höhe von 5 cm aufgebracht und mit Flachballenstauden bepflanzt. Um die Dachbegrünung sowie die Kontrollschächte wird ein circa 20 cm breiter Rand aus Kies angelegt. Um bei Starkregenereignissen einen Ablauf des überschüssigen Wassers gewährleisten zu können, bleiben die in der Drempegelgeschosswand befindlichen Lüftungsöffnungen für den Wasserablauf erhalten.

5.4.1.1. Energetische Auswirkungen (wassergesättigt, bei 20 °C)

- R_{si} mit $0,10 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$
- Betondecke: 14 cm mit $0,085 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$
- Wärmedämmung aus Polystyrol-Flachdachdämmplatten (WLS 035): 16 cm mit $4,571 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$
- Wasserspeicherplatten aus Polystyrol (WLS 035): 5 cm mit $1,428 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$
- Begrünung wassergesättigt (Systemerde und Flachballenstauden): 5 cm mit $0,083 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$
- R_{se} mit $0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$

→ daraus ergibt sich ein Wärmedurchgangswiderstand R von $6,289 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ (siehe Anhang 12)

und ein Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von $0,159 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$ (Siehe Anhang 12)

Mit diesem Aufbau kann der U-Wert im Vergleich zum Ist-Zustand um circa das Fünffache verringert werden.

Energieeinsparung und Auswirkungen auf Endenergieverbrauch

Die Differenz des U-Wertes zwischen Ist-Zustand und Variante 3 beträgt $0,543 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$. Somit ergibt sich eine Energieeinsparung bei 70 KKh Temperaturunterschied und einer $468,1 \text{ m}^2$ großen Geschossdecke von $17.792 \text{ kWh} / \text{a}$ (siehe Anhang 12).

Der durchschnittliche Endenergieverbrauch von $183.440 \text{ kWh} / \text{a}$ könnte sich durch Variante 3 auf $165.647 \text{ kWh} / \text{a}$ reduzieren und damit die

Energieeffizienzklasse des Gebäudes von C auf B mit 72 kWh / m² / a statt 80 kWh / m² / a verbessern (siehe Anhang 12).

5.4.1.2 Ökologische Auswirkungen

CO₂-Bindung

Die Menge CO₂ beträgt bei dem Ist-Zustand der Wärmeversorgung mit Fernwärme circa 0,2 kg / kWh. Mit der Energieeinsparung der Dachbegrünung von 17.792 kWh/a können pro Jahr 3,56 t CO₂ eingespart werden (siehe Anhang 12). Zu dieser errechneten Menge wird die Summe an CO₂ addiert, die von den Pflanzen gebunden wird. Diese beträgt bei einer Aufnahmemenge von circa 0,375 kg / m² / a (IASP 2019, S. 10) und einer begrüneten Fläche von 468,1 m² 175,53 kg CO₂ / a. Somit ergibt sich eine CO₂-Bindung und -Einsparung von insgesamt 3,7 t CO₂ / a.

Verdunstung

Da die Variante eine Retentionsmöglichkeit in Form der Wasserspeicherplatten zusätzlich zu der Substratschicht bietet, kann nach neuesten Studienerkenntnissen davon ausgegangen werden, dass begrünte Retentionsdächer durchschnittlich 33,7 l / m² im Monat verdunsten (Gößner et al. 2021). Je Tag wären das 1,12 l / m². Das entspricht einer Gesamtverdunstungsleistung der 468,1 m² großen Dachbegrünung von circa 524 l / d.

Wasseraufnahmekapazität

Die Wasserspeicherplatten der Dachbegrünung können zehn Liter je m² aufnehmen und zwischenspeichern (bausep GmbH o.J.d). Bei einer Dachbegrünungsfläche von 468,1 m² können somit 4.681 l Wasser aufgenommen und zwischengespeichert werden. Das entspricht circa der Regenmenge, die durchschnittlich im gesamten Februar in Bad Tabarz fällt (climate-data.org 2021).

5.4.1.3 Finanzielle Auswirkungen

Für die Dachbegrünung der 468,1 m² großen Geschossdecke entstehen die folgenden Kosten für die Materialien sowie für die Ausführungsarbeiten:

Tabelle 5: Übersicht der geschätzten Kosten der Dachsanierung mit einer Dachbegrünung und einer zusätzlichen 16 cm starken Polystyrol-Dämmung

Material	Geschätzte Kosten
Dampfsperre	5.387 € (bausep GmbH o.J.f)
Dämmplatten aus Polystyrol (16 cm)	9.043 € (bausep GmbH o.J.h)
durchwurzelfeste Dachabdichtung	5.593 € (bausep GmbH o.J.e)
Wasserspeicherplatten (Speicher- und Dränageschicht, 5 cm)	22.854 € (bausep GmbH o.J.d)
Filtervlies	
Systemerde (5 cm)	
Flachballenstauden (Pflanzen)	
Zwischenkosten:	42.877 €
Ausführungsarbeiten	Geschätzte Kosten
Fassadengerüst (Auf- und Abbau)	15.675 € (Anondi GmbH 2021) (Anhang 16)
Dachdemontage	11.702 € (Rathscheck Schiefer und Dach-Systeme - ZN der Wilh. Werhahn KG Neuss o.J.)
Vorarbeiten (Abdichtung, Reinigung, Wärmedämmung)	6.787 € (Rathscheck Schiefer und Dach-Systeme - ZN der Wilh. Werhahn KG Neuss o.J.)
Anlegen der Dachbegrünung	11.702 € (about:publishing GmbH 2022b)
Zwischenkosten:	45.866 €
Gesamtkosten:	88.743 €
Preis je Quadratmeter:	190 €/m²

Mit der Energieeinsparung von 17.792 kWh / a, einem kWh-Preis Fernwärme von 9,4 Cent (co2online gemeinnützige Beratungsgesellschaft mbH 2022) und einem Sanierungszyklus von begrünten Flachdächern von 40 Jahren (IASP 2019, S. 11) ergibt sich ein Ersparnis von 66.900 € nach 40 Jahren (siehe Anhang 12).

Die Mietparteien können somit jedes Jahr circa 1.672 € an Heizkosten sparen. Bei 35 Wohnungen ergibt dies eine Heizkosteneinsparung von durchschnittlich 48 € / a.

5.5 Variante 4 – ökologische Anpassung

5.5.1 Baumrigolen-Systeme⁴

Die letzte Variante gehört nicht zu den Sanierungs-, sondern zu den Anpassungsmaßnahmen. Essenziell für diese Variante ist das Nutzen und Speichern des jährlichen Niederschlags und die Aufwertung des vorhandenen Freiraumes. Bei einer Bestandserfassung von städtebaulichen, funktionellen und gestalterischen Mängeln wurde das Objekt „Am Mönchhof 22-26“ im Jahr 2001 bewertet. Die Hauptprobleme zu dem damaligen Ist-Zustand waren primär fehlende Gestaltung der umliegenden Grünstrukturen sowie die Sanierungsbedürftigkeit des Wohnkomplexes. Ein Rückbau wurde 2001 bereits im Rahmen dieser Untersuchung gefordert (siehe Anhang 21) und im Jahr 2005 umgesetzt. Allerdings fehlt es dem Grundstück weiterhin an freiräumlicher Gestaltung. Zwar sind auf dem Grundstück zwei Bäume vorhanden, welche sich allerdings in Randlage befinden. Eine Aufwertung der nun vorhandenen Rasenfläche (siehe Anhang 23) wurde bisher nicht vorgenommen. Die Variante 4 soll Gestaltung und Regenwassernutzung miteinander kombinieren.

Es werden Baumrigolen-Systeme für zehn Bäume mit jeweils einem Erdvolumen von 18 m³ mit einer Erd-Tiefe von 1,8 m eingeplant, um den Bäumen eine ausreichende Ausbreitungsmöglichkeit zu bieten. Die zwei vorhandenen Bäume am Rand des Grundstücks bleiben bestehen, werden aber nicht in die Baumrigolen-

⁴ Aufgrund fehlender Daten zur Bodenzusammensetzung und zu spezifischen Niederschlagswerten erfolgt die Dimensionierung auf Basis des Mindestwurzelraumgröße von 12 m³. Die Bemessung kann somit in Realität abweichen.

Systeme integriert. Die zehn geplanten Bäume werden mit je einem Wurzelbereich von 3 x 4 m in zwei Reihen in die Mulde gepflanzt. Die Baumrigolen-Systeme besitzen eine Gesamtfläche von 120 m², ein Gesamtvolumen von 216 m³ sowie eine Muldenbetttiefe von 30 cm. Das Muldenbett besteht aus einer 30 cm starken Mutterbodenschicht, die eine hohe Wasserdurchlässigkeit besitzt, um das Niederschlagswasser schnellstmöglich in die Rigole durchsickern zu lassen. Zudem wird es dabei zwischengereinigt. Zwischen dem Mutterboden und der Rigole wird zusätzlich eine 5 cm starke Schutzschicht verlegt, um die Rigole vor Schäden zu schützen (Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH 2022b). Als Rigolenmaterial wird Kies verwendet und mit einer Höhe von 50 cm aufgebracht. Unterhalb der Rigolenschicht, in einer Tiefe von 1,80 m, wird eine Betonschale gegossen, die ein Teil des versickernden Regenwassers auffängt und für die Versorgung der Bäume bereitstellt. Zusätzliche Überläufe sorgen bei Überlastung der Mulde für den sofortigen Transport des Regenwassers in die Rigole. Über einen Drosselschacht und Dränrohre wird überschüssiges Wasser in die öffentliche Kanalisation geleitet (Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH 2022b). Zur besseren Vorstellung wurde ein Querschnitt erstellt, der in Anhang 26 zu finden ist. Als Baumart wurde der kleinkronige Kugel-Weißdorn (*Crataegus monogyna* 'Compacta'), mit einer Wuchshöhe von 3 m und -breite von 3 m, ausgewählt (siehe Abbildung 8). Die Baumart eignet sich als Tiefwurzler mit hoher Widerstandsfähigkeit gegen Trockenheit und



Abbildung 8: Beispieldarstellung des Kugel-Weißdorns (Quelle: Häussermann Stauden+Gehölze GmbH o.J.)

Hitze. Ebenfalls kann diese Baumart für ingenieurbiologische Vorhaben wie Mulden-Rigolen-Systeme genutzt werden. Ein weiterer Auswahlfaktor ist der Fruchtschmuck von Mai bis Juni, der optisch und olfaktorisch im Jahreszeitenwechsel durch die Blüh- und Fruchttragzeit die Umgebung aufwertet und zudem eine Nahrungs- und Nistquelle für Insekten und Vögel bietet (Baumschule Horstmann GmbH & Co. KG o.J., Pflanzmich GmbH o.J., Iffl o.J.).

5.5.1.1 Ökologische Auswirkungen⁵

CO₂ – Bindung

Der Weißdorn hat eine Darrdichte von durchschnittlich 840 kg / m³ (Michael Finger 2009). Bei einer Höhe von 3 m kann von circa 3 Festmetern (entsprechen 3 m³) ausgegangen werden. Damit würde ein ausgewachsener Kugel-Weißdorn ein geschätztes Gewicht von 2,5 t vorweisen. Da 47,5 % der Trockenmasse eines Baumes aus Kohlenstoff besteht (EcoTree o.J.), wird die Kohlenstoffmenge im Weißdorn auf circa 600 kg geschätzt. Verrechnet mit dem Masseverhältnis von CO₂ und Kohlenstoff ergibt dies eine absorbierte CO₂-Gesamtmenge von circa 2,2 t. Mit einer Lebensspanne eines Kugel-Weißdorns von 100 Jahren bindet der Baum pro Jahr circa 22 kg CO₂. Bei zehn Kugel-Weißdornen ergibt dies eine Gesamtbindungsmenge von circa 220 kg CO₂ / a. (siehe Anhang 13)

Verdunstung

Als primäre Verdunstungskomponente dienen hier die Kugel-Weißdorne, welche Laubbäume sind. Durchschnittlich verdunsten Laubbäume, wie die Eiche, 500 l / d Wasser (WWU Münster o.J.). Aufgrund der geringen Höhe des Kugel-Weißdorns von circa 3 m im Vergleich zur Eiche, die circa 30 m hoch werden kann (Kubb 2021), wird angenommen, dass sich die Verdunstung des Kugel-Weißdorns auf ein Zehntel der Verdunstung der Eiche beschränkt. Somit würde sich eine Verdunstungsmenge von 50 l / d ergeben. Bei 10 Kugel-Weißdornen ergibt dies eine Gesamtverdunstungsmenge von 500 l / d.

Wasseraufnahmekapazität

Bei der Wasseraufnahmekapazität wird zwischen der temporären Aufnahmekapazität der Rigole und der Mulde unterschieden. Das Aufnahmevermögen der Rigole bei einem Aufnahmevermögen des Kieses von circa 30 Volumen-% und einer Höhe von 0,5 m beträgt 150 l / m² (Vulkatec Riebensahm GmbH o.J.), was bei einer Fläche von 120 m² insgesamt 18.000 l ergibt. Die Mulde mit einer Tiefe von 0,3 m hat ein Volumen von 33,75 m³. Somit ergibt sich eine maximale Aufnahme von 33.750 l. Insgesamt können 51.750 l Regenwasser aufgenommen,

⁵ Aufgrund fehlender Informationen zur ausgewählten Baumart für die ökologischen Auswirkungen werden Durchschnittswerte genutzt, wodurch die Werte in Realität abweichen können.

versickert und zwischengespeichert werden. Bei einer Jahresniederschlagsmenge von 729 l / m² ergeben sich auf der Baumrigolen-System-Fläche von 120 m² 87.480 l. Mit den Baumrigolen-Systemen können somit circa 59 % der jährlichen Niederschlagsmenge aufgenommen werden.

5.5.1.2 Finanzielle Auswirkungen

Für die 216 m³ großen Baumrigolen-Systeme entstehen die folgenden Kosten für die Materialien sowie für die Ausführungsarbeiten:

Tabelle 6: Übersicht der geschätzten Kosten der Baumrigolen-Systeme

Material und Ausführungsarbeiten	Geschätzte Kosten
Konstruktion (Betonverschalung, Rohrsysteme, Überlauf, Drosselschacht)	12.300 € (Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH o.J.c, o.J.b)
Erstellungskosten Mulde (Erdarbeiten)	
Muldensubstrat (Mutterboden)	
Schutzschicht (Kiessand)	
Erstellungskosten Rigole (Erdarbeiten, Rohrverlegung)	
Rigolensubstrat	
Kugel-Weißdorn (10 Stück, bereits mit Stamm)	968 € (Pflanzmich GmbH o.J.)
<u>Gesamtkosten:</u>	<u>13.268 €</u>
<u>Preis je Quadratmeter:</u>	<u>110 €/m²</u>
<u>Preis je Kubikmeter:</u>	<u>198 €/m³</u>

5.6 Vergleich der Varianten

5.6.1 Energetische Auswirkungen

Tabelle 7: Vergleich der energetischen Auswirkungen der Varianten

	Variante 1 (Fassadendämmung)	Variante 2 (Dachdämmung)	Variante 3 (Dachbegrünung)
Wärmedurchgangswiderstand R	7,205 m ² * K / W	9,41 m ² * K / W	6,289 m ² * K / W
U-Wert	0,138 W / m ² * K	<u>0,106 W / m² * K</u>	0,159 W / m ² * K
Energetische Verbesserung im Vergleich zum Ist-Zustand des jeweiligen Bauteils (Fassade / Dach)	80 %	<u>85 %</u>	77 %
Änderung des durchschnittlichen Endenergieverbrauchs (Ist: 183.440 kWh / a)	<u>Reduzierung auf 139.675 kWh / a</u>	Reduzierung auf 163.911 kWh / a	Reduzierung auf 165.647 kWh / a
Energieeinsparung pro Jahr	<u>43.764 kWh / a</u>	19.530 kWh / a	17.792 kWh / a
Änderung der Gebäudeenergieeffizienzklasse (Ist: 80 kWh / m ² / a (Klasse C))	<u>Verbesserung auf 61 kWh / m² / a (Klasse B)</u>	Verbesserung auf 71 kWh / m ² / a (Klasse B)	Verbesserung auf 72 kWh / m ² / a (Klasse B)

In der Betrachtung der energetischen Auswirkungen wird deutlich, dass Variante 1, die konventionelle Fassadendämmung, die höchsten energetischen Verbesserungen im Vergleich zum Ist-Zustand erzielt. Sowohl bei der Energieeinsparung als auch bei der Gebäudeenergieeffizienzklasse kann der Energieverbrauch deutlich reduziert und bezüglich der Energieeffizienzklasse um eine Stufe verbessert werden. Variante 2 und 3, die die Sanierung des Daches vorsehen, kommen zu ähnlichen Ergebnissen. Zwar schneidet die konventionelle Dachdämmung besser ab als die Dachbegrünung. Allerdings nur geringfügig mit einem maximalen Unterschied von 2.000 kWh / a. Der U-Wert, welcher so niedrig wie möglich sein sollte, erzielt den besten Wert bei der konventionellen Dachdämmung und somit auch die beste energetische Verbesserung im Vergleich zum Ist-Zustand um 85 %.

5.6.2 Ökologische Auswirkungen

Tabelle 8: Vergleich der ökologischen Auswirkungen der Varianten

	Variante 1 (Fassaden- dämmung)	Variante 2 (Dachdäm- mung)	Variante 3 (Dachbe- grünung)	Variante 4 (Baumrigolen- Systeme)
CO ₂ -Einsparung/- bindung pro Jahr	<u>8.753 kg</u>	3.906 kg	3.734 kg	220 kg
Verdunstung pro Tag	.	.	<u>524 l</u>	500 l
Wasser-Aufnah- mekapazität	.	.	4.681 l	<u>87.480 l</u>

Bis auf die CO₂-Einsparung durch die Heizenergieeinsparung können die konventionellen Sanierungsvarianten 1 und 2 keine weiteren ökologischen Auswirkungen vorweisen. Zwar wird bei der konventionellen Fassadendämmung die höchste und bei der konventionellen Dachdämmung die zweihöchste Menge an CO₂ pro Jahr eingespart, allerdings unterstützen diese Varianten nicht die

Versickerung oder Verdunstung. Die Dachbegrünung und die Baumrigolen-Systeme haben positive Auswirkung auf Versickerung und Verdunstung. Zwar bindet die Dachbegrünung das 17-fache an CO₂ im Vergleich zu den Baumrigolen allerdings können die Baumrigolen-Systeme das 20-fache an Wasser aufnehmen und zwischenspeichern. Die Verdunstungsmenge pro Tag unterscheidet sich bei Variante 3 und 4 nur geringfügig.

5.6.3 Finanzielle Auswirkungen

Tabelle 9: Vergleich der finanziellen Auswirkungen der Varianten

	Variante 1 (Fassaden- dämmung)	Variante 2 (Dachdäm- mung)	Variante 3 (Dachbe- grünung)	Variante 4 (Baumrigo- len-Systeme)
Kosten	128.847 €	31.006 €	88.745 €	<u>13.268 €</u>
Durchschnittliche Energiekosteneinspa- rung je Mietpartei	<u>117 € / a</u>	52 € / a	48 € / a	.

Rein finanziell betrachtet stellt die Variante 4 die kostengünstigste Maßnahme dar. Allerdings beschränkt sich diese nur auf ökologische Effekte für die Umgebung und nicht auf direkte energetische Effekte auf das Gebäude. Die teuerste Variante ist die Variante 1, die Fassadendämmung, welche nach 40 Jahren das höchste Kosteneinsparungspotenzial für die Mietparteien aufweist. Variante 2 ist die zweitgünstigste Variante mit dem zweihöchsten Einsparungspotenzials. Die zweitteuerste Variante ist Variante 3, die ebenfalls das geringste Einsparungspotenzial aufweist. Die Ersparnisse der Mietparteien kommen durch die minimierten Heizkosten zustande, die die verbesserte Dämmung ermöglicht.

6 Datenauswertung und Interpretation

Der energetische Ist-Zustand des kommunalen Wohngebäudes „Am Mönchhof 22-26“ erfordert dringenden Handlungsbedarf. Zwar wurden bereits Sanierungsmaßnahmen wie der Austausch der Fenster getätigt, allerdings liegen diese bereits über 17 Jahre zurück und reichen nicht aus, um den energetischen Zustand umfassend zu verbessern. Die U-Werte der Dach- und Fassadendämmung erreichen nur den Mindestwert der Wärmedurchlasswiderstände, die gesetzlich gefordert sind. Des Weiteren existieren Schäden an der aktuellen Dachdämmung, die nicht behoben wurden (siehe Anhang 15). Der längere Zeitraum seit der letzten Sanierungsmaßnahme lassen darauf schließen, dass wohlmöglich finanzielle Mittel fehlen, um weitere Sanierungen durchzuführen.

Variante 1, die konventionelle Fassadendämmung, erzielt bei den energetischen Auswirkungen die besten Werte im Vergleich zum Ist-Zustand und zu den anderen Varianten. Trotz der höchsten Investitionssumme können die Mietparteien durch die Fassadendämmung jährlich durchschnittlich 120 € an Heizkosten einsparen. Ökologisch betrachtet kann diese Variante nur mit einer CO₂-Einsparung durch Heizenergieeinsparung punkten, welche allerdings die höchste Einsparmenge im Vergleich zu den anderen Varianten repräsentiert.

Die konventionelle Dachdämmung, Variante 2, erzielt die zweitbesten Werte in der energetischen Betrachtung. Ebenfalls wird den Mietparteien die zweithöchste Heizkosteneinsparung ermöglicht. Die CO₂-Einsparung ist bei dieser Variante die zweithöchste pro Jahr. Finanziell betrachtet kostet die Dachdämmung ein Drittel der Summe, die für die Dachbegrünung aufgebracht werden muss. Hierbei ist aber zu berücksichtigen, dass bei Variante 3 das gesamte Dach abgerissen und durch ein neues Dach ersetzt werden müsste.

Wie bei Variante 2 kommt die Dachbegrünung, Variante 3, zu ähnlichen energetischen Ergebnissen. Die Heizkosteneinsparung unterscheidet sich kaum von Variante 2. Zu vergleichbaren Ergebnissen wie bei der konventionellen Dachdämmung kommt die Dachbegrünung auch bei der CO₂-Einsparung und -bindung. Zusätzlich zu der CO₂-Bindung wird durch die Dachbegrünung Versickerung, Zwischenspeicherung und Verdunstung begünstigt, was Variante 1 und Variante

2 nicht vorweisen können. Anzumerken ist, dass die Dämmwirkung primär durch die zusätzlichen Polystyrolplatten erzeugt wird. Ohne zusätzliches Dämmmaterial hätte das 5 cm hohe Erds substrat kaum Dämmeffekte. Des Weiteren muss das Substrat wassergesättigt sein, um überhaupt dämmende Effekte zu erzeugen.

Variante 4, die eine Anpassungsmaßnahme ist und damit separat betrachtet werden muss, erzielt zwar keine direkten energetischen Effekte auf das Gebäude, allerdings werten die Baumrigolen-Systeme die ungenutzte Rasenfläche auf, stellen die kostengünstigste Maßnahme dar und erzielen vorzeigbare ökologische Effekte. Die Aufnahmekapazität des Muldenelements sticht hierbei heraus. Zwar weist die Variante 4 die niedrigste CO₂-Bindung auf, aber durch die geringen Investitionskosten wäre es möglich, diese Variante mit den anderen Varianten zu kombinieren.

7 Diskussion

Materialwahl Polystyrol

Das verwendete und konventionell genutzte Dämmmaterial Polystyrol (EPS) in Variante 1 und Variante 3 gehört zu den synthetischen Dämmstoffen, die aus Erdöl hergestellt werden (Drewer et al. 2013, S. 118). Die Herstellung von Dämmmaterialien aus Erdöl spielt bei dem Thema Ressourcenschonung eine essenzielle Rolle. Der Anteil an Erdöl, der für die Herstellung von Dämmmaterialien und andere Kunststoffherzeugnisse genutzt wird, liegt bei circa 10 %. Der Großteil des gefördert fossilen Brennstoffes, etwa 90 %, wird für Verkehr und Wärmeerzeugung genutzt (Drewer et al. 2013, S. 118). Es könnte angenommen werden, dass das Polystyrol durch seine Herstellung aus Erdöl kein CO₂ einsparen könnte und damit die berechneten CO₂-Einsparungsmengen in Kapitel 5.2 und 5.4 nicht der tatsächlichen Einsparungsmenge entsprechen. Dies wird im Folgenden untersucht. Das zur Herstellung des Dämmmaterials eingesetzte Erdöl spart durch den reduzierten Heizenergiebedarf deutlich mehr Rohöl ein, als zur Herstellung der Dämmung benötigt wird. In dem Dämmmaterial wird die Energie gebunden und nach der Demontage durch die thermische Verwertung

wieder freigesetzt und somit nutzbar gemacht. Ein m³ Polystyrol beinhaltet die Energiemenge von 43 l Rohbenzin (Drewer et al. 2013, S. 126). Die folgenden Ergebnisse zeigen den Zeitraum, in dem die eingesetzte Energie des Rohbensins der Menge an Heizenergie entspricht, die durch Dämmmaßnahmen der Varianten 1 und 3 eingespart werden kann.

Bei Berücksichtigung des Energiegehaltes des Polystyrols ergibt sich bei Variante 1 eine tatsächliche CO₂-Einsparung erst nach 23 Monaten. Bei Variante 3 wird CO₂ erst nach 19 Monaten eingespart. Nach diesem Zeitraum ist der Energiegehalt des Polystyrols energetisch amortisiert. Im Vergleich zu den Sanierungszyklen von Fassade (40 Jahre) und Flachdach (40 Jahre) kann allerdings in den Zeiträumen das 21-fache und 25-fache an der CO₂-Menge eingespart werden, welche im Polystyrol enthalten ist (siehe Anhang 14). Somit hat die Wahl von Polystyrol zwar kaum Einfluss auf die CO₂-Einsparung, aber die Herstellung und Bestandteile sollten trotzdem bei der Auswahl des Dämmmaterials berücksichtigt und mögliche ökologischere Materialien in Betracht gezogen werden.

Kenngößen-Auswahl

Die Auswahl der zu ermittelnden Kenngößen wurde im Themenbereich der ökologischen Auswirkungen beschränkt. Zwar wäre der Temperatureinfluss eine interessante Kenngöße gewesen, allerdings ist es ohne Messreihen nicht möglich den Temperatureinfluss von Dachbegrünung und Baumrigolen-Systemen darzustellen. Da es sich um fiktive Sanierungs- und Anpassungsmaßnahmen handelt, wäre zwar eine Annahme auf Basis bereits getätigter Studien und Untersuchungen möglich gewesen, hätte aber die Realität nicht eindeutig abbilden können.

Vergleichbarkeit

Die Berechnungen und Datenauswertung ergaben, dass für eine bessere Vergleichbarkeit eine Auswahl von Sanierungsmaßnahmen, die das identische Bauteil betreffen, sinnvoller gewesen wäre. Statt der Baumrigolen-Systeme, die eine Anpassungsmaßnahme darstellen und keinen direkten energetischen Einfluss auf das Gebäude haben, wäre beispielsweise die Fassadenbegrünung eine idealere ökologische Sanierungsmaßnahme gewesen. Die ähnlichen energetischen Ergebnisse von Dachdämmung und Dachbegrünung im Kapitel 5.6 zeigen dies.

Umsetzbarkeit

Aufgrund fehlender Informationen zur Statik und Traglast des Gebäudes sind die Annahmen für die Dachbegrünung Schätzungen, die in Realität abweichen können und möglicherweise eine Dachbegrünung in dem statischen Ist-Zustand nicht zulassen könnten. Falls eine Dachbegrünung in Betracht gezogen wird, sollte demzufolge vorher ein statisches Gutachten durchgeführt werden. Die kaum vorhandene Umsetzung von Baumrigolen-Systemen in Deutschland können die Wahrscheinlichkeit der tatsächlichen Umsetzung eben dieser ebenfalls minimieren, da Erfahrungswerte und konkrete Regelwerke fehlen (Sommer et al. 2017, S. 22, Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH 2022a). Zu berücksichtigen ist außerdem die Verlegung von Rohrleitungen auf dem Grundstück, die die Tiefe und damit das Fassungsvermögen der Baumrigolen-Systeme beeinflussen könnten. Andere Vorschriften und Genehmigungen wie Brandschutz oder Baugenehmigungen sind ebenfalls vor der Umsetzung zu berücksichtigen und einzuholen.

Übertragbarkeit auf das gesamte Quartier

Die Masterarbeit beleuchtet Maßnahmen und deren Auswirkungen an einem Gebäude (siehe Abbildung 9, rot eingekreist) im Plattenbauquartier „Am Mönchhof“. Das Quartier besteht aus insgesamt acht Wohngebäuden. Wird angenommen, dass alle Gebäude dieselben Abmessungen und energetischen Ist-Zustände aufweisen, wie das genutzte Praxisbeispiel, ergibt sich ein CO₂-Einsparungspotenzial. Würde die Variante 1, die Fassadendämmung, an allen Gebäuden umgesetzt werden, ergäbe sich eine CO₂-Einsparung von



Abbildung 9: Luftbild des Plattenbauquartiers „Am Mönchhof“ in Bad Tabarz (Quelle: © GDI-Th o.J.)

insgesamt 61 t / a. Die Variante 2, die Dachdämmung, würde angewendet im Quartier 27 t CO₂ / a einsparen. Würden alle Dächer begrünt und zusätzlich gedämmt werden (Variante 3), könnte das Mönchhofquartier 26 t CO₂ / a

einsparen und binden. Zusätzlich könnten insgesamt bis zu 3.700 l Wasser pro Tag verdunsten und 33.000 l Wasser zwischengespeichert werden. Die potenzielle jährliche CO₂-Einsparungsmenge von Variante 2 oder Variante 3 im gesamten Quartier entspricht der CO₂-Menge (22 t), die circa drei Menschen jährlich durch ihre Lebensweise in Deutschland verursachen (Statista GmbH 2021a) und die damit kompensiert werden könnte. Die CO₂-Menge, die das gesamte Quartier mit Variante 1 einsparen könnte (61 t), könnte circa die jährliche CO₂-Ausstoßmenge von acht Menschen in Deutschland kompensieren (Statista GmbH 2021a).

8 Handlungsempfehlungen

Umsetzungsmöglichkeiten

In Anbetracht der klimatischen Veränderungen, Energiepreissteigerungen und dem energetischen Ist-Zustand besteht ein dringender Handlungsbedarf das Gebäude „Am Mönchhof 22-26“ energetisch zu sanieren. Da die Geschossdecke und die Fassadendämmung im aktuellen Zustand nur die Mindestanforderungen des gesetzlichen Wärmeschutzes erreichen, sollten diese Bauteile nachträglich gedämmt werden. Die Beispielberechnungen der Varianten 1 bis 3 können hierbei als Orientierung dienen. In Hinblick auf die mögliche Verschärfung der gesetzlichen Vorgaben über die nächsten Jahre sollten diese Maßnahmen zudem in naher Zukunft umgesetzt werden. Die ökologischen Effekte der Sanierung sollten ebenfalls berücksichtigt werden. Wie der rechnerische Vergleich zwischen konventioneller Dachdämmung und Dachbegrünung zeigt (Kapitel 5.6), kommen diese beiden Varianten zu ähnlichen energetischen Ergebnissen. Die Dachbegrünung hat des Weiteren positive Auswirkungen auf den natürlichen Wasserhaushalt, die CO₂-Bindung und die Biodiversität. Neben den Maßnahmen, die das Gebäude betreffen, sollte die Gestaltung und Nutzung des Grundstückes in Betracht gezogen werden. Beispielsweise kann das Grundstück durch die Variante 4, den Baumrigolen-Systemen, optisch und ökologisch aufgewertet werden. Sollten Erdarbeiten nicht möglich sein, sollte trotzdem eine Bepflanzung mit Bäumen oder anderen Grünstrukturen realisiert werden. Wie bereits in Kapitel 5.6.4

erwähnt, wird die Kombination von mehreren Varianten empfohlen. Dafür spricht, dass dabei die energetischen Auswirkungen mit den ökologischen Auswirkungen optimal kombiniert und genutzt werden können. Einerseits würde beispielsweise das Gebäude energetisch verbessert werden. Andererseits gäbe es durch die Baumrigolen-Systeme eine optische und ökologische Aufwertung der Umgebung. In Anhang 27 befindet sich eine beispielhafte Umsetzung von Dachbegrünung und Baumrigolen-Systemen. Andere Bauteile des Gebäudes sollten ebenfalls energetisch überprüft und gegebenenfalls saniert werden. Beispielsweise wurde die Kellerdecke bisher nicht nachträglich gedämmt (siehe Anhang 15) und lassen somit auch hier Sanierungs- und Energieeinsparungspotenziale entstehen.

Wenn die statischen Voraussetzungen gegeben sind, ist eine Kombination aus Solarmodulen und Dachbegrünung empfehlenswert, die neben ökologischer Vorteilen Mieterstrom erzeugt. Mieterstrom ist Energie, die direkt auf dem Gebäude oder im Quartier erzeugt und lokal von den Mietparteien genutzt wird (Bundesnetzagentur 2023). Die Ausweitung des Mieterstroms durch Solarmodule auf allen Gebäuden im Mönchhofquartier würde den Anteil an dezentraler und lokaler Energieproduktion stärken. Im Kontext des Klimaschutzes werden solche Modelle zukünftig eine große Rolle spielen, um den gesetzlichen Vorgaben des Gebäudeenergiegesetzes zu entsprechen, die erneuerbaren Energien zu fördern und die Energieproduktion aus fossilen Brennstoffen zu reduzieren (Michalski et al. 2021, S. 17).

Sensibilisierung der Mietparteien und Finanzierungsmöglichkeiten

Für die Umsetzung der Maßnahmen, ist neben den finanziellen Mitteln, die Akzeptanz der Mietparteien entscheidend. Damit die Menschen die Sanierungsmaßnahmen akzeptieren und verstehen, sollten vor Umsetzung die Gründe, die Kosten und der Ablauf transparent und nachvollziehbar kommuniziert werden (Michalski et al. 2021, S. 22). Da die WSG Waltershausen eG genossenschaftliches Wohnen anbietet, haben die Mietparteien durch ihre erworbenen Genossenschaftsanteile ein gewisses Mitspracherecht und sollten dementsprechend in den Prozess miteinbezogen werden. Es ist essenziell die Mietparteien für ihren

eigenen Energieverbrauch zu sensibilisieren. Denn energetische Gebäudeoptimierungen führen nicht zwangsweise zu Heizenergieeinsparungen, wenn der Energieverbrauch einiger Mietparteien steigt. Beispielsweise sollten die Mietparteien regelmäßig über mögliche Förderungen für energieeffiziente Haushaltsgeräte und Klimaschutz informiert werden, um den Energieverbrauch zu senken (Michalski et al. 2021, S. 23).

Für die Finanzierung der Maßnahmen sollten Fördermittel grundsätzlich in Anspruch genommen werden, um Teile der Investitionskosten auf den Staat umlenken zu können. Hierbei würden sich beispielsweise die Angebote des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) anbieten, die bis zu 15 % der Investitionskosten finanziell fördern. Die Obergrenze der Sanierungskosten liegt bei maximal 600.000 € je Gebäude (Bafa 2023b). Förderfähig sind beispielsweise die energetische Sanierung von Fassaden- und Dachdämmung (Bafa 2023a), die in Variante 1 bis 3 untersucht wurden. Förderprogramme auf Ebene des Bundeslandes und der Kommunen können ebenfalls in Betracht gezogen werden. Ein weiteres potenzielles Finanzierungsmodell ist die Aufteilung der Kosten auf Staat, Mietparteien und Eigentümer zu jeweils einem Drittel (Drittel-Modell). Der Eigentümer übernimmt hierbei ein Drittel der Kosten, welches der Instandhaltung des Gebäudes entspricht (Kopatz 2017, S. 127). Die Sanierungskosten und die damit verbundene Energieberatung und Qualitätssicherung, werden zu einem Drittel vom Staat getragen. Für die Mietparteien bleibt die Warmmiete unverändert, da dies der potenziellen Erhöhung der gesenkten Heizkosten entspricht und damit das letzte Drittel der Sanierungsfinanzierung übernommen wird. Das Modell befindet sich aktuell nicht in Umsetzung, obwohl das Konzept vom Umweltverband BUND, dem Deutschen Mieterbund dem Deutschen Naturschutzring, bereits 2012 vorgestellt wurde (ifeu 2019). Es wird empfohlen sich regelmäßig zur möglichen Umsetzung zu informieren, da sich für alle beteiligten Parteien energetische sowie finanzielle Vorteile ergeben (Kopatz 2017, S. 128).

9 Zusammenfassung und Ausblick

Wie in der Einleitung erwähnt, ist die Sanierung von Bestandsgebäuden eine essenzielle Maßnahme zur Energie- und CO₂-Einsparung. Dass ökologische Sanierungsmaßnahmen ähnliche energetische Ergebnisse wie die konventionellen Sanierungsmaßnahmen erzielen können, wird durch die Ausarbeitungen in dieser Masterarbeit bestätigt.

Um sich dem Thema der energetischen Sanierung anzunähern, wurde sich mit deren Notwendigkeit, den gesetzlichen Grundlagen sowie mit den ausgewählten konventionellen und ökologischen Sanierungs- und Anpassungsmaßnahmen, Dachdämmung, Fassadendämmung, Dachbegrünung und Baumrigolen-Systemen, auseinandergesetzt. Auf Basis der Ist-Zustands-Analyse des Praxisbeispiels „Am Mönchhof 22-26“ und der Kenngrößenberechnungen wurde gezeigt, dass die ausgewählten Maßnahmen für das Wohngebäude unterschiedliche energetische, ökologische und finanzielle Auswirkungen erzielen.

Die zugrundeliegende Fragestellung dieser Masterarbeit *„Welche energetischen, ökologischen und finanziellen Auswirkungen haben Dachbegrünung und Baumrigolen-Systeme auf Wohngebäude gegenüber konventionellen Sanierungsmaßnahmen?“* wurde anhand der Kenngrößenberechnungen beantwortet. Die Dachbegrünung erzielt ähnliche energetische Ergebnisse wie die konventionelle Dachdämmung. Ökologisch betrachtet wird auch eine ähnliche CO₂-Einsparungsmenge wie bei der Dachdämmung erreicht. Zusätzlich wird durch die Bepflanzung des Daches Regenwasser aufgenommen und zwischengespeichert. Außerdem wird die Verdunstungsmenge erhöht. Diese ökologischen Aspekte können die konventionellen Sanierungsmaßnahmen, Fassaden- und Dachdämmung, nicht abdecken. Die Dachbegrünung gehört zur zweit teuersten Maßnahme, erzielt aber im Vergleich zur Dachdämmung eine ähnliche jährliche Heizkosteneinsparung. Die Baumrigolen-Systeme haben als Anpassungsmaßnahme keine energetischen Auswirkungen auf das Wohngebäude, schaffen aber ökologische und optische Vorteile für die ungenutzte Rasenfläche, die zum Wohngebäude gehört. Durch die Baumrigolen-Systeme werden ebenfalls Verdunstungs- und Versickerungsmöglichkeiten für Regenwasser geschaffen. Zwar binden die

Bäume im Vergleich die geringste Menge an CO₂ pro Jahr, die Rigolen-Mulden-Elemente können aber die die 20-fache Mengen an Regenwasser im Vergleich zur Dachbegrünung aufnehmen und zwischenspeichern. Finanziell betrachtet, gehört diese Maßnahme zur kostengünstigsten, wodurch sich eine Kombination mit Sanierungsmaßnahmen anbietet. So werden die optimalen energetischen, ökologischen und optischen Effekte erzielt.

Wie aus der Beantwortung der zentralen Fragestellung und den Ergebnissen hervorgeht, ergeben sich ähnliche Ergebnisse von Dachdämmung und Dachbegrünung, die bei den anderen zwei Maßnahmen, Fassadendämmung und Baumrigolen-Systeme, nicht gegeben sind. Für eine bessere Vergleichbarkeit wäre die Auswahl identischer Bauteile passender gewesen. Aufgrund fehlender Informationen zum Gebäude und Grundstück kann damit gerechnet werden, dass der Umsetzungsgrad der ausgewählten Maßnahmen in Realität abweichen kann, wie bei der Dachbegrünung oder den Baumrigolen-Systemen. Durch die geringe Umsetzungsquote von Baumrigolen-Systemen in Deutschland besteht weiterer Forschungsbedarf, um Erfahrungswerte, den Wissensstand und ein vermehrtes Interesse zur Umsetzung auszubauen. Des Weiteren bildet die Masterarbeit einen Bruchteil der Thematik der energetischen Bestandssanierung und dessen Wirkung ab. Weiterführende Forschungen auf Quartiersebene können die energetischen und ökologischen Effekte aus einer übergeordneten Perspektive betrachten. Ein weiterer Punkt, der in der Masterarbeit nur angedeutet wurde, ist die Kombination von Dachbegrünung und Solarmodulen. In Anbetracht des Ausbaus der erneuerbaren Energien ist dies eine Thematik, die ebenso weiterer Auseinandersetzung bedarf.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die ökologischen Sanierungs- und Anpassungsmaßnahmen, wie Dachbegrünung und Baumrigolen-Systeme, aufgrund des Klimawandels weiter an Bedeutung gewinnen sollten. Nicht nur wegen der positiven Effekte beispielsweise auf den Wasserhaushalt und die Biodiversität, sondern auch wegen der energie- und CO₂-einsparenden Wirkungen, die in der Masterarbeit durch die Berechnungen aufgezeigt wurden. Um die Umsetzung solcher Maßnahmen zu steigern und dabei die Menschen finanziell zu

unterstützen, muss Deutschland das Angebot an Förderungen ausbauen, den Zugang zu den Fördermitteln erleichtern und eine faire Aufteilung der Investitionskosten auf Staat, Mieter und Vermieter schaffen. Ohne finanzielle Anreize, Aufklärung und Unterstützung werden, wie das Praxisbeispiel zeigt, Sanierungsmaßnahmen herausgezögert, obwohl sie energetisch und ökologisch notwendig wären.

Literatur- und Quellenverzeichnis

Aachener Stiftung Kathy Beys (Hg.) (2015): Ökologie Definition / ökologisch. Besucht am 03.01.2022. https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/oekologie_1744.htm.

about:publishing GmbH (Hg.) (2022a): Dachbodendämmung - Kosten & Preisbeispiele. Besucht am 03.12.2022. <https://www.hausjournal.net/dachbodendaemmung-kosten>.

about:publishing GmbH (Hg.) (2022b): Ökologisch wertvolle Dachbegrü-
nung – welche Kosten fallen an?. Besucht am 10.12.2022. <https://www.hausjournal.net/dachbegruenung-kosten>.

Anondi GmbH (Hg.) (2021): Gerüstbau: Preise und Kosten. Besucht am 01.12.2022. <https://www.sanier.de/geruestbau/preise-und-kosten>.

Aphorismen.de (Hg.) (o.J.): Der Mensch hat viele Fähigkeiten, aber das größte Talent entwickelt er bei der Vernichtung der Natur. Besucht am 25.01.2023. <https://www.aphorismen.de/zitat/87503>.

Bafa - Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (Hg.) (2023a): Bundesförderung für effiziente Gebäude - Infoblatt zu den förderfähigen Maßnahmen und Leistungen. Besucht am 26.01.2023. https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/beg_infoblatt_foerderfaehige_kosten.pdf?__blob=publicationFile&v=30.

Bafa - Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (Hg.) (2023b): Einzelmaßnahmen an der Gebäudehülle. Besucht am 06.01.2023. https://www.bafa.de/DE/Energie/Effiziente_Gebaeude/Sanierung_Wohngebaeude/Gebaeudehuelle/gebaeudehuelle_node.html.

bauCompany24 GmbH (Hg.) (o.J.): Sockel-Abschlussprofil U-200 mm, Alu / Bd a 20 X 2,0 m. Besucht am 01.12.2022. <https://www.baucompany24.de/de/gips-und-putzzubehoer/2072/sockel-abschlussprofil-u-200-mm-alu/bd-a-20-x-2-0-m?number=12409>.

Baumschule Horstmann GmbH & Co. KG (Hg.) (o.J.): Kugel-Weißdorn 'Compacta'. Besucht am 11.12.2022. https://www.baumschule-horstmann.de/kugel-weissdorn-compacta-728_79779.html.

BauNetz Wissen (Hg.) (o.J.): Wärmeleitstufe. Besucht am 05.12.2022. <https://www.baunetzwissen.de/glossar/w/waermeleitstufe-1122409>.

bausep GmbH (Hg.) (o.J.a): Aktion Dachbodendämmung WLG 035 100 mm Glaswolle. Besucht am 03.12.2022. <https://www.bausep.de/aktion-dachbodendaemmung-wlg-035-glaswolle.html?361=675938>.

bausep GmbH (Hg.) (o.J.b): Aktion Dachbodendämmung WLG 035 160 mm Glaswolle. Besucht am 03.12.2022. <https://www.bausep.de/aktion-dachbodendaemmung-wlg-035-glaswolle.html?361=675956>.

bausep GmbH (Hg.) (o.J.c): Aktion Dachbodendämmung WLG 035 220 mm Glaswolle. Besucht am 07.12.2022. <https://www.bausep.de/aktion-dachbodendaemmung-wlg-035-glaswolle.html?361=675970>.

bausep GmbH (Hg.) (o.J.d): Bauder Gründach Leicht-Paket. Besucht am 10.12.2022. <https://www.bausep.de/bauder-gruendach-leicht-paket.html>.

bausep GmbH (Hg.) (o.J.e): Bauder Plant E grauschiefer 1 m x 5 m. Besucht am 10.12.2022. <https://www.bausep.de/bauder-plant-e-grauschiefer-1-m-x-5-m.html>.

bausep GmbH (Hg.) (o.J.f): Bauder THERM DS 2 Dampfsperrbahn 8,1 qm. Besucht am 10.12.2022. <https://www.bausep.de/bauder-therm-ds-2-dampfsperrbahn-8-1-qm.html>.

bausep GmbH (Hg.) (o.J.g): Bautenschutzmatte 6 mm. Besucht am 03.12.2022. <https://www.bausep.de/bautenschutzmatte.html?361=675877>.

bausep GmbH (Hg.) (o.J.h): EPS 035 150 DAA dh Flachdachdämmplatte 160 mm. Besucht am 10.12.2022. <https://www.bausep.de/eps-035-150-daa-dh-flachdachdaemmplatte.html?361=675956>.

bausep GmbH (Hg.) (o.J.i): Fassadenplatte EPS-WDV-Neo 035 1000 x 500 mm 200 mm. Besucht am 04.12.2022. <https://www.bausep.de/fassadenplatte-eps-wdv-neo-035-1000-x-500-mm.html?361=675965>.

bausep GmbH (Hg.) (o.J.j): Fischer TermoZ SV II ecotwist Schraubdübel 10-30. Besucht am 01.12.2022. <https://www.bausep.de/fischer-termoz-sv-ii-ecotwist-schraubduebel.html?361=1334463>.

bausep GmbH (Hg.) (o.J.k): Silikatputz Kratzputz weiß 3 mm 25 kg Eimer. Besucht am 01.12.2022. <https://www.bausep.de/silikatputz-kratzputz-weiss-25-kg-eimer.html>.

bausep GmbH (Hg.) (o.J.l): Tiefgrund LF 10 Ltr. Eimer. Besucht am 01.12.2022. <https://www.bausep.de/tiefgrund-lf-10-ltr-eimer.html>.

bausep GmbH (Hg.) (o.J.m): VWS Klebe- und Armierungsmörtel leicht EPS weiß 20 kg. Besucht am 01.12.2022. <https://www.bausep.de/vws-klebe-und-armierungsmoertel-leicht-eps-weiss-20-kg.html>.

bausep GmbH (Hg.) (o.J.n): VWS-Gewebe 160 g 4 x 4 mm weiß 1 x 50 m Gittergewebe. Besucht am 01.12.2022. <https://www.bausep.de/vws-gewebe-160-g-4-x-4-mm-weiss-1-x-50-m-gittergewebe.html>.

Bayrische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (Hg.) (2011): Kohlenstoffspeicherung von Bäumen, (Merkblatt 27). Besucht am 24.10.2022. <https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/mb-27-kohlenstoffspeicherung-2.pdf>.

BMUV - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (Hg.) (2022): Flächenverbrauch – Worum geht es?. Besucht am 12.09.2022. <https://www.bmuv.de/themen/nachhaltigkeit-digitalisierung/nachhaltigkeit/strategie-und-umsetzung/flaechenverbrauch-worum-geht-es#:~:text=T%C3%A4glich%20werden%20in%20Deutschland%20rund,engeren%20Wortsinn%20nicht%20%22verbrauchen%22>.

BMWK - Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hg.) (2021): Deutsche Klimaschutzpolitik. Besucht am 01.11.2022. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-deutsche->

klimaschutzpolitik.html#:~:text=Mit%20dem%20novellierten%20Gesetz%20wird,2045%20Treibhausgasneutralit%C3%A4t%20verbindlich%20erreicht%20werden.

bpb - Bundeszentrale für politische Bildung (Hg.) (2016): Energiewende. Besucht am 10.09.2022. <https://www.bpb.de/kurz-knapp/lexika/lexikon-der-wirtschaft/159947/energiewende/>.

bpb - Bundeszentrale für politische Bildung (Hg.) (2022): Bevölkerungswachstum. Besucht am 01.11.2022. <https://www.bpb.de/kurz-knapp/lexika/das-junge-politik-lexikon/319943/bevoelkerungswachstum/>.

Brune, M., Bender, S. & Groth, M. (2017): Gebäudebegrünung und Klimawandel. Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch klimawandeltaugliche Begrünung. Hg. v. Climate Service Center Germany (GERICS). Hamburg, (Report 30). Besucht am 03.09.2022. <https://www.climate-service-center.de/imperia/md/content/csc/report30.pdf>.

Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (1997): WBS 70 Wohnungsbauserie 70 6,3t. Leitfaden für die Instandsetzung und Modernisierung von Wohngebäuden in der Plattenbauweise. Besucht am 08.11.2022. <https://bauarchivddr.bbr-server.de/bauarchivddr/archiv/dokumente/3-4-01-2-wohnungsbauserie-wbs-70-6-3-t.pdf>.

Bundesnetzagentur (Hg.) (2023): Mieterstrom. Besucht am 27.01.2023. <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Vportal/Energie/Vertragsarten/Mieterstrom/start.html>.

Bundesregierung Deutschland (2022a): Verordnung zur Sicherung der Energieversorgung über kurzfristig wirksame Maßnahmen (Kurzfristenergieversorgungssicherungsmaßnahmenverordnung - EnSikuMaV). In: Energiesicherungsgesetz. <https://www.gesetze-im-internet.de/ensikumav/BJNR144600022.html>. Besucht am 20.11.2022.

Bundesregierung Deutschland (2022b): Verordnung zur Sicherung der Energieversorgung über mittelfristig wirksame Maßnahmen (Mittelfristenergieversorgungssicherungsmaßnahmenverordnung - EnSimiMaV).

<https://www.gesetze-im-internet.de/ensimimav/BJNR153000022.html>. Besuch am 20.11.2022.

Carrot Media v.o.s. (Hg.) (2022): WDVS (Wärmedämmverbundsystem): welche Kosten muss man dafür rechnen?. Besuch am 01.12.2022.

<https://kostencheck.de/wdvs-waermedaemmverbundsystem-kosten>.

climate-data.org (Hg.) (2021): Klima Tabarz. Besuch am 05.10.2022.
<https://de.climate-data.org/europa/deutschland/thueringen/tabarz-860240/>.

co2online gemeinnützige Beratungsgesellschaft mbH (Hg.) (2022): Fernwärme: Technik, Nutzung, Kosten und Alternativen. Besuch am 13.12.2022.

<https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/heizung/fernwaerme/#:~:text=Die%20durchschnittlichen%20Fernw%C3%A4rme%2DKosten%20pro,entsprechend%2094%20Euro%20je%20MWh>.

dena - Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hg.) (2021): DENA-GEBÄUDEREPORT 2022. Besuch am 06.11.2022. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/dena-Gebaeudereport_2022.pdf.

Deutscher Bundestag (2020): Stenografischer Bericht, vom Plenarprotokoll 19/166. <https://dserver.bundestag.de/btp/19/19166.pdf#P.20760>. Besuch am 19.11.2022.

Dickhaut, W., Fellmer, M., Lauer, J. & Winkelmann, A. (2018): DEZENTRALE REGENWASSERBEWIRTSCHAFTUNG AN BAUMSTANDORTEN – CHANCEN UND RISIKEN. Ausarbeitung im Projekt Stadtbäume im Klimawandel (SIK) gefördert vom BMUB. HafenCity Universität Hamburg. Besuch am 06.09.2022. <https://www.hcu-hamburg.de/fileadmin/documents/REAP/files/Regenwasserdokument.pdf>.

Dipl.-Ing. Bernd Eckstein (Hg.) (2013): Wärmeverluste. Besuch am 13.12.2022. <https://www.igw-eckstein.de/html/warmeverluste.html>.

Dirk, R. (2014): Energieeinsparverordnung Schritt für Schritt. Wohngebäude, Nichtwohngebäude, Erläuterungen, Beispiele, Excel-Berechnungsblätter. 6., überarb. und aktualisierte Aufl. Köln: Bundesanzeiger-Verl.

Drewer, A., Paschko, H., Paschko, K. & Patschle, M. (2013): Wärmedämmstoffe. Kompass zur Auswahl und Anwendung ; mit 245 Tabellen. Köln: Rudolf Müller GmbH & Co. KG.

EcoTree (Hg.) (o.J.): How much CO2 does a tree absorb?. Besucht am 08.01.2023. <https://ecotree.green/en/how-much-co2-does-a-tree-absorb>.

Enerdata (Hg.) (2022a): CO2-Emissionen aus der Brennstoffverbrennung. Besucht am 01.11.2022. <https://energiestatistik.enerdata.net/co2/emissionen-co2-daten-von-brennstoff-verbrennung.html>.

Enerdata (Hg.) (2022b): Gesamter Energieverbrauch. Besucht am 01.11.2022. <https://energiestatistik.enerdata.net/gesamtenergie/welt-verbrauch-statistik.html>.

energie-m Energieberatung (Hg.) (2021a): Wärmedurchgangswiderstand. Besucht am 03.12.2022. <https://wiki.energie-m.de/W%C3%A4rmedurchgangswiderstand>.

energie-m Energieberatung (Hg.) (2021b): Wärmedurchlasswiderstand. Besucht am 03.12.2022. <https://wiki.energie-m.de/W%C3%A4rmedurchlasswiderstand>.

energie-m Energieberatung (Hg.) (2021c): Wärmeübergangswiderstand. Besucht am 03.12.2022. <https://wiki.energie-m.de/W%C3%A4rme%C3%BCbergangswiderstand>.

ERK - Geschäftsstelle Expertenrat für Klimafragen (Hg.) (2022): Zweijahresgutachten 2022. Besucht am 04.11.2022. https://expertenrat-klima.de/content/uploads/2022/11/ERK2022_Zweijahresgutachten.pdf.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (Hg.) (2022): Endliche Rohstoffe. Besucht am 05.11.2022. <https://www.fnr.de/nachwachsende-rohstoffe/nachhaltigkeit/endliche-rohstoffe>.

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München (Hg.) (2018): Wirtschaftliche Bedeutung der Gebäudehülle im Wohnungsbau. Besucht am 08.11.2022. <https://buveg.de/wp-content/uploads/2020/11/FIW-Studie>.

Wirtschaftliche-Bedeutung-der-Gebäude-im-Wohnungs-
bau-April-20181.pdf.

FP Trading GmbH (Hg.) (2022): Fassade streichen: Mit DIESEN Kosten
musst du rechnen. Besucht am 01.12.2022. [https://farben-
profi.de/blogs/blog/fassade-streichen-kosten](https://farben-profi.de/blogs/blog/fassade-streichen-kosten).

Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Umwelt und Energie (Hg.)
(o.J.): Dachbegrünung. Leitfaden zur Planung. Besucht am 03.09.2022.
[https://www.hamburg.de/content-
blob/10603292/c6eb1f159c491cfd8c7188f77b0dd277/data/d-leitfaden-
dachbegruenung.pdf](https://www.hamburg.de/content-blob/10603292/c6eb1f159c491cfd8c7188f77b0dd277/data/d-leitfaden-dachbegruenung.pdf).

Geiger, W. & Dreiseitl, H. (2001): Neue Wege für das Regenwasser.
Handbuch zum Rückhalt und zur Versickerung von Regenwasser in Baugebie-
ten. 2. Aufl. München: Oldenbourg Industrieverl.

Gemeinde Bad Tabarz (Hg.) (2022): BESCHLÜSSE DES GEMEINDERA-
TES DER GEMEINDE BAD TABARZ VOM 07.09.2022. [https://www.bad-ta-
barz.de/wp-content/uploads/2022/10/Beschlussprotokoll-zur-29.-Sitzung-Ge-
meinderates-vom-07.09.2022.pdf](https://www.bad-ta-barz.de/wp-content/uploads/2022/10/Beschlussprotokoll-zur-29.-Sitzung-Gemeinderates-vom-07.09.2022.pdf).

Göbner, D., Mohri, M. & Krespach, J. J. (2021): Evapotranspiration
Measurements and Assessment of Driving Factors: A Comparison of Different
Green Roof Systems during Summer in Germany. In: *Land* 10 (12), S. 1334.
DOI: 10.3390/land10121334.

Haefele, G., Oed, W. & Sabel, L. (2003): HausErneuerung. Instandsetzen,
Modernisieren, Umbauen ; ökologische Baupraxis ; mit Anleitung zur Selbst-
hilfe. 8., überarb. Aufl. Staufien bei Freiburg: Ökobuch.

Heiden, S., Erb, R. & Sieker, F. (Hg.) (2001): Hochwasserschutz heute -
nachhaltiges Wassermanagement. Berlin: Erich Schmidt Verlag GmbH & Co.
KG, (Initiativen zum Umweltschutz, 31).

IASP - Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte (Hg.) (2019):
BuGG-Fachinformation „Positive Wirkungen von Gebäudebegrünungen (Dach-,
Fassaden- und Innenraumbegrünung)“. Besucht am 03.09.2022.

<https://docplayer.org/228594084-Bugg-fachinformation-positive-wirkungen-von-gebaeudebegruenungen-dach-fassaden-und-innenraumbegruenung.html>.

ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung (Hg.) (2019): Sozialer Klimaschutz in Mietwohnungen. Besucht am 26.01.2023.

<https://www.ifeu.de/projekt/sozialer-klimaschutz-in-mietwohnungen/>.

ift Rosenheim & DIN-Arbeitsausschusses NABau (Hg.) (2013): Neue DIN 4108-2 – „Mindestanforderungen an den Wärmeschutz“. Besucht am 04.12.2022. https://www.ift-rosenheim.de/documents/10180/131529/FA_WKSB1304_DIN_4108-2/d8a27b5c-f2a2-f659-0a31-c879f8e9d621.

Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH (Hg.) (o.J.a): Das Konzept der Schwammstadt (Sponge-city). Besucht am 07.02.2023. <https://www.sieker.de/fachinformationen/umgang-mit-regenwasser/article/das-konzept-der-schwammstadt-sponge-city-577.html>.

Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH (Hg.) (o.J.b): Rigolen. Besucht am 05.01.2023. <https://www.sieker.de/fachinformationen/regenwasserbewirtschaftung/versickerung/article/versickerungsmulden-156.html>.

Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH (Hg.) (o.J.c): Versickerungsmulden. Besucht am 05.01.2023. <https://www.sieker.de/fachinformationen/regenwasserbewirtschaftung/versickerung/article/versickerungsmulden-156.html>.

Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH (Hg.) (2022a): Baumrigolen. Besucht am 12.10.2022. <https://www.sieker.de/fachinformationen/article/baumrigolen-381.html>.

Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH (Hg.) (2022b): Mulden-Rigolen-System (MRS). Besucht am 12.10.2022. <https://www.sieker.de/fachinformationen/article/mulden-rigolen-system-mrs-9.html>.

Jahn, M., Köster, H., Laros, S. & Leienbach, L. (2015): KLIMASCHUTZ-KONZEPT 2050 KOMMUNALE GEBÄUDE. Hg. v. Europa-Universität Flensburg, Zentrum für nachhaltige Energiesysteme. Flensburg. Besucht am 14.10.2022.

<https://www.uni-flensburg.de/fileadmin/content/abteilungen/industrial/dokumente/downloads/veroeffentlichungen/forschungsergebnisse/k-2050-kg-endbericht.pdf>.

Kerschberger, A., Brillinger, M. & Binder, M. (2007): Energieeffizient sanieren. Mit innovativer Technik zum Niedrigenergiestandard. 1. Aufl. Berlin: Solarpraxis AG.

Kopatz, M. (2017): Ökoroutine. Damit wir tun, was wir für richtig halten. Lizenzausgabe für die Bundeszentrale für Politische Bildung. Bonn: Bundeszentrale für Politische Bildung, (Schriftenreihe / Bundeszentrale für Politische Bildung, Band 10128).

Kubb, C. (Hg.) (2021): Die Eiche - Laubbaum. Besucht am 16.01.2023. <https://www.biologie-schule.de/eiche-steckbrief.php>.

lfl - Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hg.) (o.J.): Weißdorn – Kurzbeschreibung heimischer Gehölze. Besucht am 08.01.2023. <https://www.lfl.bayern.de/iab/kulturlandschaft/111319/index.php>.

LUMITOS AG (Hg.) (o.J.): Eigenschaften des Wassers. Besucht am 10.12.2022. https://www.chemie.de/lexikon/Eigenschaften_des_Wassers.html#:~:text=Die%20W%C3%A4rmeleitf%C3%A4higkeit%20des%20Wassers%20nimmt,und%20Silber%20429%20W%2FmK.

marketeam creativ GmbH (Hg.) (2020): Was kostet die Fassadendämmung?. Besucht am 21.10.2022. <https://www.energie-fachberater.de/daemmung/fassadendaemmung/was-kostet-die-fassadendaemmung.php>.

Matzarakis, A. (o.J.): Klimawandel und Städte - Stadtklimatischer Einfluss von Bäumen. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Freiburg. Besucht am 06.09.2022. https://www.urbanclimate.net/matzarakis/papers/klimawandel_stadtklima_baueme.pdf.

McKinsey & Company (Hg.) (2022): Global Energy Perspective 2022. Besucht am 05.11.2022. https://www.mckinsey.com/~/_media/McKinsey/Industries/Oil%20and%20Gas/Our%20Insights/Global%20Energy%20Perspective%202022/Global-Energy-Perspective-2022-Executive-Summary.pdf.

meteoblue AG (Hg.) (2022): Klimawandel Bad Tabarz. Besucht am 05.10.2022. https://www.meteoblue.com/de/climate-change/bad-tabarz_deutschland_2824437.

Metzger, S., Jahnke, K., Walikewitz, N., Otto, M., Grondey, A. & Fritz, S. (2019): Wohnen und Sanieren. Empirische Wohngebäudedaten seit 2002. Hg. v. Umweltbundesamt. Besucht am 11.09.2022. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-05-23_cc_22-2019_wohnenundsanieren_hintergrundbericht.pdf.

Michael Finger (Hg.) (2009): Weissdorn (*Crataegus monogyna*). Besucht am 06.01.2023. <http://www.holzwurm-page.de/holzarten/holzart/weissdorn.htm>.

Michalski, D., Reiß, P. & Strauss, H.-C. (2021): Klimaschutz im Gebäudesektor – Neue Wege für die Wohnungswirtschaft. Impuls für das Strategieforum „Wohnungswirtschaft“ des Grünen Wirtschaftsdialogs. Berlin, (Difu-Sonderveröffentlichung). Besucht am 25.01.2023. <https://repository.difu.de/jspui/bitstream/difu/580487/1/SV%20Klimaschutz%20im%20Gebaeudesektor%20GWD.pdf>.

Minke, G. (2006): Dächer begrünen. Einfach und wirkungsvoll ; Planung, Ausführungshinweise, Praxistipps. 3. Aufl. Staufien bei Freiburg: Ökobuch, (Ökobuch-Faktum).

Moser, A., Rötzer, T., Pauleit, S. & Pretzsch, H. (2017): Stadtbäume: Wachstum, Funktionen und Leistungen – Risiken und Forschungsperspektiven. 188. Aufl. Hg. v. Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung, (5/6). Besucht am 19.10.2022. https://www.waldwachstum.wzw.tum.de/fileadmin/publications/Moser_2018.pdf.

Norddeutscher Rundfunk (Hg.) (2022): "Ökonomisch und ökologisch unsinnig". Geywitz zu Einfamilienhäusern. Besucht am 11.09.2022. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/bauen-einfamilienhaeuser-oekologie-101.html>.

Paschotta, R. (Hg.) (o.J.): Energetische Sanierung von Gebäuden. Besuch am 06.02.2023. https://www.energie-lexikon.info/energetische_sanierung_von_gebaeuden.html.

Paul Bauder GmbH & Co. KG (Hg.) (o.J.): Produktdatenblatt Bauder GREEN WSP 50 Wasserspeicherplatte 50 mm. Besuch am 11.12.2022. https://www.bauder.de/fileadmin/bauder.de/DOWNLOADS/PDB/Flachdach/Gruendach/Drainschicht/BauderGREEN_WSP_50_-_Produktdatenblatt_74480050_-_1121_-_DE.pdf.

Pflanzmich GmbH (Hg.) (o.J.): Kugel-Weißdorn. Besuch am 11.12.2022. https://www.pflanzmich.de/produkt/43065/kugel-weissdorn.html?utm_source=google&utm_medium=shopping&utm_campaign=feed&artno=172357&gclid=Cj0KCQiAnNacBhDvARIsABnDa6_ts-n01BfHZ112kQ0AAT4KVFTOW6jNi5I9IRODR_h4itIsnXi2PIsaAtlwEALw_wcB.

Raiffeisen Schweiz Genossenschaft (Hg.) (2022): Lebenszyklus Immobilien – was soll wann saniert werden?. Besuch am 13.12.2022. <https://www.raiffeisen.ch/casa/de/immobilien-sanieren/sanierungsplanung/lebensdauertabelle.html>.

Rathscheck Schiefer und Dach-Systeme - ZN der Wilh. Werhahn KG Neuss (Hg.) (o.J.): Dachsanierung: Welche Kosten für das neue Dach anfallen. Besuch am 10.12.2022. <https://www.rathscheck.de/magazin/dachsanierung-welche-kosten-fuer-das-neue-dach-anfallen/>.

RENEWA GmbH (Hg.) (o.J.): Ratgeber Flachdach - das müssen Sie wissen. Besuch am 26.10.2022. <https://www.energieheld.de/dach/flachdach#kosten-foerderung>.

Sommer, H., Pallasch, M., Geissler, D. & Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH (2017): Regenwasserbewirtschaftung und Klimaschutz mit Baumrigolen. Hg. v. fbr – Bundesverband für Betriebs- und Regenwasser e. V., (fbr-wasserspiegel 3/17). Besuch am 06.09.2022. https://www.fbr.de/fileadmin/Daten/Artikel_aus_wsp/Artikel_Sommer-Baumrigolen_wsp_3-17.pdf.

Stadtverwaltung Leichlingen (Hg.) (o.J.): Starkregenkatastrophe 2021. Besucht am 11.02.2023. <https://www.leichlingen.de/bauen-wirtschaft-und-umwelt/starkregen-2021>.

Stahr, M. (Hg.) (2011): Bausanierung. Erkennen und Beheben von Bauschäden. 5., erw. und aktualis. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, (Praxis).

Stahr, M. (2018): Sanierung von baulichen Anlagen. Nachhaltig - ökologisch - umweltgerecht. Wiesbaden/Heidelberg: Springer Vieweg. Besucht am 03.09.2022. <https://www.gbv.de/dms/tib-ub-hannover/1039904890.pdf>.

Statista GmbH (Hg.) (2021a): Energiebedingte CO₂-Emissionen pro Kopf weltweit nach ausgewählten Ländern im Jahr 2021 (in Tonnen). Besucht am 22.01.2023. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167877/umfrage/co-emissionen-nach-laendern-je-einwohner/>.

Statista GmbH (Hg.) (2021b): Umsatz mit Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden in Deutschland von 2011 bis 2019. Besucht am 08.11.2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1301399/umfrage/umsatz-durch-energieeffizienz-verbesserungsmassnahmen-von-gebaeuden/#:~:text=Der%20Gesamtumsatz%20durch%20Verbesserungen%20der,insgesamt%20knapp%209%20Milliarden%20Euro.>

Statista GmbH (Hg.) (2022a): Anzahl der Wohngebäude in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2021. Besucht am 06.11.2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/70094/umfrage/wohngebaeude-bestand-in-deutschland-seit-1994/#:~:text=Wohngeb%3%A4ude%20%2D%20Bestand%20in%20Deutschland%20bis%202021&text=Im%20Jahr%202021%20wurden%20in,rund%203%2C81%20Milliarden%20Quadratmeter.>

Statista GmbH (Hg.) (2022b): Struktur des Wohnungsbaus nach Neubau und Sanierung in Deutschland in den Jahren 2001 bis 2020. Besucht am 11.09.2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/202207/umfrage/struktur-des-wohnungsbaus-nach-art-der-bauleistung-in-deutschland/>.

Stiftung Unternehmen Wald (Hg.) (o.J.): Wie viel Kohlendioxid (CO₂) speichert der Baum bzw. der Wald. Besucht am 06.01.2023. <https://www.wald.de/waldwissen/wie-viel-kohlendioxid-co2-speichert-der-wald-bzw-ein-baum/#:~:text=So%20k%C3%B6nnen%20Sie%20f%C3%BCr%20jede,hat%201%2C248%20Tonnen%20CO2%20gespeichert.>

Technische Universität Dresden (Hg.) (2022): ReKIS EXPERT. Besucht am 05.10.2022. <https://rekisviewer.hydro.tu-dresden.de/fdm/ReKISExpert.jsp#>.

TLS - Thüringer Landesamt für Statistik (Hg.) (2021): Gemeinde: Bad Tabarz. Besucht am 05.10.2022. <https://statistik.thueringen.de/datenbank/gemeindeblatt.asp?gemnr=67064>.

Umweltbundesamt (Hg.) (1997): Leitfaden zum ökologisch orientierten Bauen. Eine Veröffentlichung aus dem Fachgebiet I 1.2 "Raumbezogene Umweltplanung, Kommunalen Umweltschutz" des Umweltbundesamtes. Deutschland / Umweltbundesamt / Fachgebiet Raumbezogene Umweltplanung, Kommunalen Umweltschutz. 3., überarb. und erw. Aufl. / [Red. der 3. Aufl.: Gerd Schablitzki ; Christiane Wagener-Lohse (unter Mitw. von Irma Assmann)]. Heidelberg: <C. F.> Müller.

Umweltbundesamt (Hg.) (2022): Abfallaufkommen. Besucht am 08.11.2022. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen#bau-abbruch-gewerbe-und-bergbauabfalle>.

Verband Deutscher Kneippheilbäder und Kneippkurorte (Hg.) (o.J.): Bad Tabarz. Besucht am 05.10.2022. <https://www.kneippverband.de/heilbaederkurorte/bad-tabarz/>.

Verbraucherzentrale NRW e.V. (Hg.) (2022): Rechenbeispiel für eine Fassadendämmung. Besucht am 13.12.2022. <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/energie/energetische-sanierung/rechenbeispiel-fuer-eine-fassadendaemmung-8192>.

Vulkatec Riebensahm GmbH (Hg.) (o.J.): Baumrigolen. Nachhaltige Lösungen für die innerstädtische Baumpflanzung. Besucht am 06.09.2022. <https://vulkatec.de/media/pdf/b8/e8/cb/Baumrigolen.pdf>.

Westdeutscher Rundfunk Köln (Hg.) (2020): CO2 in Zahlen – was ist viel, was ist wenig?. Besucht am 13.01.2023. <https://www.quarks.de/umwelt/klimawandel/co2-in-zahlen-was-ist-viel-was-ist-wenig/>.

WWU Münster - Westfälische Wilhelms-Universität Münster (Hg.) (o.J.): DIE EICHE: KÖNIGIN DES WALDES. Besucht am 16.01.2023. <https://www.uni-muenster.de/Baumerlebnispfad/stationen/station4/eiche.html>.

ZDF - ZWEITES DEUTSCHES FERNSEHEN (Hg.) (2022): Rekordpreis durch Ukraine-Krieg: Erdgas so teuer wie noch nie. Besucht am 08.11.2022. <https://www.zdf.de/nachrichten/politik/erdgas-preis-rekord-russland-ukraine-krieg-100.html>.

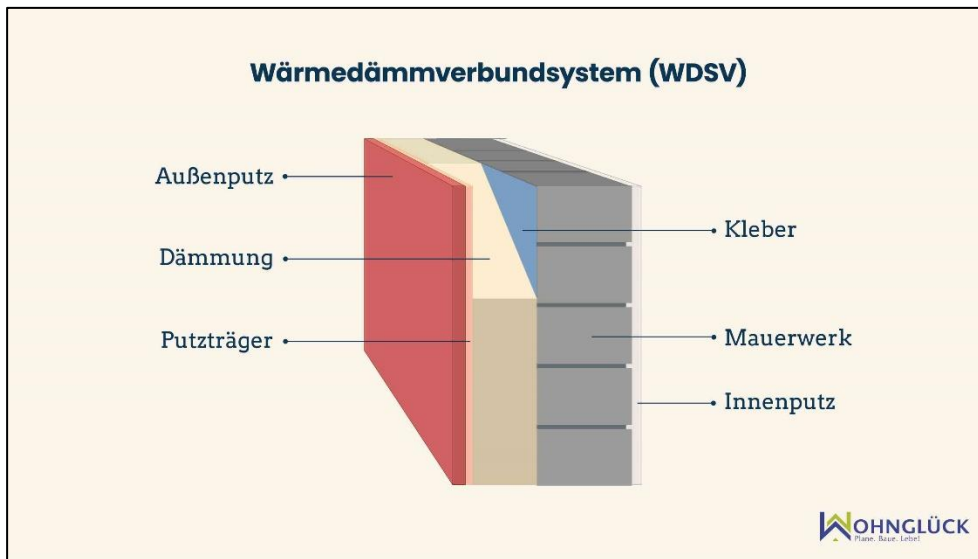
Anhang

Anhangsverzeichnis

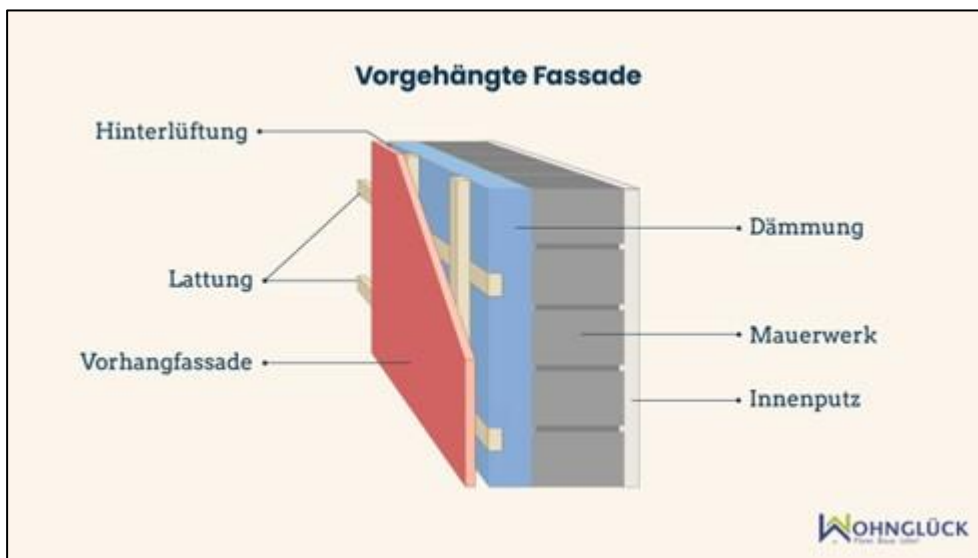
Anhang 1: Beispielaufbau eines Wärmedämmverbundsystems (Quelle: ANTONIA EIGEL o.J.).....	77
Anhang 2: Beispielaufbau einer vorgehängten Fassade (VHF) (Quelle: ANTONIA EIGEL o.J.).....	77
Anhang 3: Vergleichende Darstellung und Aufbau von Warm- und Kaltdach (Quelle: ZVDH o.J.)	78
Anhang 4: Beispielaufbau einer Dachbegrünung im Vergleich zum natürlichen Erdboden-Aufbau (Quelle: ZinCO GmbH Nürtingen o.J.)	78
Anhang 5: Beispielaufbau eines Mulden-Rigolen-Systems (Quelle: Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH o.J.)	79
Anhang 6: Werte der inneren und äußeren Wärmeübergangswiderstände (R_{si} und R_{se}) nach ISO 6946 (energie-m Energieberatung 2021c)	80
Anhang 7: Formel Wärmedurchlasswiderstand R (energie-m Energieberatung 2021b).....	80
Anhang 8: Formel Wärmedurchgangswiderstand R und U-Wert (energie-m Energieberatung 2021a).....	81
Anhang 9: Berechnungen des energetischen Ist-Zustandes.....	82
Anhang 10: Berechnungen Fassadendämmung – Variante 1.....	84
Anhang 11: Berechnungen Dachdämmung – Variante 2	87
Anhang 12: Berechnungen Dachbegrünung: Variante 3	90
Anhang 13: Berechnungen Baumrigolen-Systeme: Variante 4.....	93
Anhang 14: Berechnungen tatsächliche CO ₂ -Einsparung (Variante 1 und 3) ..	94
Anhang 15*: Bauzustandsbeschreibung des ehemaligen „Am Mönchhof 22-28“	96
Anhang 16*: Kostenübersicht für Sanierungsmaßnahmen 2006	96
Anhang 17*: Karte mit Abmessungen „Am Mönchhof 22-28“	96
Anhang 18*: Ansichtspläne „Am Mönchhof 22-28“	96
Anhang 19*: Energetischer Ist-Zustand 2005	96

Anhang 20*: Darstellung des Höhenversatzes „Am Mönchhof 22-28“	96
Anhang 21*: Rahmenplanung Tabarz „Am Mönchhof“	96
Anhang 22*: Energieausweis „Am Mönchhof 22-26“	96
Anhang 23*: Lageplan „Am Mönchhof 22-26“ mit Katasterübersicht	96
Anhang 24*: Beschreibung der Modernisierungsmaßnahmen und entsprechenden Kosten 2005	96
Anhang 25*: Bauzustandsbeschreibung mit Sanierungsmaßnahmen	96
Anhang 26: Nicht maßstabsgetreue Darstellung der Baumrigolen-Systeme (Variante 4) (Eigene Darstellung)	96
Anhang 27: 3D-Darstellung des Gebäudes nach möglicher Umsetzung von Dachbegrünung und Baumrigolen-Systemen (Variante 3 und 4) (Eigene Darstellung).....	96

Abbildungen



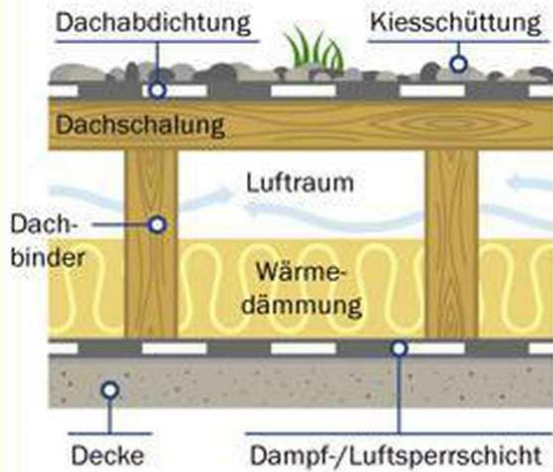
Anhang 1: Beispielaufbau eines Wärmedämmverbundsystems (Quelle: ANTONIA EIGEL o.J.)



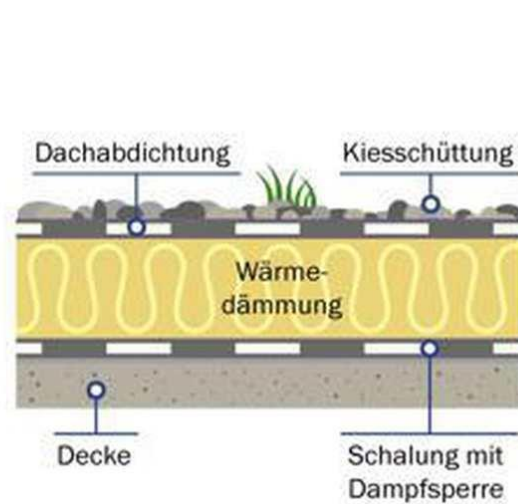
Anhang 2: Beispielaufbau einer vorgehängten Fassade (VHF) (Quelle: ANTONIA EIGEL o.J.)

Flachdach-Varianten

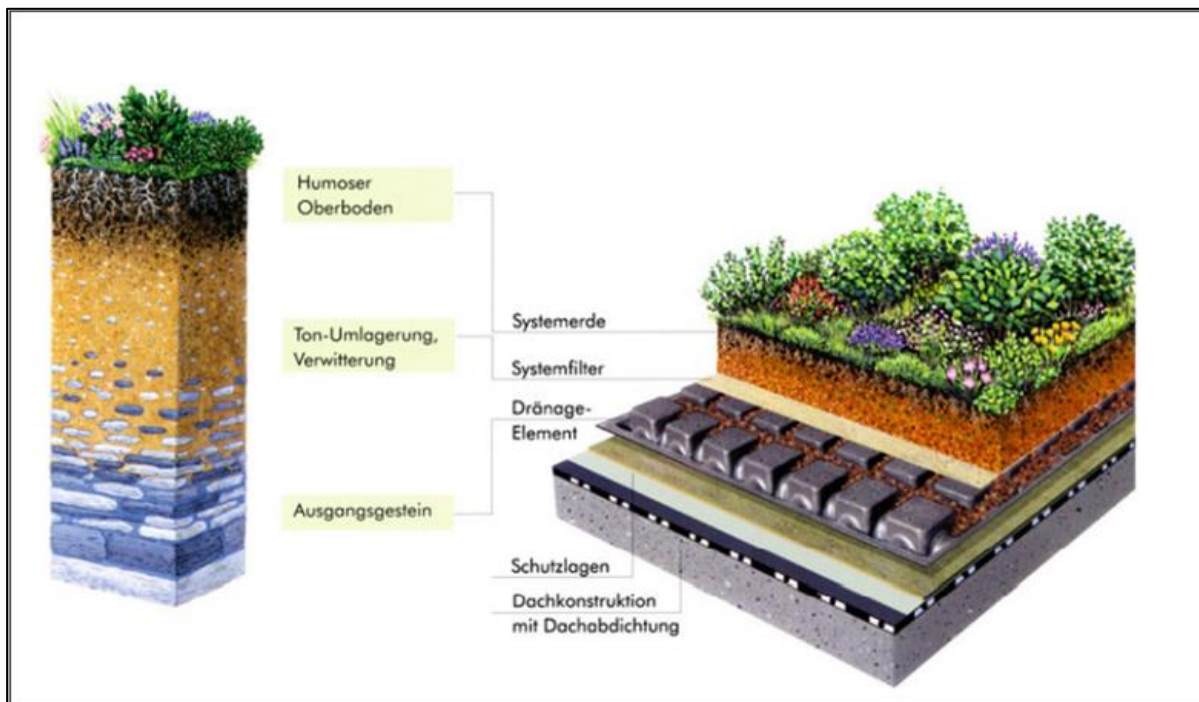
Kaltdach = belüftetes Dach



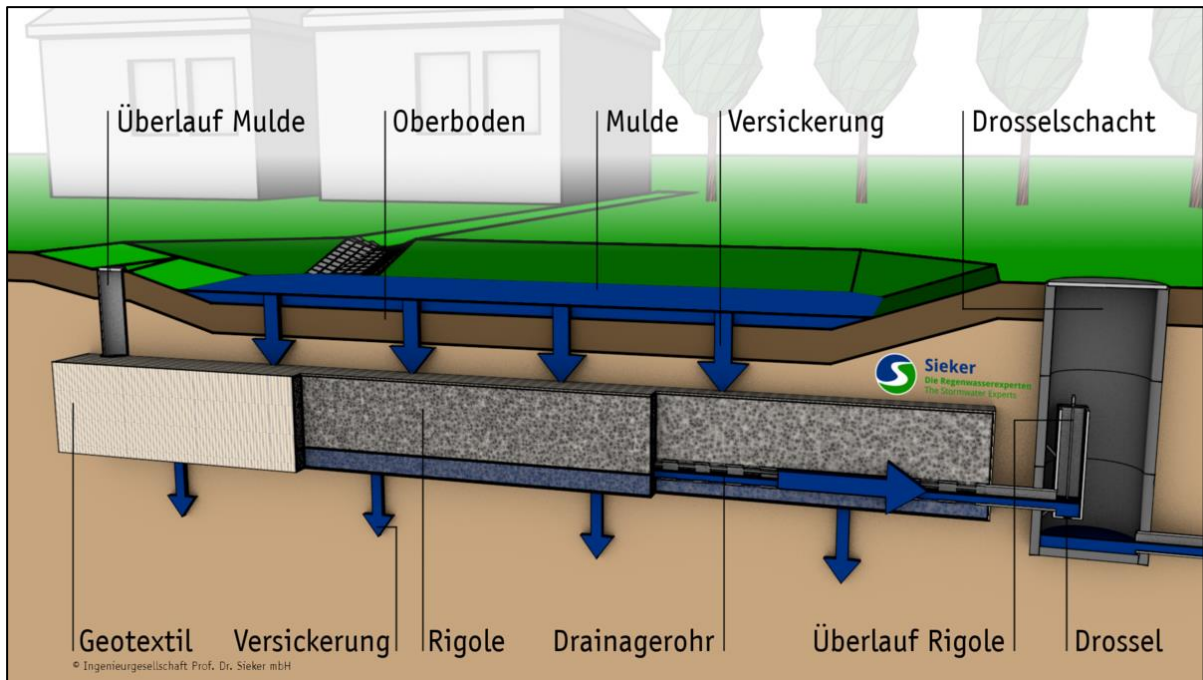
Warmdach = nicht belüftetes Dach



Anhang 3: Vergleichende Darstellung und Aufbau von Warm- und Kaltdach (Quelle: ZVDH o.J.)



Anhang 4: Beispielaufbau einer Dachbegrünung im Vergleich zum natürlichen Erdboden-Aufbau (Quelle: ZinCO GmbH Nürtingen o.J.)



Anhang 5: Beispielaufbau eines Mulden-Rigolen-Systems (Quelle: Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH o.J.)

Formeln und Werte

Anhang 6: Werte der inneren und äußeren Wärmeübergangswiderstände (R_{si} und R_{se}) nach ISO 6946 (energie-m Energieberatung 2021c)

	Richtung des Wärmestromes		
	Aufwärts (Decken, Treppen und Dächer, Neigungswinkel 0° bis <60°)	Horizontal (Wände und Dächer, Neigungswinkel 60° bis 90°)	Abwärts (Decken, Treppen und Dächer, Neigungswinkel 0° bis <60°)
R_{si}	0,10	0,13	0,17
R_{se}	0,04	0,04	0,04

Anhang 7: Formel Wärmedurchlasswiderstand R (energie-m Energieberatung 2021b)

Formelzeichen: R

Formel: $R = d / \lambda$

Einheit: $(m^2 * K) / W$

- d - Bauteilstärke in m
- λ - Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit des Bauteils

Anhang 8: Formel Wärmedurchgangswiderstand R und U-Wert (energie-m Energieberatung 2021a)

Formelzeichen: R_T

Formel Berechnung: $R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots R_n + R_{se}$

Einheit: $m^2 \cdot K / W$

- R_T - Wärmedurchgangswiderstand des Bauteils
- R_1, R_2, R_n - Bemessungswerte der Wärmedurchlasswiderstände der einzelnen Bauteile
- R_{se} - Äußerer Wärmeübergangswiderstand
- R_{si} - Innerer Wärmeübergangswiderstand

U-Wert-Umrechnung: $U = 1 / R_T$

Berechnungen

Anhang 9: Berechnungen des energetischen Ist-Zustandes

Fassade

Gegebene Werte:

$$R_{es} = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$$

$$R_{isi} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} \text{ (horizontaler Wärmestrom)}$$

Bauteil	Durchmesser d	Wärmeleitfähigkeit λ	Wärmedurchlasswiderstand R (d / λ)
	d in m	λ in $\text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$	R in $\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$
Tragschale aus Beton	0,14	1,650 (siehe Anhang 19)	0,085
Mineralfaserdämmung	0,06	0,050	1,200
Wetterschale mit Waschbetonoberfläche	0,06	1,650	0,036

$$R_T = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} + 0,085 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} + 1,200 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} +$$

$$0,036 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} + 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$$

$$= \underline{\underline{1,49 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}}}$$

$$\text{U-Wert} = 1/1,49 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$$

$$= \underline{\underline{0,671 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}}}$$

Drempelgeschossdecke

Gegebene Werte:

$$R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$$

$$R_{si} = 0,10 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} \text{ (aufwärtsbewegender Wärmestrom)}$$

Bauteil	Durchmesser d	Wärmeleitfähigkeit λ	Wärmedurchlasswiderstand R (d / λ)
	d in m	λ in $\text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$	R in $\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$
Betondecke	0,14	1,650 (siehe Anhang 19)	0,085
Mineralfaserdämmung	0,06	0,050	1,200

$$R_T = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} + 0,085 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} + 1,200 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} + 0,10 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$$

$$= \underline{1,42 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}}$$

$$\text{U-Wert} = 1/1,42 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$$

$$= \underline{0,702 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Durchschnittlicher Endenergieverbrauch

Gegebene Werte (nach Energieausweis (Anhang 22)):

Energieverbrauch 2018: 176.998 kWh / a

Energieverbrauch 2019: 175.264 kWh / a

Energieverbrauch 2020: 191.066 kWh / a

$$\text{Durchschnittlicher Endenergieverbrauch} = (176.998 \text{ kWh} / \text{a} + 175.264 \text{ kWh} / \text{a} + 191.066 \text{ kWh} / \text{a}) / 3 \text{ a}$$

$$= \underline{183.440 \text{ kWh} / \text{a}}$$

Anhang 10: Berechnungen Fassadendämmung – Variante 1

Fassade

Gegebene Werte:

R_{se} mit $0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$

R_{si} mit $0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ (horizontaler Wärmestrom)

Bauteil	Durchmesser d	Wärmeleitfähigkeit λ	Wärmedurchlasswiderstand R (d / λ)
	d in m	λ in $\text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$	R in $\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$
Tragschale aus Beton	0,14	1,650 (siehe Anhang 19)	0,085
Mineralfaserdämmung	0,06	0,050	1,200
Wetterschale mit Waschbetonoberfläche	0,06	1,650	0,036
Wärmedämmung aus Polystyrol-Hartschaumplatten (WLS 035)	0,2	0,035	5,714

$$R_T = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} + 0,085 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} + 1,200 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} + 0,036 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} + 5,714 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} + 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$$

$$= \underline{7,205 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}}$$

$$U\text{-Wert} = 1 / 7,205 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$$

$$= \underline{0,138 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Energieeinsparung pro Jahr (Verbraucherzentrale NRW e.V. 2022)

Gegebene Werte:

U-Wert Ist-Zustand: $0,671 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$

U-Wert Variante 1: $0,138 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$

Temperaturunterschied der über 12 Monate zwischen Innen und Außen ausgeglichen werden musste: 70 kWh (Dipl.-Ing. Bernd Eckstein 2013)

Fläche der Fassade: 1.173 m^2

U-Wert-Differenz = $0,671 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K} - 0,138 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$

= $0,533 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$

Energieeinsparung = $0,533 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot 70 \text{ kWh} \cdot 1.173 \text{ m}^2$

= **43.764,63 kWh / a**

Auswirkung auf die Gebäudeenergieeffizienzklasse

Gegebene Werte:

Durchschnittlicher Endenergieverbrauch: $183.440 \text{ kWh} / \text{a}$

Energieeinsparung: $43.764,63 \text{ kWh} / \text{a}$

Nutzfläche: 2.293 m^2 (siehe Anhang 19)

Veränderter durchschnittlicher Endenergieverbrauch = $183.440 \text{ kWh} / \text{a} - 43.764,63 \text{ kWh} / \text{a}$

= **139.675,37 kWh/a**

Veränderter durchschnittlicher Endenergieverbrauch je $\text{m}^2 / \text{a} = 139.675,37 \text{ kWh} / \text{a} / 2.293 \text{ m}^2$

= **60,91 kWh / m^2 / a** → entspricht Gebäudeenergieeffizienzklasse B statt C mit $80 \text{ kWh} / \text{m}^2 / \text{a}$ (siehe Anhang 22)

CO₂-Einsparung pro Jahr

Gegebene Werte:

Energieeinsparung = 43.764,63 kWh / a

CO₂-Ausstoß von Fernwärme = 0,2 kg / kWh (co2online gemeinnützige Beratungsgesellschaft mbH 2022)

CO₂-Einsparung pro Jahr = 0,2 kg / kWh * 43.764,63 kWh / a

= 8.752,92 kg/a (8,753 Tonnen)

Energiekosteneinsparung (Verbraucherzentrale NRW e.V. 2022)

Gegebene Werte:

Energieeinsparung: 43.764,63 kWh / a

Sanierungszyklus: 40 Jahre

Fernwärme-Preis: 9,4 Cent / kWh

43.764,63 kWh / a * 0,094 Euro * 40 Jahre = 164.555 Euro nach 40 Jahren

Anhang 11: Berechnungen Dachdämmung – Variante 2

Geschossdecke

Gegebene Werte:

R_{se} mit $0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$

R_{si} mit $0,10 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ (aufwärts gerichteter Wärmestrom)

Bauteil	Durchmesser d	Wärmeleitfähigkeit λ	Wärmedurchlasswiderstand R (d / λ)
	d in m	λ in $\text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$	R in $\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$
Betondecke	0,14	1,650 (siehe Anhang 19)	0,085
Mineralfaserdämmung (Glaswolle) (WLS 035)	0,32	0,035	9,142
Bautenschutzmatte aus Gummigranulat	0,006	0,14 (bausep GmbH o.J.g)	0,043

$$R_T = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} + 0,085 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} + 9,142 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} + 0,043 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} + 0,10 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$$

$$= \underline{9,41 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}}$$

$$U\text{-Wert} = 1 / 9,41 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$$

$$= \underline{0,106 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Energieeinsparung pro Jahr (Verbraucherzentrale NRW e.V. 2022)

Gegebene Werte:

U-Wert Ist-Zustand: $0,702 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$

U-Wert Variante 2: $0,106 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$

Temperaturunterschied der über 12 Monate zwischen Innen und Außen ausgleichlichen werden musste: 70 kWh (Dipl.-Ing. Bernd Eckstein 2013)

Fläche der Geschossdecke: $468,1 \text{ m}^2$

U-Wert-Differenz = $0,702 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K} - 0,106 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K} = 0,596 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$

Energieeinsparung = $0,596 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot 70 \text{ kWh} \cdot 468,1 \text{ m}^2$

= **19.529,13 kWh / a**

Auswirkung auf die Gebäudeenergieeffizienzklasse

Gegebene Werte:

Durchschnittlicher Endenergieverbrauch: $183.440 \text{ kWh} / \text{a}$

Energieeinsparung: $19.529,13 \text{ kWh} / \text{a}$

Nutzfläche: 2.293 m^2 (siehe Anhang 19)

Veränderter durchschnittlicher Endenergieverbrauch = $183.440 \text{ kWh} / \text{a} - 19.529,13 \text{ kWh} / \text{a}$

= **163.910,87 kWh / a**

Veränderter durchschnittlicher Endenergieverbrauch je $\text{m}^2 / \text{a} = 163.910,87 \text{ kWh} / \text{a} / 2.293 \text{ m}^2$

= **71,48 kWh / m^2 / a** → entspricht Gebäudeenergieeffizienzklasse B statt C (siehe Anhang 22)

CO₂-Einsparung pro Jahr

Gegebene Werte:

Energieeinsparung = 19.529,13 kWh / a

CO₂-Ausstoß von Fernwärme = 0,2 kg / kWh (co2online gemeinnützige Beratungsgesellschaft mbH 2022)

CO₂-Einsparung pro Jahr = 0,2kg/kWh * 19.529,13 kWh / a
= **3.905,82 kg/a (3,9 Tonnen)**

Energiekosteneinsparung (Verbraucherzentrale NRW e.V. 2022)

Gegebene Werte:

Energieeinsparung: 19.529,13 kWh / a

Sanierungszyklus: 30 Jahre

Fernwärme-Preis: 9,4 Cent

19.529,13 kWh / a * 0,094 € * 30 Jahre = **55.055 € nach 30 Jahren**

Anhang 12: Berechnungen Dachbegrünung: Variante 3

Geschossdecke

Gegebene Werte:

R_{es} mit $0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$

R_{si} mit $0,10 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ (aufwärts gerichteter Wärmestrom)

Bauteil	Durchmesser d	Wärmeleitfähigkeit λ	Wärmedurchlasswiderstand R (d / λ)
	d in m	λ in $\text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$	R in $\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$
Betondecke	0,14	1,650 (siehe Anhang 19)	0,085
Polystyrol-Flachdachdämmung (WLS 035)	0,16	0,035 (bausep GmbH o.J.b)	4,571
Wasserspeicherplatten aus Polystyrol (WLS 035)	0,05	0,035 (Paul Bauer GmbH & Co. KG o.J.)	1,428
Begrünung (wassergesättigt)	0,05	0,6 (LUMITOS AG o.J.)	0,083

$$R_T = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} + 0,085 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} + 4,571 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} + 1,428 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} + 0,083 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} + 0,10 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$$

$$= \underline{\underline{6,289 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}}}$$

$$\text{U-Wert} = 1 / 9,41 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$$

$$= \underline{\underline{0,159 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}}}$$

Energieeinsparung pro Jahr (Verbraucherzentrale NRW e.V. 2022)

Gegebene Werte:

U-Wert Ist-Zustand: $0,702 \text{ W} / \text{m}^2 * \text{K}$

U-Wert Variante 3: $0,159 \text{ W} / \text{m}^2 * \text{K}$

Temperaturunterschied der über 12 Monate zwischen Innen und Außen ausgeglichen werden musste: 70 kWh (Dipl.-Ing. Bernd Eckstein 2013)

Fläche der Geschossdecke: $468,1 \text{ m}^2$

U-Wert-Differenz = $0,702 \text{ W} / \text{m}^2 * \text{K} - 0,159 \text{ W} / \text{m}^2 * \text{K}$

= $0,543 \text{ W} / \text{m}^2 * \text{K}$

Energieeinsparung = $0,543 \text{ W} / \text{m}^2 * \text{K} * 70 \text{ kWh} * 468,1 \text{ m}^2$

= **17.792,48 kWh / a**

Auswirkung auf die Gebäudeenergieeffizienzklasse

Gegebene Werte:

Durchschnittlicher Endenergieverbrauch: $183.440 \text{ kWh} / \text{a}$

Energieeinsparung: $17.792,48 \text{ kWh} / \text{a}$

Nutzfläche: 2.293 m^2 (siehe Anhang 19)

Veränderter durchschnittlicher Endenergieverbrauch = $183.440 \text{ kWh} / \text{a} - 17.792,48 \text{ kWh} / \text{a}$

= **165.647,52 kWh / a**

Veränderter durchschnittlicher Endenergieverbrauch je $\text{m}^2 / \text{a} = 165.647,52 \text{ kWh} / \text{a} / 2.293 \text{ m}^2$

= **72,24 kWh / m² / a** → entspricht Gebäudeenergieeffizienzklasse B statt C (siehe Anhang 22)

CO₂-Einsparung pro Jahr

Gegebene Werte:

Energieeinsparung = 17.792,48 kWh / a

CO₂-Ausstoß von Fernwärme = 0,2 kg / kWh (co2online gemeinnützige Beratungsgesellschaft mbH 2022)

CO₂-Einsparung pro Jahr = 0,2 kg / kWh * 17.792,48 kWh / a

= **3.558,49 kg/a (3,56 Tonnen)**

Energiekosteneinsparung (Verbraucherzentrale NRW e.V. 2022)

Gegebene Werte:

Energieeinsparung: 17.792,48 kWh / a

Sanierungszyklus: 40 Jahre

Fernwärme-Preis: 9,4 Cent

17.792,48 kWh / a * 0,094 € * 40 Jahre = **66.900 € nach 40 Jahren**

Anhang 13: Berechnungen Baumrigolen-Systeme: Variante 4

CO₂-Bindung (EcoTree o.J., Stiftung Unternehmen Wald o.J.)

- Zusammensetzung des Baumes bzw. des Holzes: 50 % Trockenmasse und 50 % Wasser; 47,5 % der Trockenmasse aus Kohlenstoff
- CO₂ (Kohlenstoffdioxid) besteht aus Sauerstoff „O₂“ (molare Masse von 16) und Kohlenstoff „C“ (molare Masse von 12)
- 1 Kohlenstoff-Molekül (12) + 2 Sauerstoffmoleküle (32) = Kohlenstoffdioxid (44)
- bei der Photosynthese wird CO₂ aufgenommen, Kohlenstoff gespeichert und Sauerstoff freigesetzt
- für die Ermittlung der CO₂-Menge, die aufgenommen wird, muss das Verhältnis der molaren Masse von CO₂ und Kohlenstoff ermittelt werden
- Massen-Verhältnis von Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoff → $44 / 12 = 3,67$

Gegebene Werte:

Darrdichte Weißdorn: 0,84 g / cm³ (840 kg / m³) (Michael Finger 2009)

Alter bis zu 100 Jahre (Ifl o.J.)

Festmeter Holz: 3 m³

Gewicht des Kugel-Weißdorns:

Festmeter * Darrdichte → $3 \text{ m}^3 * 840 \text{ kg} / \text{m}^3 = 2.520 \text{ kg} (2,52 \text{ t})$

Kohlenstoffgehalt des Kugel-Weißdorns:

$2.520 / 2 = 1.260 \text{ kg Wasser und } 1.260 \text{ kg Trockenmasse}$

47,5 % der Trockenmasse (1.260 kg) sind gespeicherter Kohlenstoff →
598,5 kg Kohlenstoff

CO₂-Bindung des Kugel-Weißdorns:

$598,5 \text{ kg} * 3,76 = 2.196,5 \text{ kg CO}_2$ in einem Alter von 100 Jahren

→ jährliche CO₂-Bindung → $2.196,5 \text{ kg CO}_2 / 100 \text{ Jahre} = \underline{21,96 \text{ kg} / \text{a}}$

Anhang 14: Berechnungen tatsächliche CO₂-Einsparung (Variante 1 und 3)

- berechnet nach Drewer et al. 2013, S. 127

Variante 1 (Fassadendämmung)

Gegebene Werte:

Fläche Fassaden: 1173 m²

Verwendeter Dämmstoff: Polystyrol (WLS 035)

Dämmstärke: 20 cm

Dichte Rohbenzin: 0,75 kg / m³

Energiedichte: 11,5 kWh / kg

- Verbesserung des U-Wertes von 0,671 W / m² * K auf 0,138 W / m² * K
→ entspricht einer Energieeinsparung von 43.765 kWh / a bzw. 37 kWh / m² / a

- $1.173 \text{ m}^2 * 0,2 \text{ m} = 234,6 \text{ m}^3$ Polystyrol wird benötigt
- $234,6 \text{ m}^3$ Polystyrol entsprechen $234,6 \text{ m}^3 * 43 \text{ l} / \text{m}^3 = 10.088 \text{ l}$ Rohbenzin
- 10.088 l Rohbenzin entsprechen $7.566 \text{ kg} * 11,5 \text{ kWh} / \text{kg} = 87.009 \text{ kWh}$ Wärmeenergie
- Energieeinsparung durch Dämmmaßnahme beträgt $37 \text{ kWh} / \text{m}^2 / \text{a} * 1.173 \text{ m}^2 = 43.765 \text{ kWh} / \text{a}$
- $87.009 \text{ kWh} / 43.765 \text{ kWh} / \text{a} = \underline{\underline{1,9 \text{ Jahre bzw. 23 Monaten}}}$

→ nach 23 Monaten entspricht die eingesparte Heizenergiemenge der Energie, die für Herstellung des Polystyrols eingesetzt wurde, d.h. das Polystyrol ist nach 23 Monaten energetisch amortisiert

Variante 3 (Dachbegrünung)

Gegebene Werte:

Fläche Geschossdecke: 468,1 m²

Verwendeter Dämmstoff: Polystyrol (WLS 035)

Dämmstärke: 16 cm

Dichte Rohbenzin: 0,75 kg / m³

Energiedichte: 11,5 kWh / kg

- Verbesserung des U-Wertes von 0,702 W / m² * K auf 0,159 W / m² * K
→ entspricht einer Energieeinsparung von 17.792 kWh / a bzw. 38 kWh / m² / a

- $468,1 \text{ m}^2 * 0,16 \text{ m} = 234,6 \text{ m}^3$ Polystyrol wird benötigt
- 75 m³ Polystyrol entsprechen $75 \text{ m}^3 * 43 \text{ l} / \text{m}^3 = 3.225 \text{ l}$ Rohbenzin
- 3.225 l Rohbenzin entsprechen $2.419 \text{ kg} * 11,5 \text{ kWh} / \text{kg} = 27.820 \text{ kWh}$ Wärmeenergie
- Energieeinsparung durch Dämmmaßnahme beträgt $38 \text{ kWh} / \text{m}^2 / \text{a} * 468,1 \text{ m}^2 = 17.792 \text{ kWh} / \text{a}$
- $27.820 \text{ kWh} / 17.792 \text{ kWh} / \text{a} = \underline{\underline{1,6 \text{ Jahre bzw. 19 Monaten}}}$

→ nach 19 Monaten entspricht die eingesparte Heizenergiemenge der Energie, die für Herstellung des Polystyrols eingesetzt wurde, d.h. das Polystyrol ist nach 19 Monaten energetisch amortisiert

Die folgenden Anhänge befinden sich in digitaler Form auf der beigelegten CD oder können mit dem QR-Code aufgerufen werden:

Anhang 15*: Bauzustandsbeschreibung des ehemaligen „Am Mönchhof 22-28“

Anhang 16*: Kostenübersicht für Sanierungsmaßnahmen 2006

Anhang 17*: Karte mit Abmessungen „Am Mönchhof 22-28“

Anhang 18*: Ansichtspläne „Am Mönchhof 22-28“

Anhang 19*: Energetischer Ist-Zustand 2005

Anhang 20*: Darstellung des Höhenversatzes „Am Mönchhof 22-28“

Anhang 21*: Rahmenplanung Tabarz „Am Mönchhof“

Anhang 22*: Energieausweis „Am Mönchhof 22-26“

Anhang 23*: Lageplan „Am Mönchhof 22-26“ mit Katasterübersicht

Anhang 24*: Beschreibung der Modernisierungsmaßnahmen und entsprechenden Kosten 2005

Anhang 25*: Bauzustandsbeschreibung mit Sanierungsmaßnahmen

Anhang 26: Nicht maßstabsgetreue Darstellung der Baumrigolen-Systeme (Variante 4) (Eigene Darstellung)

Anhang 27: 3D-Darstellung des Gebäudes nach möglicher Umsetzung von Dachbegrünung und Baumrigolen-Systemen (Variante 3 und 4) (Eigene Darstellung)

* zur Verfügung gestellt von der WSG Waltershausen eG



Schriftliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer kommerziellen Beratung in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Tätigkeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Arbeit stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form eingereicht und ist als Ganzes auch noch nicht veröffentlicht worden.

Nordhausen, den 02.03.2023

Tamina Elisa Weber

43783