

Zukunftsfähige Fassadensysteme im geförderten Wohnbau

Studie

zur lebenszyklusorientierten Bewertung
gebräuchlicher Fassadensysteme
nach ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten

Förderer:

Land Steiermark-Wohnbauforschung
Landesinnung Baugewerbe Steiermark
GBV Steiermark
ZT-Kammer Steiermark u. Kärnten, Sektion Architekten

Graz, im Dezember 2021

Verfasser:

Univ.-Prof. DI Dr. Peter Maydl
Zivilingenieur für Bauwesen
Unternehmensberater für F&E
Rechbauerstraße 61
8010 Graz
<https://zt-maydl.at>

unter Mitwirkung von

Nussmüller Architekten ZT GmbH
Dipl.-Ing. Werner Nussmüller
Zinzendorfsgasse 1
8010 Graz
www.nussmueller.at

Dezember 2021

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Anlaß und Ziele | 1 |
| 1.1 | Auf europäischer Ebene | 1 |
| 1.2 | Auf nationaler Ebene | 2 |
| 2 | Aktuelle Entwicklungen und Trends im Hochbau | 3 |
| 3 | Vorgangsweise und Aufbau der Studie | 3 |
| 4 | Stand der Forschung und Literaturübersicht..... | 4 |
| 5 | Anforderungen an Fassadensysteme | 16 |
| 5.1 | Aufgaben von Fassaden | 16 |
| 5.2 | Daraus resultierende Anforderungen..... | 17 |
| 6 | In die Untersuchung einbezogene Fassadensysteme | 19 |
| 7 | Eigenschaften der untersuchten Fassadensysteme | 20 |
| 7.1 | Umweltwirkungen | 20 |
| 7.1.1 | Grundsätzliches zur Bewertung der Umweltwirkungen von Bauprodukten und Gebäuden .. | 20 |
| 7.1.2 | Zur möglichen Anwendung des Bewertungskonzepts auf Fassaden | 21 |
| 7.2 | Kreislauffähigkeit..... | 27 |
| 7.3 | Dauerhaftigkeit und Lebensdauer | 30 |
| 7.4 | Schadensanfälligkeit | 31 |
| 7.5 | Wirtschaftlichkeit und Lebenszykluskosten..... | 32 |
| 7.5.1 | Annahmen und Datengrundlagen..... | 32 |
| 7.5.2 | Zu Grunde gelegte Wartungs- und Instandsetzungsszenarien | 34 |
| 7.5.3 | Angenommene Herstellungs- und Folgekosten..... | 36 |
| 7.5.4 | Barwertermittlung für die einzelnen Fassadensysteme | 37 |
| 8 | Fazit, Ausblick und zusammenfassende Bewertung | 39 |
| 8.1 | Fazit..... | 39 |
| 8.2 | Schlußfolgerungen und Ausblick | 40 |
| 8.3 | Zusammengefaßte Bewertung (Bewertungsmatrix) | 40 |

1 Anlaß und Ziele

Der Bausektor insgesamt und hier insbesondere der Hochbau ist aktuell einem erheblichen Veränderungsdruck unterworfen: einerseits zwingen Entwicklungen wie Digitalisierung, temporär und sektoriell stark steigende Preise zur Optimierung von Planungs- und Bauprozessen, andererseits verlangen äußere Einflüsse wie Klimawandel, Rohstoffverknappung und Abfallaufkommen zu einem Umdenken und zur Abkehr von bisherigen Gewohnheiten, um nur die wichtigsten Einflußfaktoren zu nennen. Die notwendigen Folgen sind Lebenszyklusorientierung von Planungsentscheidungen sowie die gleichzeitige Betrachtung der Auswirkungen von Baumaßnahmen auf ökologischer, ökonomischer und soziokultureller Ebene.

Diese Entwicklung macht auch nicht vor dem Wohnbau halt, im geförderten Wohnbau wird auf ökonomischer Ebene der Druck noch weiter erhöht durch die Forderung, daß Wohnen nicht nur hohen Ansprüchen genügen soll, sondern auch noch leistbar bleiben muß.

Im geförderten Wohnbau stellen nach wie vor die Herstellungskosten das entscheidende Kriterium für die Auswahl von Bausystemen dar, so auch bei der Wahl der Fassadenbekleidung. Die Fokussierung ausschließlich auf den Preis ist im Kontext einer nachhaltigen Entwicklung nicht mehr länger aufrecht zu erhalten. Auch im Regierungsübereinkommen ist eine verstärkte Zuwendung zum Bestbieterprinzip unter Berücksichtigung ökologischer Aspekte vorgesehen, sodaß in Zukunft gefordert wird, auch Fassadensysteme ganzheitlich über den gesamten Lebenszyklus zu betrachten.

Ziel der vorliegenden Studie ist es daher, aufbauend auf in jüngster Zeit publizierten Studien und Forschungsarbeiten (insbesondere [3] und [4]), Planern und Bauträgern sowie Förderungsstellen objektive, belastbare und leicht überblickbare Informationen über die im geförderten Wohnbau gebräuchlichen Fassadensysteme bereitzustellen und deren Stärken und Schwächen lebenszyklusorientiert und ganzheitlich zu analysieren. Vor allem die Betrachtung der Umweltwirkungen von Fassadensystemen rückt die Wahl des Dämmmaterials wieder in den Fokus, zumal heute bei Fassadendämmungen durchwegs Dämmstoffdicken jenseits der 15cm zur Ausführung kommen. Das bedeutet, daß nur Massendämmstoffe, die industriell in großen Mengen und preisgünstig hergestellt werden können, für Fassadendämmungen im geförderten Wohnbau in Frage kommen, die alle ihre Vor-, aber auch Nachteile in ökologischer Hinsicht aufweisen.

Die Studie ist auf Initiative der Steiermärkischen Landesregierung zustande gekommen, wobei sich an der Finanzierung auch die Bundesinnung Baugewerbe, die Sektion Architekten der Kammer der Ziviltechniker für Steiermark und Kärnten sowie der Verband Gemeinnütziger Bauvereinigungen – Landesgruppe Steiermark beteiligt haben.

Aus den o.a. Entwicklungen resultieren politische Intentionen und Strategien, die auch die rechtlichen Rahmenbedingungen und auch den Wettbewerb auf den verschiedensten Ebenen des Bausektors beeinflussen, schwerpunktmäßig auf europäischer Ebene. Auch das Programm der aktuellen Bundesregierung setzt hier neue Schwerpunkte, um eine nachhaltige Entwicklung auch im Bausektor voranzutreiben. Daher werden im Folgenden einige wesentliche Ansatzpunkte wiedergegeben, die die Rahmenbedingungen für das Bauen jetzt und in naher Zukunft beeinflussen und verändern werden:

1.1 Auf europäischer Ebene

Nachhaltige Entwicklung ist seit 2006 immaterieller Bestandteil der Europäischen Union und auch in der Strategie Europa 2020 enthalten, weshalb in den letzten 15 Jahren zahlreiche Strategien und

Fahrpläne entstanden sind, die auch in die entsprechenden rechtlichen Rahmenbedingungen wie Richtlinien und Verordnungen eingeflossen sind. Die europäische Ebene war daher auch immer der Treiber der Entwicklung zu mehr Nachhaltigkeit in allen Wirtschaftsbereichen. Einige Beispiele aus jüngster Zeit verdeutlichen dies:

- Klimaziele und Klima: u.a. Klimaneutralität bis 2050, Reduktion der Treibhausgasemissionen (THG) um 55% gegenüber 1990 bis 2030, EU-weiter Zielpfad 2030 bis 2050 und nationale Anpassungsstrategien, Emissionshandel und Klimaschutzverordnung (alles in Übereinstimmung mit dem „Green Deal“),
- „Green Deal“: neue Industriepolitik zur Unterstützung des grünen Wandels mit den Schwerpunkten auf Klimaneutralität, Dekarbonisierung und Kreislaufwirtschaft, wobei der Bausektor als einer von 4 ressourcenintensiven Wirtschaftssektoren identifiziert wurde,
- EU Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft: z.B. Kreislaufführung von Bauprodukten inkl. Wiederverwendung (reuse), Lebenszyklusdenken, Qualitätssicherung von Recyclingbaustoffen, Materialpaß für Gebäude,
- Künftige Bauprodukteverordnung: Diskussionsprozeß seit 2019, neben offenen Fragen zum Rechtsrahmen (Aquis, div. EuGH-Urteile) Neufassung der Grundanforderung 7 (bisher: nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen: Rezyklierbarkeit, Dauerhaftigkeit, umweltverträgliche Rohstoffe und Sekundärbaustoffe)
- New European Bauhaus: ein auf Initiative der Europäischen Kommission entstandene kreative Bewegung, die „eine Verbindung zwischen dem Green Deal und unseren Lebensräumen“ herstellen will, die allerdings erst am Beginn steht.
- Europäische Normung: seit 15 Jahren wird ein umfassendes Regelwerk für nachhaltiges Bauen auf Basis eines Mandats der Europäischen Kommission mit einem harmonisierten Bewertungsrahmen auf ökologischer, ökonomischer und sozialer Ebene entwickelt, sowohl für Gebäude als auch für Ingenieurbauwerke.

1.2 Auf nationaler Ebene

Während in Österreich beim Thema „Nachhaltige Entwicklung“ vornehmlich europäische Aktivitäten und Vorgaben nachvollzogen werden, wurden mit dem Programm „Mission2030“ der letzten Bundesregierung sowie insbesondere mit dem aktuellen Regierungsübereinkommen auch deutliche Akzente gesetzt, wie eine nachhaltige Entwicklung, auch im Baubereich umgesetzt werden kann. Einige, den Bausektor betreffende Beispiele sind

- Umweltschonendes Bauen als Voraussetzung für die Wohnbauförderung, sozialer Ausgleich und ökologische Effizienz
- Ökosoziale Kriterien in der Beschaffung, Bestbieter- statt Billigstbieterprinzip,
- Klimaschutzorientierte Energieraumplanung
- Ein „Green Deal“ für Österreichs Wirtschaft, sektorübergreifende Klima- und Kreislaufwirtschaftsstrategie
- Forcierung erneuerbarer Rohstoffe
- Kreislaufwirtschaft fördern und Abfallpolitik gestalten: Maßnahmenpaket für den Einsatz von Sekundärrohstoffen bei Industrie, Verpackung und Baustoffen

Sobald mehr Klarheit über eine neue Grundanforderung 7 in der künftigen Bauprodukteverordnung herrscht, wird auch eine künftige OIB-Richtlinie⁷ zu entwickeln sein.

2 Aktuelle Entwicklungen und Trends im Hochbau

Wie eingangs erwähnt, unterliegt der Bausektor und hier vor allem der Hochbau aktuell erheblichen Veränderungen. Dabei ist nicht immer klar zwischen einerseits markt-getriebenen und andererseits politikgetriebenen Änderungen der rechtlichen Rahmenbedingungen zu unterscheiden. Zur besseren Übersicht wird in der folgenden Darstellung der Literatur folgend, aber letzten Endes willkürlich eine Strukturierung aktueller Entwicklungen im Hochbau vorgenommen:

Tab. 1: Aktuelle Entwicklungen im Hochbau

| | Thematische Bereiche | Trends im Detail |
|---------------------------------|---|---|
| Gesellschaft | neue Wohn- und Arbeitsbedürfnisse | flexibles Wohnen und Arbeiten inkl. Homeoffice, Mikroapartments |
| | Steigendes Anspruchs- und Qualitätsniveau | Steigende Konsumentenwünsche, steigende Anforderungen |
| Regelwerk: rechtlich, technisch | Baugesetze, OIB-Richtlinien, Bauproduktverordnung, Endenergieeffizienzrichtlinie, zunehmend unübersichtliches Regelwerk | Energieraumplanung, Energieautarkie, Anteil erneuerbare Energie., Kreislaufbewußtsein |
| | Ausschreibung und Vergabe | Ökosoziale Kriterien, gleichwertige Sekundärbaustoffe (qualitätsgesichert) |
| Wirtschaftlichkeit | Steigende Rohstoff- und Baupreise | Leistbares Wohnen |
| | Steigende Wohnkosten bei stagnierenden Einkommen | Fokus auf Lebenszykluskosten |
| Umwelt | Steigendes Bewußtsein für Klimaschutz, Energieeffizienz, Recycling | Bauen für den Klimawandel, sommerlicher Wärmeschutz ohne Klimaanlage |
| | Umweltinformationen zu Bauprodukten schwer zu vermitteln (B2B schwierig, B2C nahezu unmöglich) | Steigendes Informationsbedürfnis der Konsumenten |
| | Lebenszyklusorientierung | Vorausschau auf künftige eigene Bedürfnisse schwierig |
| | Bodenversiegelung | |
| | Gesundes Wohnen | Schadstoff- und Chemikalienmanagement |
| Organisation und Prozesse | idR Einzelplanervergabe | Integrale Planung |
| | Digitalisierung und BIM | Gebäudedokumentation |
| | Zunehmende Bedeutung der Projektentwicklung | Bedarfsplanung, Standortvergleiche |

3 Vorgangsweise und Aufbau der Studie

Wie bereits in Abschnitt 1 ausgeführt, soll mit der vorliegenden Studie, aufbauend auf den Erkenntnissen aus [3] und [4] ein praxistauglicher Bewertungsrahmen zur Auswahl geeigneter Fassadensysteme unter den von Projekt zu Projekt verschiedenen Randbedingungen erstellt werden, der die aktuellen Anforderungen nachhaltigen Bauens beinhaltet. Dazu zählen neben der Betrachtung

über den gesamten Lebenszyklus u.a. Kosten, Umweltwirkungen, Kreislauffähigkeit sowie Wartung und Instandhaltung.

Da zu den einzelnen Systemen in der Praxis mitunter höchst unterschiedliche Ansichten bestehen, wurden zunächst aktuelle Entwicklungen und Trends analysiert sowie die Rahmenbedingungen auf nationaler und europäischer Ebene beleuchtet. Anschließend erfolgte eine umfangreiche Recherche, um den Stand des Wissens (und nicht nur der Technik) auszuloten, um vorherrschende Meinungen zu verifizieren oder auch zu falsifizieren.

In der Folge wurden aktuelle und künftig wichtige Anforderungen an Fassaden im Wohnbau definiert, gebräuchliche Systeme und Aufbauten identifiziert und in weiterer Folge ein Bewertungsmodell entwickelt, das Auftraggebern und Planern ermöglicht, das für das jeweilige Projekt optimale System auszuwählen. Herstellungskosten bzw. Preise wurden mit Architekturbüros und Bauträgern aktualisiert, ebenso der Aufwand für Reinigung, Wartung und Instandhaltung. Neben einem Rechenschema zur Ermittlung der Lebenszykluskosten von Fassaden nach der Barwertmethode und Vergleich unterschiedlicher Varianten bei variablen Zinssätzen und Preissteigerungsraten wird eine praxisorientierte Bewertungsmatrix vorgestellt (jeweils im Anhang).

4 Stand der Forschung und Literaturübersicht

Zum Thema „Fassaden“ gibt es mittlerweile eine kaum überschaubare Fülle an Literatur, seien es in Form von wissenschaftlichen Publikationen in Fachmedien, Forschungsberichten oder auch nur Informationsschriften von Systemerzeugern oder Interessensvertretungen. Dies dürfte u.a. auch dem Umstand geschuldet sein, daß neben der technischen Gebäudeausrüstung die meisten Innovationen im Bereich der Fassade stattfinden bzw. im Zusammenwirken von TGA und Fassade. Die höchsten Anforderungen werden allerdings im Büro- und Verwaltungsbau, im Industriebau und im Bereich von Sonderbauten gestellt, weshalb dort der höchste Innovationsdruck herrscht. Der Wohnbau ist davon nur am Rande betroffen, weshalb – nicht zuletzt aus Kostengründen – hier nur vergleichsweise wenige Systeme zur Anwendung kommen. Im Wohnbau geht es im Wesentlichen um monolithische verputzte Fassaden, WDVS und - in Einzelfällen - hinterlüftete Fassaden mit unterschiedlichen Bekleidungs-materialien. Andere Systeme sind - jedenfalls im geförderten Wohnbau - aufgrund der engen Grenzen der Herstellungskosten – nicht machbar.

In der folgenden Literaturlauswertung wird versucht, einen kurzen und kompakten Überblick über den Stand des Wissens zu jenen Fassadensystemen zu geben, die im Wohnbau häufig angewendet werden – ohne Anspruch auf Vollständigkeit, Stand 1. Halbjahr 2021. Zunächst werden einige Arbeiten behandelt, die einen eher umfassenden Blick versuchen, weiters solche, die sich mit Fragen der Lebensdauer einzelner Systeme bzw. deren Komponenten befassen wie z.B. Dämmstoffe. Der Dauerhaftigkeit von Holz sowie seinen Farbveränderungen sind einige Beiträgen gewidmet, die mit Abstand höchste Zahl an Publikationen findet sich zu Wärmedämmverbundsystemen (WDVS). Dabei geht es hauptsächlich um Schäden, mögliche Lebensdauer, Rezyklierbarkeit, Brandschutz bzw. Flammenschutzmittel sowie die notwendige Wartung und Instandhaltung – also jene Eigenschaften von WDVS, die in der Fachwelt diskutiert werden bzw. umstritten sind.

Grundsätzlich ist zu sagen, daß es sich bei allen diesen Fassadensystemen um technisch ausgereifte, seit Jahrzehnten im Einsatz befindliche und damit bewährte Systeme handelt. Allerdings ist auch zu bedenken, daß die Anforderungen an das Bauen insgesamt, an Fassaden im Speziellen, immer weiter verschärft werden. Man denke nur an die seit über 4 Jahrzehnten zunehmenden Dämmstoffdicken aufgrund verschärfter Wärmeschutzvorschriften oder an neuere Forderungen wie Kreislauffähigkeit, Emissionsarmut etc., die bei ganzheitlicher, lebenszyklusorientierter Betrachtung Systeme an ihre

Grenzen bringen können. Seitens der Erzeuger wird daher versucht, die Stärken ihres Systems mitunter auch losgelöst von anderen Eigenschaften in den Vordergrund zu stellen, was sich manchmal auch in Publikationen und beauftragten Forschungsarbeiten widerspiegelt. Lebenszyklusweite und ganzheitliche Betrachtungen von Bauprodukten, Bauteilen oder gar ganzen Bauwerken (hier nur: Gebäuden) sind eine neue Herausforderung für alle Beteiligten.

Allgemeine Betrachtungen:

[1] gibt einen Überblick über allgemeine Aufgaben von Fassaden, Anforderungen sowie technischen Details zu gängigen Systemen, von konventionellen Putzfassen über WDVS, leichten und massiven Wandbekleidungen bis zu Glasfassaden inkl. Materialangaben und hochbaukonstruktiven Details. Die Herausforderungen und Möglichkeiten künftiger Gebäudehüllen beschreibt [2], ebenso die konzeptionellen und funktionalen Aspekte zukunftsfähiger Gebäudehüllen. Diese Überlegungen sind derzeit jedoch nur sehr eingeschränkt auf den geförderten Wohnbau übertragbar. Ausführlich mit der projektspezifischen Problematik beschäftigt hat sich Hasler in [3] und [4] als Fortsetzungsstudie, deren Ergebnisse im Folgenden näher zusammengefaßt werden. Auf diesen Erkenntnissen baut die gegenständliche Arbeit auftragsgemäß auf:

Ausgangspunkte der Studie war die seit langem diskutierte Tatsache, daß bei der Entscheidung über ein Fassadensystem bisher fast nur die Errichtungskosten berücksichtigt wurden. Dies hat dazu geführt, daß insbesondere im geförderten Wohnbau zumeist WDVS mit EPS als Dämmmaterial zur Ausführung gelangt sind, da dies die niedrigsten (Errichtungs-)Kosten aufweisen. Der zunehmende Stellenwert von Lebenszyklusbetrachtungen auch im Bauwesen hat u.a. diese Studie initiiert.

Ziel der Studie [3] war ein detaillierter Überblick über häufig auftretende Mängel und Schäden von Fassadensystemen. Die Ergebnisse der Basisstudie sollten aufzeigen, auf welche Weise sich im Wohnbau übliche Fassaden im Lebenszyklus verändern und zu welchem Zeitpunkt welche Maßnahmen der Reinigung bzw. Instandsetzung erforderlich sind. Es wurden insgesamt 106 Objekte an 31 Standorten in der Steiermark untersucht, sowohl Neubauten als auch thermisch sanierte Objekt. Von den untersuchten Objekten waren 75% WDVS, 8% monolithische und 17% vorgehängte, hinterlüftete Fassaden. Zuletzt wurden keine monolithischen Fassaden mehr ausgeführt. Die Dämmstoffdicken lagen bei 8 bis 10cm bei WDVS mit Mineralwolle, bei 12 bis 14cm bei Verwendung von EPS.

Nur bei wenigen Objekten wurden Mängel festgestellt, die auf eine fehlerhafte Ausführung schließen lassen. Die Ausführungsqualität wird von den Auftraggebern häufig kontrolliert. Kritisch wird der Sockelbereich gewertet, der ja der am stärksten beanspruchte Teil der Fassade ist. Lösungen mit WDVS weisen auch oft nach kurzer Zeit Schäden auf, weshalb diese Konstruktionsweise nicht empfohlen wird.

Zu typischen Schadensbildern von Fassaden werden Risse gezählt, bei WDVS systematische Risse in der untersten Plattenreihe sowie unterhalb von Fensterbänken, bei monolithischen Fassaden im Bereich der Decken- und Sturzaufleger. Festgehalten wird auch, daß Reparaturen von WDVS immer sichtbar bleiben und Risikostellen für das Eindringen von Feuchtigkeit darstellen. Die häufigste Beeinträchtigung von WDVS-Fassaden ist der Befall durch mikrobiellen Bewuchs („Veralgung“). Die kann – standortabhängig – bereits nach wenigen Jahren auftreten, ohne den technischen Zustand zu gefährden. Mit zunehmender Dämmstoffdicke steigt auch die Wahrscheinlichkeit der Veralgung. Ein Schlagregenschutz etwa durch ein Vordach verringert die Wahrscheinlichkeit des Auftretens, ebenso die Verwendung von Mineralwolle als Dämmstoff wegen der größeren Masse. Bei Holzfassaden besteht das (rein optische) Problem der unterschiedlichen Vergrauung, was ebenfalls durch einen Schlagregenschutz (z.B. Vordach) günstig beeinflusst werden kann. Recycling und Verwertung (im Sinne

von Reuse?) werden als unzureichend und wenig nachhaltig eingestuft, da zum Großteil die energetische Verwertung praktiziert wird. EPS mit HBCD als Flammenschutzmittel verschärfen die Problematik.

Bei der Ergänzungsstudie [4] lag der Fokus auf der Betrachtung vollständiger Außenwandkonstruktionen. D.h., unterschiedliche Rohbausysteme wurden mit unterschiedlichen Fassadensystemen kombiniert inkl. zweier monolithischer Außenwandssysteme. Es wurde von einer Gesamtbestandsdauer von 80 Jahren ausgegangen, die Lebensdauer von WDVS (EPS/MW) wurde mit 30 Jahren angenommen, jene von hinterlüfteten Fassaden mit 40 Jahren, was für WDVS einen zusätzlichen Austausch bedeutet. Liegen die Herstellungskosten von vorgehängten, hinterlüfteten Fassaden deutlich über allen anderen, schneiden sie bei Betrachtung der Lebenszykluskosten deutlich besser ab als WDVS-Fassaden. Als kostengünstigste (LZK) Varianten erwiesen sich die monolithischen Systeme, gefolgt von den vorgehängten, hinterlüfteten Fassaden mit einer Holzbekleidung, die als wartungsfrei angenommen wurde. Vergleichsweise geringe Nutzungskosten entstehen auch bei der Faserzement- und der Metallfassade.

Fazit: die alleinige Betrachtung der Herstellungskosten stellt keine ausreichende Entscheidungsgrundlage für die Auswahl von Fassadensystemen dar. Nur durch Einbeziehung der Folgekosten mit Reinigung, Rückbau und Entsorgung (Anm.: sowie Wartung und Instandhaltung) erhält man eine zuverlässige Entscheidungshilfe (hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit von Fassadensystemen).

Eine Arbeitsgruppe innerhalb der ÖGNI – Österr. Gesellschaft für nachhaltige Immobilienwirtschaft hat sich mit der Fassade der Zukunft auseinandergesetzt mit dem Ziel, ein Positionspapier zu erarbeiten, das Denkanstöße und Lösungsansätze beinhaltet und in einem neuen Bild der Fassaden aufzeigen soll, womit den künftigen Herausforderungen begegnet werden kann [7]. Drei Faktoren beeinflussen demnach die Architektur: Klimaschutz, Klimawandel und Ressourcenschonung. Bei den Anforderungen an die Fassade werden 5 Themenbereiche („Positionen“) unterschieden: Gebäudeform und -hülle aus Architektursicht, Materialerfordernisse und Lebensdauer, Nutzeranforderungen, Erbringung von Mehrwert sowie Quartiers- und Standortentwicklung, die dann näher beleuchtet werden. Die neuen Funktionen der Energiegewinnung durch die Fassade verlangen eine umfassende Erneuerung/Adaptierung und können eine rechtliche Abkopplung der Fassade vom Gebäude erfordern. Weiters wird darauf hingewiesen, daß bei Veränderung allgemeiner Teile des Hauses (also auch der Fassade) alle Miteigentümer zustimmen müssen sowie auf den „dynamischen Erhaltungsbegriff“ im Sinne des MRG. Zum Thema Lebensdauer wird ausgeführt, daß die Lebensdauer der einzelnen Materialien von der gesamten Bauteilkonstruktion abhängt und sich die Nutzungsdauer nach den Bauteilen mit der geringsten Nutzungsdauer richtet. In diesem Zusammenhang wird der Begriff „Schicksalsgemeinschaft von Bauteilen“ geprägt [7], [18].

In einer umfassenden Studie der TU Kaiserslautern [9] wurden zeitgemäße monolithische Wandaufbauten hinsichtlich ihrer bauphysikalischen, ökologischen und ökonomischen Eigenschaften untersucht, deren Ergebnisse aufgrund des Umfangs hier nicht in komprimierter Form wiedergegeben werden können. Einige Aussagen sind jedoch auch für die vorliegende Studie von Interesse (Fazit, S. 134, 135): *Bezüglich der sieben bilanzierten Umweltwirkungen (emissionsbasierte Indikatoren, PEnr, Flächenbedarf) treten zum Teil deutliche Unterschiede auf. Monolithische Aufbauten weisen gegenüber mehrschichtigen Konstruktionen durchgängig geringere oder ähnliche Umweltauswirkungen auf. Das größte Einsparpotential liegt für die meisten Indikatoren bei der Wärmeversorgung, die je nach Variante und Indikator 40 bis 80 % der Umweltauswirkungen ausmacht. Nur das Versauerungspotential weist mit einem Korrelationskoeffizient r nach Bravais-Pearson von rd. 0,5 einen leicht linearen Zusammenhang mit den LZK auf. Die Flächeneffizienz – bezogen auf das in Anspruch genommene Bauland – liegt bei allen Varianten bei 228 %, nur bei Infraleichtbeton liegt diese mit 138 % deutlich niedriger.*

Bei der Bauteilbetrachtung streuen die Lebenszykluskosten (LZK) deutlich von rd. 150 bis 470€/m² Wandfläche, hauptsächlich aufgrund der zusätzlichen Dämmschicht in mehreren Varianten. Bei der Gebäudebetrachtung weisen die beiden Holzvarianten insgesamt die höchsten LZK auf (2.100 €/m²NuF), während alle anderen Varianten rd. 1.350 €/m²NuF erreichen. Somit liegen diese Kosten leicht bzw. unter den Kosten für das Referenzgebäude (Normalbeton + WDVS) von 1.357€/m²NuF. Die Kosten für Herstellung dominieren bei allen Varianten die LZK, während Kosten für Reinvest & Rückbau (22 %) Prüfung, Inspektion & Wartung (0,2 %) sowie Heizkosten (9 %) insgesamt mit weniger als einem Drittel zu den eng gefassten LZK beitragen.

*In [10] wurde eine Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden in Leicht- und Massivbauweise erstellt, um die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen am Beispiel eines Einfamilienhauses zu ermitteln: *Dadurch kann der Heizwärmebedarf in einer Größenordnung von 10 % verringert sowie eine sommerliche Überwärmung des Gebäudes stark reduziert werden. ... Die Vorteile der leichteren Holzbauweisen liegen vor allem in der Energieeinsparung bei der Herstellung und Errichtung des Gebäudes (graue Energie) sowie den geringeren Emissionen im Bereich. Die Ergebnisse zeigen ein vielversprechendes Potenzial der Hybridbauweise auf, das viele Vorteile der beiden Varianten vereint. So können in der Herstellung der Energieeinsatz und damit die Umweltbelastungen reduziert, aber auch der Heizwärmebedarf während des Betriebes gesenkt werden. Allgemein wurde bestätigt, dass eine Steigerung der Energieeffizienz eine Reduktion der Umweltauswirkungen im Lebenszyklus des Gebäudes zur Folge hat, weshalb diese anzustreben ist. Der energetische Mehraufwand bei der Herstellung, um eine erhöhte Effizienz des Gebäudes zu erreichen, wird typischerweise durch Einsparungen während der Nutzungsdauer bei den Parametern Primärenergieaufwand und Treibhausgaspotenzial deutlich überkompensiert. Ebenfalls lässt sich hierdurch der Wohnkomfort steigern, insbesondere durch eine geringe Überwärmung des Gebäudes im Sommer. Außerdem hat sich gezeigt, dass bei einer hohen Energieeffizienz die Wahl der Heizungstechnik eine untergeordnete Rolle spielt. Vor allem durch eine lange Nutzungsdauer kann der relative Primärenergiebedarf gesenkt und die Ökobilanz des Gebäudes verbessert werden. Daher sollte auf eine qualitativ hohe Ausführung und eine gründlich überdachte Planung des Gebäudes (z. B. mit variablen Grundrissen) für einen Nutzungszeitraum von 50 Jahren und mehr geachtet werden.**

*[11] behandelt das Thema Nachhaltigkeit auf Ebene der Wohnungswirtschaft, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen wird. Eine Feststellung aus der Zusammenfassung gilt sinngemäß auch für die vorliegende Studie: *..... wird empfohlen, Nachhaltigkeit nicht wie in der Vergangenheit als isoliertes bzw. zusätzliches Handlungsfeld zu betrachten, sondern es stärker als bisher in alle Entscheidungsabläufe und Geschäftsprozesse zu integrieren. Es zeichnet sich ab, dass Nachhaltigkeitsaspekte sich auf Finanzierungs- und Versicherungskonditionen, Art und Höhe von Förderungen sowie auf Wertermittlung und Bilanzierung auswirken können. Es wird empfohlen, diese Entwicklungen aktiv zu verfolgen und entstehende Möglichkeiten zu nutzen.**

Für eine nachhaltige Entwicklung ist die Sicherung des Grundbedürfnisses nach Bauen und Wohnen eine unverzichtbare Voraussetzung. Die Akteure und Unternehmen der Wohnungswirtschaft können und werden auch in Zukunft wesentliche Beiträge leisten und dabei ihre individuellen und institutionellen Ziele im Rahmen ihrer betriebswirtschaftlichen Interessen und Möglichkeiten mit denen der Gesellschaft in Übereinstimmung bringen. Für eine nachhaltige Entwicklung ist die Sicherung des Grundbedürfnisses nach Bauen und Wohnen eine unverzichtbare Voraussetzung. Die Akteure und Unternehmen der Wohnungswirtschaft können und werden auch in Zukunft wesentliche Beiträge leisten und dabei ihre individuellen und institutionellen Ziele im Rahmen ihrer betriebswirtschaftlichen Interessen und Möglichkeiten mit denen der Gesellschaft in Übereinstimmung bringen.

Lebenszykluskosten und Umweltwirkungen von Fassadensystemen im Industriebau stehen im Fokus von [12]. Eine Analyse derzeit anerkannter LCC- Und LCA-Methodiken schreibt deren Kompetenz im

Umgang mit einer einzelnen Bauteilgruppe. Darauf aufbauend wurde ein Evaluierungstool namens EEFA entwickelt, das Nutzer die Möglichkeit gibt drei konfigurierbare Fassaden auf deren Lebenszykluskosten und Umweltwirkungen vergleichend zu analysieren. Mit EEFA, Ecological Economic Facade Analysis werden für das Forschungsprojekt INFO exemplarisch die ökologischen und ökonomischen Lebenszyklus-Analysen durchgeführt und ausgewertet.... Die Ergebnisse im Detail sind jedoch nur eingeschränkt auf den Wohnbau übertragbar.

In [13] wurden 6 gängige Wandaufbauten eines fiktiven mehrgeschoßigen Wohnbaus untersucht und eine Ökobilanz erstellt sowie die Lebenszykluskosten (auf 80 Jahre gerechnet) ermittelt. In der ökobilanzielle Betrachtung hat das 38cm monolithische HLZ-Mauerwerk mit Mineralwolle-verfüllten Hohlräumen am besten abgeschnitten, bei den Lebenszykluskosten das 25cm HLZ-Mauerwerk mit WDVS als Wärmedämmung und Außenhaut. Bei Anwendung der Barwertmethode wird darauf hingewiesen, daß weit in der Zukunft anfallende Kosten wie z.B. die Rückbau- und Entsorgungskosten aufgrund der Abzinsung nicht ins Gewicht fallen.

Eine ebenso umfassende wie detaillierte Untersuchung der Lebenszykluskosten von vorgehängten, hinterlüfteten Fassaden (VHF) im Vergleich mit WDVS findet sich in [14]. Dabei wurden verschiedenen Szenarien untersucht, insbesondere der Einfluß der angenommenen Nutzungsdauer. Demnach verlieren die Herstellungskosten erheblich an Bedeutung, wenn der Aufwand für Wartung, Instandhaltung und gegebenenfalls Austausch in Rechnung gestellt wird. Dies gilt insbesondere für WDVS, die gegenüber allen anderen Fassadensystemen deutlich niedrigere Herstellungskosten aufweisen. Allgemein gültige Aussagen sind in Anbetracht der unterschiedlichen objektspezifischen Randbedingungen schwierig.

Lebenszyklus und Lebensdauer

Auch wenn im österreichischen Bausektor der kurzfristige Kostenvorteil (also die Minimierung der Herstellungskosten) die meisten Entscheidungen (Aufbauten, verwendete Bauprodukte, Oberflächenbehandlungen etc,) nach wie vor dominiert, ist in der Fachliteratur der Trend zu lebenszyklusweiten Betrachtungen von Baumaßnahmen mittlerweile unumkehrbar. Dies spiegelt sich auch in der wissenschaftlichen Literatur wider, wo nicht nur dem Langzeitverhalten verschiedener Bauprodukte vermehrte Beachtung geschenkt wird. War bis vor einem Jahrzehnt im deutschsprachigen Raum der Nutzungsdauerkatalog der Sachverständigenverbandes für Steiermark und Kärnten [15] das Nachschlagewerk für Richtwerte zur Nutzungsdauer von Bauteilen, sind heute zahlreiche Tabellenwerke mit mittleren Werten für Nutzungs- und Lebensdauer einschließlich Bandbreiten verfügbar [16][17][18][19]. Festzuhalten ist, daß die Grundlage dieser Zahlenangaben die Erfahrungen zahlreicher Experten darstellen, mitunter wird auch nicht immer scharf unterschieden zwischen den Begriffen „Lebensdauer“ und „Nutzungsdauer“. Die Lebensdauervorhersage ist in den Materialwissenschaften ein höchst komplexes Thema, da nicht nur das Alterungsverhalten der Baustoffe, sondern auch die nicht immer ausreichend quantifizierbaren Einwirkungen sowie die Einbaubedingungen zu beachten sind. Dabei sind auch die Betrachtungsebenen Bauwerk/Gebäude, Bauteil und Bauprodukt/Werkstoff zu unterscheiden. Die Normenreihe ISO 15686, aktuell Teile 1 bis 11, trägt dem Rechnung mit der sogenannten Faktor-Methode, die Auf- oder Abschläge auf die Lebensdauer unter Referenzbedingungen beinhaltet [22]. Die Anwendbarkeit wurde in [16] näher untersucht, fokussiert jedoch nicht auf Fassaden, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen wird.

In [23] wurden die Lebenszykluskosten sowie die Umweltwirkungen von 6 verschiedene Fassadenkonstruktionen mit einer erweiterten Energieausweis-Software (EnergieausweisPlus) untersucht. Die Außenwandvariante Stahlbeton + WDVS wird als Referenz verwendet und die relativen

Unterschiede der anderen Varianten in Säulendiagrammen dargestellt. Verschiedene, aber relevante Berechnungsannahmen sind ohne vollständigen Bericht über das Vorhaben nicht interpretierbar.

Neben diesen mehr oder weniger werkstoffunabhängigen Betrachtungen der Lebensdauer gibt es mittlerweile auch zahlreiche Untersuchungen zum Alterungsverhalten von Baustoffen und zugehörigen Bauteilen. Im Hinblick auf das gegenständliche Projektthema lag der Rechenschwerpunkt bei WDVS, Schaumkunststoffen, Mineralwolle sowie Holz.

Schaumkunststoffe:

[24] gibt die Ergebnisse einer Schweizer Studie wieder, die bis zu 35 Jahre alte EPS-Dämmplatten von einer Außenwand entnommen hat und zu dem Ergebnis gekommen ist, daß sich die relevanten Eigenschaften im Nutzungszeitraum nicht verändert haben. Die Originalstudie ist nicht verfügbar, lediglich die von einer Interessensvertretung aufbereiteten Erkenntnisse.

Der Ökokauf der Stadt Wien verfolgt seit ca. 20 Jahren das Ziel, das gesamte Beschaffungswesen der Stadt Wien nach ökologischen Gesichtspunkten auszurichten und gibt Merkblätter und Empfehlungen für Bauteile und Bauproduktgruppen heraus. Das gegenständliche Merkblatt [25] enthält viele und konkrete Hinweise zur Vermeidung von human- und ökotoxischen Substanzen, jedoch keine Angabe zu Alterung oder Lebensdauer.

Mineralwolle:

In [26] wurden Langzeitversuche an freibewitterten WDVS durchgeführt, getrennt für west- (Wetterseite) und ostorientierte Fassaden, um der vermuteten unterschiedlichen Feuchtebeanspruchung Rechnung zu tragen. Aufgrund von früheren Versuchen zur künstlichen Alterung wurde davon ausgegangen, daß unterschiedliche Prüfmodalitäten und daraus resultierende Durchfeuchtungen Kohäsion (Bindung der Mineralfasern) und Adhäsion (Abreißfestigkeit) die „Restfestigkeit“ erheblich beeinflussen. Weiters wurden Vergleiche mit EPS-Wärmedämmputzen durchgeführt und festgestellt, daß bei Dämmputzen immer ein Kohäsionsbruch im Putz maßgeblich für das Versagen war, daher wurde die Eigenfestigkeit und nicht die Haftzugfestigkeit als Kriterium in die Zulassungen aufgenommen und eine Mindestdruckfestigkeit von $0,4 \text{ N/mm}^2$ festgelegt. Um ein vergleichbares Sicherheitsniveau auch für Mineralwolleplatten zu gewährleisten, wurde aufgrund der Alterung ein Aufschlag von 100% zunächst angenommen, was sich als zweckmäßig erwiesen hat, da ein Mindestwert der Haftzugfestigkeit von $0,8 \text{ N/mm}^2$ am Untergrund auch von [27] gefordert wird. Durch den Zuschlag kann eine Alterungsprüfung somit entfallen. Als Bindemittel wurden Phenolharzgebundene Platten verwendet.

Wärmedämmverbundsysteme (WDVS):

Sieht man von vorgehängten, hinterlüfteten Fassaden ab, die auch in anderen Bereichen des Hochbaus wie Industriebau, Verwaltungs- und Sonderbauten mit erweitertem Anforderungsprofil (techn. Gebäudeausrüstung) zum Einsatz kommen, so gibt es auffällig viele Publikation und Forschungsberichte zu diesem Fassadentyp. Dies hängt wohl damit zusammen, daß alle Fassadenkonstruktion Vor- und Nachteile aufweisen, kein System jedoch kontroversiellen Diskussionen in vergleichbarem Ausmaß ausgesetzt ist. Ansatzpunkte dieser Diskussionen sind insbesondere das Brandverhalten, die Kreislauffähigkeit bzw. Entsorgung (Reuse und Recycling, Deponierbarkeit), Lebensdauer, Umweltwirkungen und Schadensanfälligkeit. Zusätzlich zu Forschungsberichten gibt es auch jede Menge Firmenschriften, von seriösen Produktinformationen bis zu Jubelmeldungen über Einzeleigenschaften.

[28] setzt sich mit der Lebensdauer von WDVS als Gesamtsystem im Rahmen einer umfangreichen Literaturrecherche auseinander und kommt zu dem Schluß, daß:

- eine Festschreibung der Lebensdauer von Wärmedämmverbundsystemen aus technischer Sicht unmöglich und damit als unzulässig anzusehen ist,
- einzelne WDVS-Objekte nach geringer Bestandsdauer bereits Mängel aufweisen, diese jedoch nicht als repräsentativ anzusehen sind,
- die in diversen Tabellenwerken angeführten Zahlenwerte für die Lebensdauer von WDVS jeglicher Grundlage entbehren,
- es unzählige Parameter gibt, die die Gebrauchsdauer beeinflussen: Standort, Bewitterung, Gebäudeform, verwendete Materialien, Verarbeitungsqualität, Art und Weise der Nutzung sowie Hege und Pflege; für solche Einflüsse kann es weder mathematische Mittelwerte noch Aufwertungs- oder Minderungsfaktoren geben.

2006 wurde von der MA 39 – VFA der Stadt Wien der Zustand der WDVS von insgesamt 10 Wohnbauten der Stadt Wien auf Ihren Erhaltungszustand nach unterschiedlicher Bestandsdauer (ca. 15 bis 30 Jahre) untersucht [29]. Dabei wurde ein insgesamt optisch guter Erhaltungszustand festgestellt, wonach eine Nutzungsdauer in der Regel von mehr als 25 Jahren problemlos erreicht wird. Ebenso wurde aufgezeigt, daß bei entsprechender Pflege und Wartungsmaßnahmen diese Nutzungsdauer jedenfalls wesentlich verlängert werden kann. Weiters werden verschiedene, zumeist hochbaukonstruktive Maßnahmen vorgeschlagen, um eine möglichst hohe Nutzungsdauer zu gewährleisten. Es wird auch aus den Erhebungen abgeleitet, nach Ablauf der Nutzungsdauer die Deckschicht zu entfernen und zu erneuern, um das WDVS einem 2. Kreislauf zuzuführen.

In [30] wird über Untersuchungen an WDVS berichtet, die im Laufe von 3 Jahrzehnten mehrfach durchgeführt worden sind, um deren Langzeitverhalten zu beurteilen. Es erfolgte eine Kategorisierung in 3 Klassen, typische Schäden waren Verschmutzung und Algenbildung, Risse, Blasenbildung und Ablösungen. Fassadenschäden traten wegen der Entkopplungswirkung der Dämmschicht weniger häufig auf als bei konventionelle Mauerwerk mit Putz; eine grundsätzlich größere Anfälligkeit für Algenbewuchs kann durch geeignete Putzzusätze (Algizide/Fungizide?) kompensiert werden; Wartungsaufwand und Wartungshäufigkeit bei WDV-Systemen entsprechen denen von konventionellen Wandbildnern mit Putz. Dies gilt auch für die Dauerhaftigkeit insgesamt.

Zur Schadensanfälligkeit von WDVS findet sich ein pointierter Hinweis in [31]: „Wärmedämmverbundsysteme sind Nullfehlersysteme! Sie vertragen Null Fehler in der Planung, Null Fehler in der Ausführung und Null Fehler bei den Materialkomponenten und Systemen! Wärmedämmverbundsysteme benötigen Hege & Pflege“.

Mit der aktuellen VAR 2019 [32] stellen die Systemerzeuger ein ebenso umfassendes wie detailliertes Regelwerk zur Verfügung, das alle paar Jahre überarbeitet wird und auf der ÖNORM B 6400 aufbaut. *Sie richtet sich an Planer, ausschreibende Stellen, Generalunternehmer und Verarbeiter, insbesondere an zertifizierte WDVS-Fachverarbeiter (in der Folge ZFV genannt). Sie stellt Lösungen zur Verfügung, die zur Wertsteigerung jedes Gebäudes beitragen – vorausgesetzt, sie werden von allen am Bau Beteiligten gemeinsam umgesetzt.* Ob diese sehr detaillierte und umfassende Richtlinie auch für die auf der Baustelle eingesetzten Arbeitskräfte geeignet ist, sei dahingestellt. Ergänzend gibt es einen Info-Folder zu Pflege und Wartung [35].

Der (deutsche) Verband für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e.V. bietet einen Planungsatlas mit zahlreichen Konstruktionsdetails an [36][37]. Die (österreichische) Gütegemeinschaft Polystyrol Hartschaum GPH bietet eine Fülle von sogenannten Faktenblättern an, in denen die Vorteile sowohl von expandiertem Polystyrolschaum als Dämmstoff als auch von damit hergestellten WDVS vorgestellt werden und bieten Informationen zu allen relevanten Eigenschaften, von Ressourcen, thermischen

Eigenschaften über Rezyklierbarkeit bis zu Langlebigkeit (aus Industriesicht) [38]. Darüber hinaus stellen praktisch alle Systemerzeuger firmeninterne Richtlinien und Empfehlungen zur Verfügung. In [39] wurden umfangreiche ökobilanzielle Vergleiche an WDVS angestellt, wobei insbesondere unterschiedliche Dämmstoffe wie EPS, Steinwolle und Mineralschaum verglichen wurden. Zu beachten ist, daß diese Studie vor knapp 20 Jahren erstellt wurde.

Eine umfassende Darstellung aller relevanten Eigenschaften von WDVS mit allen Stärken und Schwächen wird in [40] wiedergegeben. Aufgrund des breiten Ansatzes würde eine Zusammenfassung den Rahmen dieser Literaturlauswertung sprengen. In einer sehr umfassenden Studie wurde der Beitrag der Gebäudedämmung zur Energiewende analysiert, wobei alle gängigen und auch innovativen (2013) Dämmstoffe einbezogen wurden. Neben einer Bewertung der Nachhaltigkeitsaspekte erfolgt auch eine Potentialabschätzung im Kontext der Energiewende sowie eine Betrachtung der Wärmedämmung im Visier der Medien.

Ebenfalls eine umfassende Darstellung der Eigenschaften und Bewertungsmöglichkeiten von Dämmstoffen unter Berücksichtigung des Lebenszyklus findet sich in [42].

Kreislauffähigkeit von WDVS:

[43] gibt einen kurzen Überblick für Praktiker über die Möglichkeiten der Verwertung von WDVS. Demnach kann sortenreines EPS ohne das Flammschutzmittel HBDC (Hexabromcyclododecan) zu Granulat verarbeitet und stofflich verwertet werden. Die Aufbereitung von Mineralwolle-Verschnitt ist meist unwirtschaftlich, eine Kompaktierung könnte Abhilfe schaffen. WDVS-Abfälle aus Rückbau gelten als heterogene, schwer trennbare und möglicherweise HBDC-belastete Verbundstoffe. Eine Lösungsmöglichkeit könnte das CreaSolv®-Verfahren (Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung) bringen, bei dem Polystyrole chemisch aufgelöst, feste Verunreinigungen und Additive wie HBDC oder Brom abgetrennt, die Polystyrole vom Lösungsmittel getrennt und zu Polymergranulat verarbeitet werden. Dabei geht es vor allem um wenig verunreinigtes Material. Wichtig ist die Abtrennung von Putz, Kleber, Dübel und Gewebe. Eine Alternative ist die energetisch-stoffliche Verwertung in der Zementindustrie, wobei der Heizwert von EPS im Vordergrund steht und künftig vielleicht auch die Asche von Putz, Kleber und Gewebe stofflich genutzt werden könnte.

Der Leitfaden zum Recyclingpotential von Mineralwolle [44] ist im Rahmen des Forschungsvorhabens [45] erstellt worden. Nach Angaben des BBSR sind in Deutschland bis 2011 700 Mio. m³ Mineralwolle verbaut worden. Nach Schätzungen des Fachverbandes Mineralwolle e.V. sind seitdem jährlich etwa 1 Mio t hinzugekommen, gleichzeitig werden im Zuge von Sanierungen und Rückbaumaßnahmen MW-Abfälle aus dem Gebäudebestand entnommen, davon die überwiegende Menge, etwa 160.000t, wird deponiert. Jedenfalls wird in den kommenden Jahrzehnten eine deutliche Steigerung der Rückbaumengen erwartet. Nach einem kurzen Abriß der Herstellungsverfahren folgt eine Kurzeinschätzung der Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit einschließlich der relevanten Prüf- und Umweltzeichen. Demnach benötigt Mineralwolle keine Flammschutzmittel, Biozide oder andere als besonders besorgniserregend eingestufte Zusätze. Zur Dauerhaftigkeit wird ausgeführt: *Ein wesentlicher Vorteil von Mineralwollen ist ihre Langlebigkeit. Bei ordnungsgemäßem Einbau, insbesondere dem baulich sichergestellten Schutz vor direkter Bewitterung und stehendem Wasser, weisen Mineralwollen eine sehr lange Nutzungsdauer auf. Sie wird in der Regel lediglich durch die Nutzungsdauer des Gebäudes bzw. der gedämmten Bauteile limitiert.* Betreffend den Gesundheitsschutz ist zwischen „alter“ und „neuer“ Mineralwolle zu unterscheiden: *Zentrales Kriterium für die Bewertung der gesundheitlichen Auswirkungen von Mineralwolle ist die Wirkung der bei mechanischer Beanspruchung freigesetzten Stäube. Der Einfluss dieser Stäube auf die menschliche Gesundheit ist zwar bislang nicht abschließend geklärt, allerdings gibt es Hinweise auf eine*

kanzerogene Wirkung der bis 1996 produzierten Mineralwollen. Kennzeichnend für diese potenzielle Kanzerogenität sind die Lungengängigkeit der Mineralwollefasern und ihre Beständigkeit im Lungengewebe (Biopersistenz). ... Wenn das Alter der Mineralwolle bzw. deren gesundheitliche Unbedenklichkeit nicht über Bauakte o.ä. nicht nachgewiesen werden kann, gibt es die Möglichkeit, die Produkte auf Basis einer chem. Analyse zu klassifizieren. Es folgt ein Überblick über gefahrenstoff- und abfallrechtliche Behandlung, was aufgrund der europäischen Vorgaben (REACH, CPL, ...) weitgehend auch für Österreich zutrifft. Anschließend werden Empfehlungen zum Ausbau von MW-Dämmstoffen gegeben sowie zu Verwertung und Entsorgung. Baustellenabfälle aus MW-Dämmstoffen werden nahezu vollständig deponiert. Es wird betont, daß in Anbetracht der zu erwartenden Volumina neue Verfahrenstechniken zur Rückführung in den Stoffkreislauf in anderer Größenordnung erforderlich sein werden. Ein entsprechendes Szenario wurde in [45] exemplarisch entwickelt.

Auf eine neue Entwicklung wurde in [46] hingewiesen aus Anlaß der Eröffnung einer Demonstrationsanlage in den Niederlanden. Diese basiert auf dem vom Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung entwickelten CreaSolv[®]-Verfahren. Das Verfahren ermöglicht laut dieser Darstellung sowie einer Kurzbeschreibung des Verfahrens durch das IVV [47] sowohl die Abtrennung von Verunreinigungen wie Mörtel, Holz etc., sondern auch die Rückgewinnung des früher als Flammschutzmittel verwendeten Brom in Form von HBCD und damit die Herstellung eines gleichwertigen Recycling-Kunststoffs. Auf die Unterschiede zwischen stofflichem bzw. mechanischem/physikalischem, chemischem, lösungsmittelbasiertem Recycling sowie Aufspaltung der Polymere in Monomere näher einzugehen, würde an dieser Stelle zu weit führen und den Rahmen der vorliegenden Studie sprengen. Eine gute Übersicht liefert die Publikation des IVV in [48]. Das Verfahren ist offensichtlich soweit ausgereift, daß die Investition für eine Demonstrationsanlage mit einer Jahreskapazität von 3.300t getätigt wurde. Eine nähere Beschreibung des Verfahrens und des aktuellen Standes des Kunststoffrecycling findet sich auch in einem entwicklernahen Positionspapier [49]. Ob das Verfahren eine ausreichende Wirtschaftlichkeit für einen großtechnischen Einsatz besitzt, geht aus der einschlägigen Literatur nicht hervor, ebenso, zu welchen Ergebnissen eine ökobilanzielle Betrachtung (Energieeinsatz bei der Pyrolyse, Emissionen etc.) kommt bzw. ob eine solche schon angestellt wurde.

Eine umfangreiche Untersuchung der Möglichkeiten für Rückbau, Recycling und Verwertung von WDVS wurde in [50] vom Fraunhofer Institut für Bauphysik angestellt. Es sollte das Potential des Wertstoffkreislaufs von WDVS analysiert und konkrete Handlungsempfehlungen für Rückbau und Verwertung gegeben werden. Nach einem Überblick über die rechtlichen Rahmenbedingungen werden die Mengengerüste und Stoffströme analysiert sowie die Verwertungs- und Recyclingverfahren für EPS, da dieser Dämmstoff mit 80% Mengenanteil den bedeutendsten Dämmstoff darstellt und sich die Studie auf EPS konzentriert einschließlich HBCD-haltigen EPS. Ergänzt wird dies durch eigene Untersuchungen, die Studie schließt mit Prognosen und Empfehlungen.

Demnach wurden von 1960 bis 2012 900 Mio m² WDVS verbaut, was 720 Mio m² Gebäudeflächen mit EPS als Dämmstoff entspricht (d.s. 80%). Weiters wird ein Überblick über die Produktionsmengen der letzten Jahrzehnte gegeben. 60% der EPS-gedämmten Gebäudeflächen wurden zusätzlich mit Dübeln verankert. Es werden auch einige Daten zu Dämmstoffabfällen in Deutschland angegeben, ein zeitlicher Verlauf der aus Rückbauten bzw. Sanierungen anfallenden EPS-Mengen ist daraus nicht ableitbar. Es folgt ein Überblick über die Trenn- und Verwertungsmöglichkeiten sowie über die eigenen Untersuchungen zum Rückbau von WDVS. Bezüglich der versuchten Prognosen hält die Studie fest: *Für die Erstellung von Prognosen, wie sich das Abfallaufkommen von EPS aus allen Bauanwendungen und aus WDVS in Zukunft entwickeln wird, sind diese Zahlen deshalb ungeeignet.* Daher wird versucht, unter definierten Randbedingungen und Annahmen (z.B. Austauschraten) mittels statistischer Methoden Prognoseszenarien zu entwickeln. Für die nahe Zukunft (≤20 Jahre) wird die energetische

Verwertung als ökologische und ökonomische Verwertungsmethode angesehen, Aufdoppeln wird als sinnvolle Maßnahme zur Minimierung des Abfallaufkommens. Beim Forschungsbedarf werde 3 Bereiche als prioritär betrachtet: Befestigungstechnik, Aufdopplung und Rückbau sowie Kennzeichnung und Erkennen von HBCD-haltigen EPS-Platten inkl. Weiterentwicklung der Recycling-Verfahren.

[51] gibt einen kurzen und für Baupraktiker geschriebenen Artikel aus der Sicht des VDPM (Verband für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e.V.). Neben einem kurzen Überblick über den Stand der Technik (2018) und praktische Vorgangsweise inkl. Umgang mit HBCD ist auch die Entwicklung der Dämmstoffdicken von 1992 bis 2016 (i.M. 54 bis 130mm) enthalten, ebenso eine Prognose der jährlichen Entsorgung von HBCD-haltigen EPS-Dämmstoffen aus Bauabfällen (Quelle: General Assembly PolystyreneLoop Corporation).

In [52] wurden die Randbedingungen des Recyclings von EPS und XPS unter technischen, ökonomischen und ökologischen sowie rechtlichen Gesichtspunkten in Österreich untersucht. Weiters wurde eine Mengeneinschätzung vorgenommen, wonach sich in Österreich 2016 690.000t EPS und 390.000t XPS auf Fassaden befunden haben. Die höchsten ermittelten Jahresmengen lagen demnach bei 53.000t EPS (2011) und 24.000t XPS (2013). Auf Basis eines Nutzungsdauermodells wurde der Rückfluß von EPS/XPS (mit HBCD) bis zum Ende des Jahrhunderts hochgerechnet mit einem Maximum im Jahr 2045 bei jährlichen Maximalwerten von 14.000t EPs und 7.500t XPS.

In einem Prozeßmodell wurden die Kosten für Abnahme, Sammlung, Transport und Behandlung von EPS/XPS-Dämmstoffen errechnet. Eine Abnahme und Trennung von EPS und XPS ist bereits auf der Baustelle erforderlich, was derzeit nur manuell erfolgen kann. Im Gegensatz zu den Transportkosten stellt die Abnahme den größten Kostenblock dar. Eine Verdichtung wird als wirtschaftlich nicht eindeutig gerechtfertigt angesehen, die Verbrennung wird als sehr kostengünstig betrachtet. Nach dieser Studie rechnet sich die Behandlung in einer Creasolv[®]-Anlage durch die Rückgewinnung der Rohstoffe Polystyrol und Brom (siehe [47]).

Die WKO hat 2018 eine Kurzanleitung zum Umgang mit künstlichen Mineralfasern (Glas-, Steinwolle) herausgegeben [53]. Es wird der Unterschied zwischen alten (Herstellungsjahr vor 1998, Verdacht der krebserregenden Wirkung) und neuen KMF (Herstellungsjahr ab 1998, nicht krebserregend). Die Anleitung zielt nicht auf WDVS ab.

Einen interessanten Ansatz zur Verbesserung der Kreislauffähigkeit von WDVS liefert das in [54] beschriebene Forschungsprojekt. *Im Projekt „WDVS-Deaktiv“ sollte ein mikrowellenaktiver Klebstoff zum sicheren Entkleben von Wärmedämmverbundsystemen entwickelt werden. Dieser Klebstoff darf während des Produktlebenszyklus nicht ungewollt aktiviert werden, muss aber im Bedarfsfall möglichst schnell und kraftfrei ein sortenreines Recycling der Substrate gewährleisten. Die erstellte Lifecycle-Analysis (LCA) zeigt auf, dass der entwickelte lösbare Klebstoff einen ökologischen Vorteil gegenüber kommerziellen organischen Klebstoffen besitzt, allerdings auch unter Berücksichtigung der Wiederverwendung der EPS-Platten, keinen Vorteil gegenüber einem mineralischen Klebstoff bietet.*

Einen umfassenden Überblick über verschiedene Recyclingprozesse, unter anderem auch über das Recycling von Aluminium, hat das Umweltbundesamt in [55] erstellt, worauf aber hier nicht näher eingegangen werden kann.

Brandschutz:

[56] gibt einen Überblick über die deutschen bzw. europäischen Brandschutzbestimmungen, insbesondere für WDVS, und erläutert, wie Dämmstoffe und WDVS im Brandfall einzuordnen sind. Bei Brandereignissen schlagen die Flammen meist aus dem Fenster des in Vollbrand befindlichen Raumes, was den meisten bauaufsichtlichen Zulassungen zu Grunde lag, oder resultieren aus Brandlasten

außerhalb der Fassade (z.B. Müllcontainer). EPS schmilzt bei ca. 140°C. Es kommt zu einem heißen Abtropfen oder großflächig ablaufender Schmelze, was für Rettungsmaßnahmen und Löscharbeiten eine Herausforderung darstellt. Aus Analysen von Brandereignissen folgt, daß die meisten Brandlasten vor der Fassade verursacht wurden. In Versuchsreihen mit Realbränden wurden konstruktive Maßnahmen erarbeitet, die Fassaden mit schwer entflammbarem EPS widerstandsfähiger gegen Brandlasten in unmittelbarer Nähe zur Fassade machen sollen. Die Maßnahmen werden im Anschluß beschrieben.

Außenwandbekleidungen von Gebäuden der Gebäudeklassen 4 und 5 benötigen den Nachweis der Schwerentflammbarkeit. Für Dämmstoffdicken >100mm sind weitere konstruktive Maßnahmen wie Brandriegel erforderlich. Aufgrund der Analyse von Brandereignissen durch die Feuerwehren stellen brennende Abfallbehälter oder Kfz eine Gefahr dar. Das DIBt untersuchte daher in [57], ob zur Ertüchtigung gegen bestimmte Außenbrandszenarien weiter zusätzliche Veränderungen EPS-basierter WDVS erforderlich sind. Die genannte Gefahr hat sich in den Versuchen bestätigt, es werden daher eine Reihe zusätzlicher konstruktiver Maßnahmen wie Brandriegel an der Unterkante des WDVS bzw. max. 90cm über GOK sowie Brandriegel in Deckenhöhe des 1. und 3. OG empfohlen.

Auch in [58] wurde nach Auswertung diverser Brandereignisse gezeigt, daß der Brand außerhalb des Gebäudes das häufigste und kritischste Brandszenario für EPS-basierte WDVS darstellt. Aus SBI-Tests an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) werden Empfehlungen zur Verbesserung der Systemsicherheit abgeleitet, z.B. die unmittelbare Umgebung der Fassade möglichst brandlastarm zu gestalten. Auf die „Hinweise zur konstruktiven Ausbildung zur Verbesserung des Brandverhaltens von als schwer entflammbar einzustufenden WDVS mit EPS-Dämmstoff des DIBt“ wird verwiesen, ebenso auf die Notwendigkeit von Brandriegeln zur Begrenzung der vertikalen Brandausbreitung.

Das (deutsche) Umweltbundesamt hat mit [59] Ende 2017 eine Informationsbroschüre zum Thema HBCD als seinerzeit meistverwendetes Flammschutzmittel für EPS herausgegeben, die Antworten auf die wesentlichen Fragen gibt, die Hintergründe für das mittlerweile geltende Verbot erläutert sowie den Rechtsrahmen auf europäischer Ebene (europäisches Chemikalienrecht) beschreibt. 2006 wurden in Europa noch 12.000t HBCD jährlich eingesetzt. Seine Gefährlichkeit beruht auf seiner Giftigkeit sowie seiner Persistenz (Langlebigkeit, schlechte Abbaubarkeit), was aber nicht bedeutet, daß von verbauten HBCD-haltigen EPS-Platten an Fassaden eine Gefahr ausgeht. Solange keine alternativen Recyclingverfahren großtechnisch zur Verfügung stehen, ist die thermische Verwertung in Abfallverbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle nicht zuletzt wegen der unvermeidlich anhaftenden Reststoffe die aktuell einzige Möglichkeit der Entsorgung. Wesentlich bei der Entsorgung ist, daß die enthaltenen persistenten organischen Schadstoffe zerstört oder unumkehrbar umgewandelt werden. EPS enthält ca. 1,7% HBCD, wegen der 3%-Grenze gelten diese Abfälle als nicht gefährlich. Ein Erkennen ist nur über Herstellerinformationen (Lieferschein, Leistungserklärung) möglich. Auch das (österreichische) IBO hat auf seine Website eine Kurzübersicht zur HBCD-Problematik (Stand 2017) gestellt [60].

Holz im Fassadenbau:

Auch die Verwendung von Holz im Außenbereich ist ein mitunter umstrittenes und vieldiskutiertes Thema. Daher gibt es naturgemäß auch zahlreiche Publikationen und Forschungsberichte, die sich mit den verschiedenen Aspekten bewitterter Holzoberflächen befassen, weshalb einige wenige fassadenrelevante im Folgenden angeführt werden.

Die von proHolz Austria herausgegebene Zeitschrift „Zuschnitt“ beleuchtet vierteljährlich unterschiedliche Schwerpunktthemen (proholz.at/zuschnitt/ausgabe/liste). Dabei werden die jeweiligen

Themen zum Teil architekturphilosophisch-essayhaft betrachtet, zum Teil werden auch konkrete konstruktive und technologische Informationen, vielfach auf Basis von durchgeführten Forschungsprojekten, vermittelt. Fassadenspezifische Beiträge finden sich z.B. in [61], das dem Thema Holzaltern gewidmet ist. Im selben Heft werden von Schweizer Autoren die Ursachen der Holzverwitterung, Gegenmaßnahmen insbes. durch konstruktiven Holzschutz sowie die Möglichkeiten der Oberflächenbehandlung erläutert [62].

Mit der Dauerhaftigkeit von Holz in Abhängigkeit von Beanspruchung und Holzart befaßt sich [63]. [64] ist zur Gänze dem Thema Holzfassaden gewidmet. In einer Systemübersicht wird ein Überblick über gängige hochbaukonstruktive Durchbildungen gegeben sowie über geeignete Holzarten und Oberflächenbehandlungen. Neben „massiven“ Holzschalungen werden auch mögliche Holzwerkstoffe als Fassadenbekleidung beschrieben. Es folgen kompakte Erläuterungen zu den Themen Beschichtungen, Brandschutz sowie Dreischichtplatten. Auch das Thema Holzschutz im Sockelbereich, ein besonders kritischer Bereich (nicht nur) von Holzfassaden, wird behandelt, u.a. mit der – in manchen Gegenden traditionellen – Lösungsvariante einer sogenannten „Opferschalung“ (Anmerkung: analog einem Opferputz auf durchfeuchtetem und versalzenem Ziegelmauerwerk).

[65] berichtet über Untersuchungen der Holzforschung Austria zur Entwicklung eines visuellen Vorhersagemodells für die Farbveränderungen von lasierend beschichteten Holzoberflächen inkl. der Entwicklung eines geeigneten Farbmeßverfahrens. Behandelt werden weiters der Einfluß der Pigmentierung von Beschichtungen, Farbveränderungen mit und ohne Wartung sowie die Notwendigkeit regelmäßiger Kontrollen zum rechtzeitigen Erkennen erforderlicher Wartungsmaßnahmen. Maßgebliche Beschichtungsschäden sind Risse, mechanische Verletzungen, Hagelschlag, Verfärbungen, Ablätterungen oder Bläuebefall. Auf Hirnholzzonen in Kantenbereichen ist besonders zu achten.

Die wohl umfassendste Darstellung der Verwendung von Holz im Fassadenbau ist in [66] enthalten. Neben zahlreichen Architekturbeispielen werden die verschiedenen Holzarten, deren Dauerhaftigkeit, Möglichkeiten der Oberflächenbehandlung, bauphysikalische Aspekte sowie Konstruktionsdetails vorgestellt.

Photovoltaik:

Auch wenn die Integration von Photovoltaik-Paneelen in die Fassaden geförderter Wohnbauten noch nicht als Standard zu betrachten ist, wird dieses Thema in Zukunft stark an Bedeutung gewinnen (müssen). Daher wurde auch eine kurze Recherche dazu angestellt, eine nähere Befassung würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Beispielhaft seien zwei Arbeiten über neuere Entwicklungen angeführt:

Im Rahmen einer Dissertation [67] wurden bauwerksintegrierte Photovoltaik (BIPV)-Fassadensysteme einem Langzeitmonitoring unterzogen, um den Einfluß des jeweiligen Fassadensystems auf die Leistungsfähigkeit der PV-Module detailliert und zeitlich aufgelöst betrachten zu können. Daraus werden Empfehlungen hinsichtlich der Planung als auch der normativen Berücksichtigung von BIPV-Fassaden abgeleitet. Es wurde auch der Einfluß von Warm- und Kaltfassaden (nicht hinterlüftet, hinterlüftet) auf die Leistungsfähigkeit der PV-Module untersucht, da deren Wirkungsgrad mit zunehmender Modultemperatur abnimmt, weshalb die Kaltfassade diesbezüglich gegenüber der Warmfassade im Vorteil ist.

Im Rahmen von [68] wurde versucht, leichte, in Kunststoffsystemen eingebettete PV-Module mittels eines neu entwickelten Klettverschlußsystems (StoSystain R) in trennbaren WDVS zu verbinden. Für das meistverwendete Fassadensystem WDVS auf massiver Wandkonstruktion gibt es bisher keine zufriedenstellenden und zugelassenen PV-Systeme. Dazu wurden auf dem Freigelände der TU Wien

Prüfwände mit verschiedenen Konstruktionen errichtet. In Anbetracht des hohen Kunststoffanteils des Systems wird dem Brandschutz noch genauere Beachtung geschenkt werden müssen, was im Rahmen des Projektes nur ansatzweise möglich war. *Schlußfolgerungen: Dieses Sondierungsprojekt hat dazu beigetragen, dem Ziel eines einfachen, kostengünstigen, reversiblen Befestigungssystems für PV-Fassadensysteme mit Kunststoff-Modulen und Glas-/Glas-Modulen für Neu- und Altbauten einen wichtigen Schritt näher zu kommen. Es wurden sehr praxisnah die Möglichkeiten und auch die noch offenen Fragen, die in einem weiterführenden Projekt bearbeitet und gelöst werden sollten, aufgezeigt.*

5 Anforderungen an Fassadensysteme

5.1 Aufgaben von Fassaden

Fassaden stellen die zumeist vertikalen Teile der Gebäudehülle dar. Während bei historischen Gebäuden die mehr oder weniger steilen Kaltdächer und deren Deckung das Erscheinungsbild eines Gebäudes mitprägen, tritt dieser Einfluß heute bei neu errichteten Gebäuden – insbesondere bei Flachdächern – naturgemäß in den Hintergrund. Im früheren Sprachgebrauch erstreckte sich der Begriff „Fassade“ meist nur auf die dem öffentlichen Raum zugewandten Teile der Gebäudehülle, die auch entsprechend repräsentativ gestaltet waren (z.B. bei Wohnhäusern der Gründerzeit) im Gegensatz zu den hofseitigen Bereichen, was auch mit den gründerzeitlichen Bebauungsrastern mit Blockrandverbauung zusammenhängt.

Fassaden im engeren Sinne stellen die außenseitigen Oberflächen von Außenwänden dar und haben somit keine Tragfunktion, sondern dienen dem Erscheinungsbild des Gebäudes und erfüllen eine Schutzfunktion, wie später noch im Detail auszuführen ist. Bei vorgehängten Leichtfassaden ist dies unmittelbar einleuchtend, bei monolithischen Außenwänden stellt das Putzsystem (konventioneller Putzaufbau oder Wärmedämmverbundsystem, WDVS) die Fassade dar.

In [5] werden die Anforderungen an Fassaden (allgemein, nicht nur auf den Wohnbau bezogen) wie folgt beschrieben:

Die Fassade ist die Schnittstelle zwischen Innen- und Außenraum und damit als Raum begrenzendes Bauteil internen und externen Beanspruchungen ausgesetzt. Sie wird häufig mit der menschlichen Haut verglichen, die den Energiehaushalt des Körpers regulieren kann, indem sie auf sich ändernde Einflüsse und Verhältnisse reagiert. Entsprechend ist es die Aufgabe der Fassade, den Nutzern von Gebäuden eine behagliche Innenraumsituation zu gewährleisten und den Energiehaushalt des Gebäudes positiv zu beeinflussen. Die Erfüllung dieser Aufgabe ist wesentlich von den klimatischen Rahmenbedingungen abhängig, so dass die Auswahl und Ausführung der Fassade abhängig von der geografischen Lage eines Gebäudes stark variieren kann.

Extern übernehmen Fassaden den Wind-, Regen- und Wärmeschutz und beeinflussen die Energieeffizienz eines Gebäudes wesentlich, da sie in enger Wechselwirkung mit der technischen Ausrüstung des Gebäudes stehen. Ein guter baulicher Wärmeschutz der Fassade führt in der Regel zu kleineren Heizflächen, ein guter Sonnenschutz zu geringeren Kühlmaßnahmen. Im öffentlichen Raum sind Fassaden außerdem wichtiges Gestaltungselement und oft auch Ausdruck der Nutzung eines Gebäudes. Intern haben Fassaden wesentlichen Einfluss auf das Wohlbefinden der Nutzerinnen und Nutzer in Bezug auf den Raumkomfort und die Identifikation mit dem Gebäude.

Daraus lassen sich folgende Aufgaben einer Fassade als Teil der Gebäudehülle ableiten:

- Gestalterische Aufgaben: Erscheinungsbild, Individualität und Identitätsstiftung für Bewohner, Einfluß auf das Orts-/Stadtbild
- Funktionale Aufgaben:
 - Schutzfunktion: Witterung (Temperatur, Niederschlag), Brand, Schall, Einbruch,
 - Ermöglichung von Belichtung und Belüftung,

was für eine langfristige Funktionserhaltung laufende Wartung, Instandhaltung und Reinigung erfordert.

Im Gegensatz zur techn. Gebäudeausrüstung wird von Eigentümern und Nutzern fälschlicherweise Wartungsfreiheit angenommen, was jedoch bei Fassaden in Anbetracht der ihrer Beanspruchung durch Witterung und Temperatur nicht zutrifft. Eine lang anhaltende Erfüllung der o.a. Funktionen kann nur bei regelmäßiger Wartung, Instandsetzung und Reinigung erwartet werden.

5.2 Daraus resultierende Anforderungen

Aus den genannten Aufgaben ergeben sich im Detail eine Reihe von Anforderungen an Fassadensysteme, zu denen neben Funktionalität und Gestaltung auch baurechtliche und wirtschaftliche Vorgaben dazukommen sowie künftig auch solche, die aus den Grundsätzen nachhaltigen Bauens resultieren.

Tab. 2: Anforderungen an Fassaden

| Anforderung | | im Detail |
|---|--|---|
| | Erscheinungsbild | Beitrag zum Erscheinungsbild des Gebäudes, Anpassung an Orts- oder Landschaftsbild, identitätsstiftend |
| Aus Bauprodukteverordnung und OIB-Richtlinien resultierend | Standsicherheit | sichere Aufnahme folgender Lasten: Eigengewicht, allf. Eis- und Schneelasten, Winddruck und -sog, Hagel |
| | Brandschutz | WDVS und Gebäudeklassen 4 und 5: keine Brandweiterleitung über die Fassade sowie wirksame Einschränkung des Herabfallens großer Fassadenteile; besondere Bestimmungen bei Fluchtniveau >22m |
| | Hygiene, Gesundheit, Umweltschutz | Schutz vor Feuchtigkeit aus dem Boden, gegen Niederschlagswässer, Vermeidung von Schäden durch Wasserdampfkondensation; Belichtung von Aufenthaltsräumen, Sichtverbindung nach außen, |
| | Nutzungssicherheit, Barrierefreiheit | Schutz vor Absturz und herabfallenden Gegenständen inkl. Eis und Schnee |
| | Schallschutz | Luftschallschutz von Außenbauteilen |
| | Energieeinsparung, Wärmeschutz | winterlicher WS: Begrenzung des Wärmedurchgangs von Außenwänden für Wohngebäude sommerlicher WS: nicht rein fassadenspezifisch zu betrachten |
| | nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen | Rezyklierbarkeit, Dauerhaftigkeit Verwendung umweltverträglicher Rohstoffe und Sekundärbaustoffe |
| Sonstige aktuelle Anforderungen (lebenszyklus- und nachhaltigkeitsorientiert) | Umweltwirkungen | Emissionsminderung in Herstellung, Betrieb und Entsorgung, insbes. Treibhausgasemissionen |
| | Ressourcen | Minimierung des Ressourcenverbrauchs (Stoffe, Energieträger n.e. über den Lebenszyklus |
| | Kreislauffähigkeit | Demontierbarkeit Trennbarkeit Rezyklierbarkeit bzw. Wiederverwendbarkeit |
| | Wartung und Instandhaltung | Lebensdauer Trennbarkeit von Bauteilschichten Reparierbarkeit Montier- und Demontierbarkeit Robustheit Austauschzyklen Reinigbarkeit |
| | Wirtschaftlichkeit | Lebenszykluskosten: Herstellungskosten Montage- u. Transportkosten Kosten für Wartung/Instandhaltung/Austausch Beseitigungskosten |
| | Facility Management | Aufnahme von Teilen der technischen Gebäudeinfrastruktur (HKLS, IT, ...), Integration von Photovoltaik-Paneeelen |

6 In die Untersuchung einbezogene Fassadensysteme

Mit der vorliegenden Studie sollte auftragsgemäß auf [3] und [4] aufgebaut werden, weshalb die dort behandelten Außenwandtypen bzw. Fassadensysteme den nachfolgenden Untersuchungen, soweit möglich und Daten bzw. technische Unterlagen von den Erzeugern zur Verfügung gestellt wurden, zu Grunde gelegt wurden. Somit wurde nur die vor dem Wandbildner montierten Fassadensysteme (WDVS und VHF) berücksichtigt. Da auch die konventionelle Putzfassade einbezogen werden sollte, mußte ein Kompromiß gefunden werden, da bei dieser Fassade der (winterliche) Wärmeschutz größtenteils vom Wandbildner übernommen wird. Daher wurde für die LZK-Rechnung sowie für die ökologische Bewertung eine fiktive Putzfassade in die Bewertung aufgenommen, also das 38cm Porotherm-Mauerwerk inkl. Mineralwollefüllung und 2cm Leichtputz abzgl. eines 25cm HLZ-Mauerwerks, um annähernde Vergleichbarkeit (mit allen Einschränkungen) zu erzielen. Grundsätzlich wurde bei allen Systemen ein annähernd gleicher u-Wert angestrebt, weshalb die wärmetechnischen Eigenschaften der untersuchten Systeme nicht weiter berücksichtigt wurden. Diese untersuchten Systeme sind:

Tab. 3: Untersuchten Aufbauten bzw. Fassadensysteme

| | Gewählte Wandaufbauten (Wanddicken in cm) | | | | | | | |
|----------------------------|---|---------------|--------------|--------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|----------------|
| | jeweils auf 25 cm HLZ-Mauerwerk | | | | | | | |
| | 38 HLZ Plan + Dämmputz | 16cm WDVS/EPS | 16cm WDVS/MW | VHF 16 MW + Lärche | VHF 16 MW + Fichte beh. | VHF16 MW + Faserzement | VHF 16MW + Aluverbund | VHF 16MW + HPL |
| 25cm HLZ | | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| 38cm HLZ Plan + integr. WD | 38 | | | | | | | |
| EPS | | 16 | | | | | | |
| MW | | | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |
| Unterputz + Gewebe | | 0,5 | 0,5 | | | | | |
| Unterkonstruktion | | | | - | - | - | - | - |
| Hinterlüftung | | | | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Bekleidung | | | | 2 | 2 | 0,6 | 0,4 | 0,6 |
| Ober-/Unterputz | | 0,3 | 0,3 | | | | | |
| Dämmputz | 2 | | | | | | | |
| Wanddicke | 40,0 | 41,8 | 41,8 | 48,0 | 48,0 | 46,6 | 46,4 | 46,6 |
| u- Werte | ca. 0,20 0,25 W/m ² K | | | | | | | |

7 Eigenschaften der untersuchten Fassadensysteme

7.1 Umweltwirkungen

7.1.1 Grundsätzliches zur Bewertung der Umweltwirkungen von Bauprodukten und Gebäuden

Der Bausektor ist heute unter Einbeziehung der Nutzungsphase der Gebäude für die meisten Umweltwirkungen verantwortlich, sowohl beim Ressourcenverbrauch (stofflich, energetisch) als auch bei den Emissionen (u.a. klimaschädliche Treibhausgase). Um die Umweltwirkungen vergleichbar erfassen zu können, wurde in den letzten eineinhalb Jahrzehnten ein umfassendes Regelwerk im Rahmen des europäischen Normungsinstituts CEN entwickelt, das eine europaweit harmonisierte Struktur und eine standardisierte, quantitative Erfassung ermöglicht. Neben der Umweltdimension wurde auch die ökonomische und die soziale Dimension erfaßt, um dem Konzept der Nachhaltigkeit in ihren 3 Dimensionen gerecht zu werden. Der generelle Rahmen zur Bewertung von Gebäuden ist in der ÖNORM EN 15643-1 festgelegt (Schirmnorm“), jener zur Bewertung der Umweltqualität von Gebäuden im 2. Teil der ÖNORM EN 15643. Voraussetzung für eine quantitative Bewertung der Umweltqualität von Gebäuden ist eine Offenlegung der Umwelteigenschaften der in das Gebäude eingebauten Bauprodukte, was auf Basis der ÖNORM EN 15804 (letzte Ausgabe A2 von 2020) in Form von Umweltproduktdeklarationen (EPDs – Environmental Product Declarations) erfolgt. Die Gebäudebewertung in der sozialen und ökonomischen Dimension erfolgt auf Basis der ÖNORM EN 15643 Teile 3 und 4. Künftig wird die Normenreihe EN 15643-1 bis 5 in einer Norm zusammengefaßt.

Grundsätzlich gilt, daß der gesamte Lebensweg eines Bauprodukts bzw. in weiterer Folge eines Gebäudes abzubilden ist, was aber als zwangsläufiger Blick in die Zukunft nicht vollständig möglich ist, weshalb vielfach Szenarien zu Grunde gelegt werden müssen und es daher „abgestufte“ EPDs gibt (cardle to gate, cradle to grave, cradle to cradle). Für die meisten Bauprodukte werden heute EPDs von den Erzeugern zu Verfügung gestellt.

EPDs liefern somit die Basisinformationen über die Umweltwirkungen eines Bauprodukts, eine vergleichende Bewertung (ökologisch besser oder schlechter) ist mit solchen Deklarationen aber nicht möglich, da die Funktionalität – also der Nutzen - der Bauprodukts von Bedeutung ist. Es macht keinen Sinn, 1kg Holz, Beton oder Stahl miteinander zu vergleichen, da sich diese Baustoffe in ihren Eigenschaften erheblich voneinander unterscheiden. Vergleiche sind daher nur auf Bauteil- oder eben auf Gebäudeebene möglich und sinnvoll. Aufgrund der geringen Unterschiede in den Geschoßhöhen heutiger Gebäude hat sich im Hochbau der m² Nettogrundfläche (NGF) als zweckmäßig erwiesen, im Industriebau oder im Infrastrukturbau ist die Festlegung einer funktionalen Einheit (funktionales Äquivalent) um einiges komplexer.

In der Praxis erfolgt die Bilanzierung der Umweltwirkungen auf Basis einer Massenstromanalyse, die eingebauten Massen der Bauprodukte werden mit den Indikatoren der relevanten Umweltwirkungskategorien multipliziert, wobei verschiedene Gruppen im europäischen Regelwerk unterschieden werden:

- Indikatoren für Umweltwirkungen
- Indikatoren für den Einsatz von Ressourcen
- Indikatoren für zusätzliche Umweltaspekte

Eine detaillierte Auflistung aller Umweltindikatoren würde hier zu weit führen und ist für das Verständnis der Ergebnisse dieser Studie nicht erforderlich. Wesentliche Indikatoren, die auch viele Gebäudezertifizierungssysteme umfassen, sind z.B.

- Treibhauspotential (Emission klimaschädlicher Gase)

GWP

Bekleidungsebene. Nicht in diese Betrachtungsweise paßt ein monolithisches Mauerwerk, das meist aus mineralwollegefüllten, porosierten Hochlochziegeln mit Leichtmörtel als äußerer Putzschale besteht. Um auch einen – eingeschränkten! – Vergleich dieser „Fassade“ mit den anderen Systemen zu ermöglichen, wurde die Daten für das monolithische Mauerwerk inkl. Außenputz um jene des 25cm HLZ-Mauerwerks vermindert und so eine annähernd vergleichbare fiktive Fassade aus konventionellem Putz simuliert.

Für die Ermittlung der Umweltwirkungen mittels ökologischer Indikatoren gem. ÖNORM EN 15804 stehen folgende Datenquellen zur Verfügung:

- EPDs – Umweltproduktdeklarationen gem. ÖNORM EN 15804 der Bauprodukterzeuger, die von einschlägigen Programmbetreibern veröffentlicht und über deren Web-Seiten zum Download zu Verfügung stehen; in Österreich ist dies die Bau EPD GmbH (<https://www.bau-epd.at/>), in Deutschland das Institut Bauen und Umwelt e.V. (<https://ibu-epd.com/>).
- Baubook GmbH (<https://www.baubook.at/>): stellt umfangreiches Datenmaterial auf Grund der Angaben der Erzeuger zur Verfügung sowie einen Bauteilrechner, mit dessen Hilfe unterschiedliche Wandaufbauten generiert werden können oder auf standardisierte Aufbauten (z.B. aus dem Passivhauskatalog) zurückgegriffen werden kann. Weiters steht mit eco2soft eine (kostenpflichtige) Software zur Gebäudebilanzierung zur Verfügung.
- ÖKOBAUDAT (<https://oekobaudat.de/>): ist eine umfassende Bauproduktedatenbank, die vom deutschen Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (bisherige Bezeichnung) sowie dem Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) kostenlos bereitgestellt wird. Zur Bilanzierung von Gebäuden und Bauteilen dient zusätzlich die Software
- eLCA (<https://www.bauteileditor.de/>): eine Software, die auf die Daten der ÖKOBAUDAT zugreift und ein ebenfalls kostenloses Werkzeug zur Bilanzierung von Bauteilen und Gebäuden zur Verfügung stellt.

Mit Hilfe der genannten Datenbanken wurde nun versucht, die gewählten Fassadensysteme (jeweils ohne Wandbildner) zu bilanzieren, wobei nur die gängigen Ökoindikatoren für die Berechnung berücksichtigt wurden. Das sind (in der Reihenfolge der Darstellung lt. Baubook-Bauteilrechner):

| | |
|--------------|---------------------------------------|
| PENRT | primary energy non-renewable total |
| PENRE | primary energy non-renewable energy |
| PENRM | primary energy non-renewable material |
| GWP-total | global warming potential |
| GWP-fossil | global warming potential |
| GWP-biogenic | global warming potential |
| AP | acidation potential |
| EP | eutrophication potential |
| PERT | primary energy renewable total |
| PERE | primary energy renewable energy |
| PERM | primary energy renewable material |
| POCP | photooxidants creation potential |
| ODP | ozone depletion potential |

Zunächst wurden mittels Baubook und eLCA die Aufbauten in das jeweilige Programm eingegeben, wobei nicht alle Aufbauten in beiden Hintergrunddatenbanken verfügbar waren und teilweise die geplanten Aufbauten durch vergleichbare/ähnliche angenähert werden mußten. Aufgrund einiger Auffälligkeiten und Abweichungen wurden zusätzlich die EPDs der Einzelschichten zur Ermittlung der Ökoindikatoren herangezogen. Dabei ergab sich ein sehr heterogenes Bild: einzelne Werte stimmten

recht gut trotz unterschiedlicher Quellen überein, bei anderen ergaben sich beträchtlich Unterschiede, sodaß eine Weiterverwendung für eine vergleichende Bilanzierung nicht in Frage kam. Tab. 4 zeigt diese Unterschiede deutlich, wobei hier zu Vergleichszwecken nur 4 Schlüsselindikatoren herangezogen wurden, nämlich das Treibhauspotential (GWP), der gesamte Primärenergieaufwand nicht erneuerbar (PENRT), das Ozonabbaupotential (ODP) sowie das Photooxidantienpotential (POCP):

Tab. 4: Vergleich der aus verschiedenen datenquellen stammenden Ökoindikatoren

| | aus ÖKOBAUDAT abgeleitet | | | | | mittels eLCA gerechnet | | | |
|------------------------|--------------------------|-------|----------|--------|-------------------------|------------------------|-------|----------|---------|
| | GWP | PERNT | ODP | POCP | | GWP | PERNT | ODP | POCP |
| Systeme: | | | | | | | | | |
| WDVS EPS | 18,5 | 403 | 5,60E-08 | 0,065 | 16cm EPS | 16,7 | 335 | 9,49E-08 | 0,0702 |
| WDVS MW | 24,7 | 360 | 3,58E-07 | 0,0085 | 16cm MW gekl., gedübelt | 16,3 | 186 | 2,71E-08 | 0,0049 |
| VHF Holz | - | - | - | - | | -10,3 | 173 | 3,23E-07 | 0,0066 |
| VHF FZ | - | - | - | - | | 8,7 | 194 | 7,00E-08 | 0,0073 |
| VHF Aluverbund | - | - | - | - | | 39,7 | 534 | 2,70E-08 | 0,012 |
| VHF HPL | - | - | - | - | | 4,49 | 151 | 1,45E-07 | 0,0053 |
| Komponenten: | | | | | | | | | |
| Mauerziegel gefüllt MW | 67,3 | 678 | 2,20E-09 | 0,027 | auf 38cm umgerechnet | 74,8 | 745 | 2,13E-09 | 0,0108 |
| HLZ 25 | 28,2 | 295 | 1,64E-13 | 0,003 | auf 25cm umgerechnet | 94,5 | 995 | 6,05E-10 | 0,0135 |
| Differenz | 39,1 | 383 | 2,2E-09 | 0,024 | | -19,7 | -250 | 1,5E-09 | -0,0027 |
| Max Compact | 20,9 | 539 | 1,29E-10 | 0,0053 | | -1,51 | 121 | 1,80E-10 | 0,0006 |
| EPS-F | 7,6 | 227 | 7,22E-10 | 0,0469 | | 9,5 | 290 | 5,46E-08 | 0,0715 |
| Mineralwolle 16cm | 11,3 | 131 | 1,63E-13 | 0,0175 | | 11,6 | 136 | 2,70E-10 | 0,0042 |
| Nadelschnittholz getr. | -19,5 | 4,64 | 2,23E-15 | 0,0119 | auf 2,5cm umgerechnet | - | - | - | - |
| Faserzementplatte | 4,2 | 46,2 | 9,20E-12 | 0,0019 | auf 6mm umgerechnet | 4,4 | | 1,55E-11 | 0,0021 |
| Aluverbundplatten | - | - | - | - | | - | - | - | - |

| | aus EPDs abgeleitet | | | | | aus Baubook-Bauteilrechner | | | |
|------------------------|---------------------|-----|----------|--------|-------------|----------------------------|-------|----------|--------|
| Systeme: | | | | | | | | | |
| WDVS EPS | 20,1 | 428 | 5,61E-08 | 0,0657 | | 15,2 | 305 | 5,92E+07 | 0,0247 |
| WDVS MW | 24,7 | 360 | 3,58E-07 | 0,0085 | | 51,8 | 575 | 1,99E-06 | 0,1020 |
| VHF Holz | - | - | - | - | | - | - | - | - |
| VHF FZ | - | - | - | - | | 47,3 | 689 | 2,42E-06 | 0,0974 |
| VHF Aluverbund | - | - | - | - | | 108,0 | 1496 | 6,63E-06 | 0,1200 |
| VHF HPL | - | - | - | - | | - | - | - | - |
| Komponenten: | | | | | | | | | |
| Mauerziegel gefüllt MW | 55,0 | 604 | 1,11E-11 | 0,0051 | | 91,3 | 1979 | 9,11E-06 | 0,0277 |
| HLZ 25 | 28,3 | 295 | 1,64E-13 | 0,003 | | 36,4 | 459 | 3,34E-06 | 0,0096 |
| Differenz | 26,7 | 309 | 1,1E-11 | 0,0021 | | 54,9 | 1.520 | 5,77E-06 | 0,0181 |
| Max Compact | 20,9 | 539 | 1,29E-10 | 0,0053 | | - | - | - | - |
| EPS-F | 9,5 | 290 | 5,46E-08 | 0,0715 | | 10,0 | 237 | 3,17E-07 | 0,0162 |
| Mineralwolle 16cm | 8,2 | 152 | 8,40E-07 | 0,0059 | | 10,5 | 250 | 3,34E-07 | 0,0171 |
| Nadelschnittholz getr. | -17,4 | 32 | 1,39E-11 | 0,0016 | 2,5cm Dicke | - | - | - | - |
| Faserzementplatte | 11,9 | 137 | 9,66E-07 | 0,0022 | 6mm Dicke | 11,6 | 154 | 5,66E-07 | 0,0033 |
| Aluverbundplatten | 26,7 | 462 | 2,44E-10 | 0,0061 | | 71,9 | 961 | 4,78E-06 | 0,0257 |

Die grafische Darstellung der o.a. Kennwerte in Abb. 2 zeigt die Übereinstimmungen sowie die z.T. erheblichen Unterschiede zwischen der einzelnen Datenquellen.

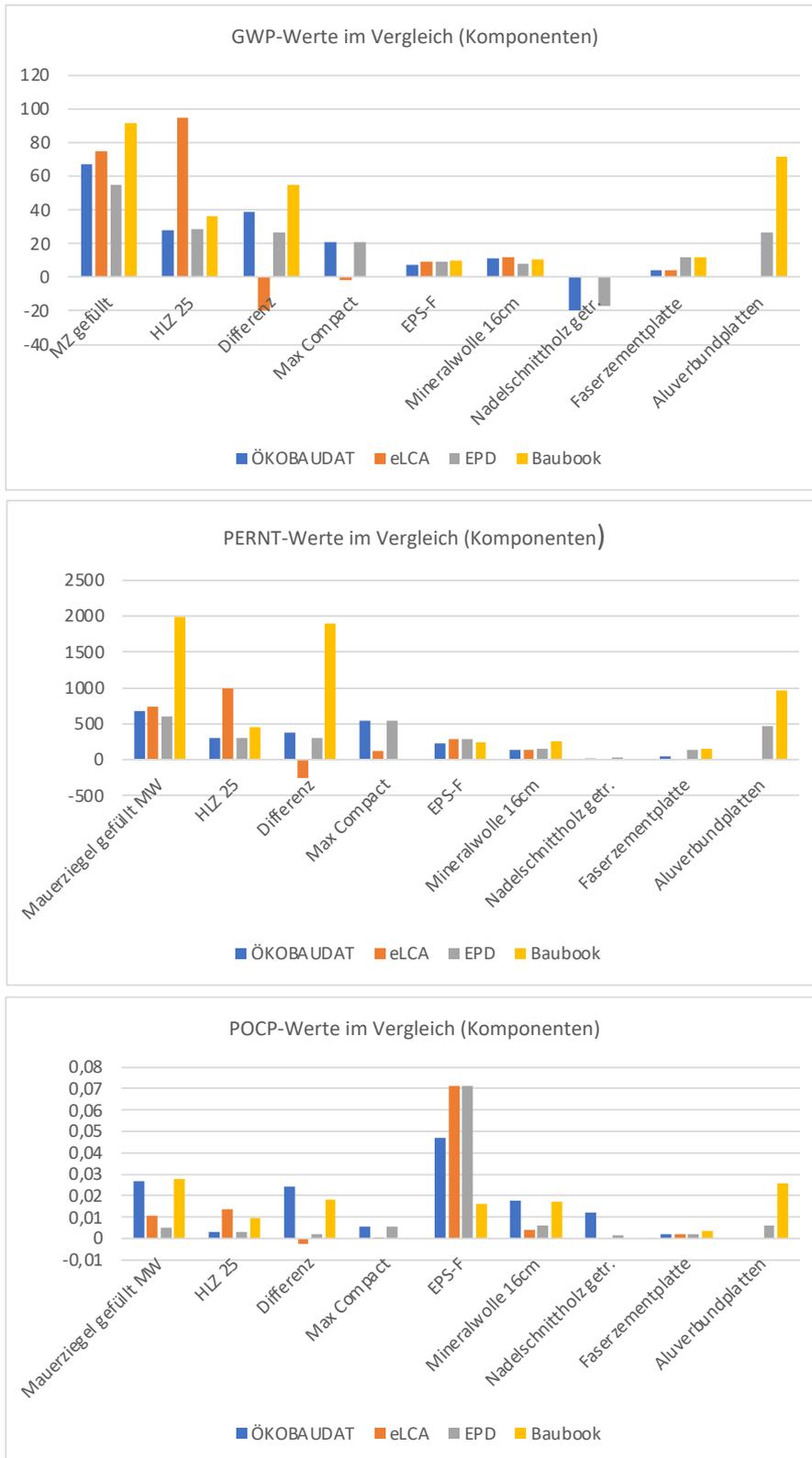


Abb. 2: Gegenüberstellung der Ökokennwerte der Komponenten für die Indikatoren GWP, PERNT sowie POCP

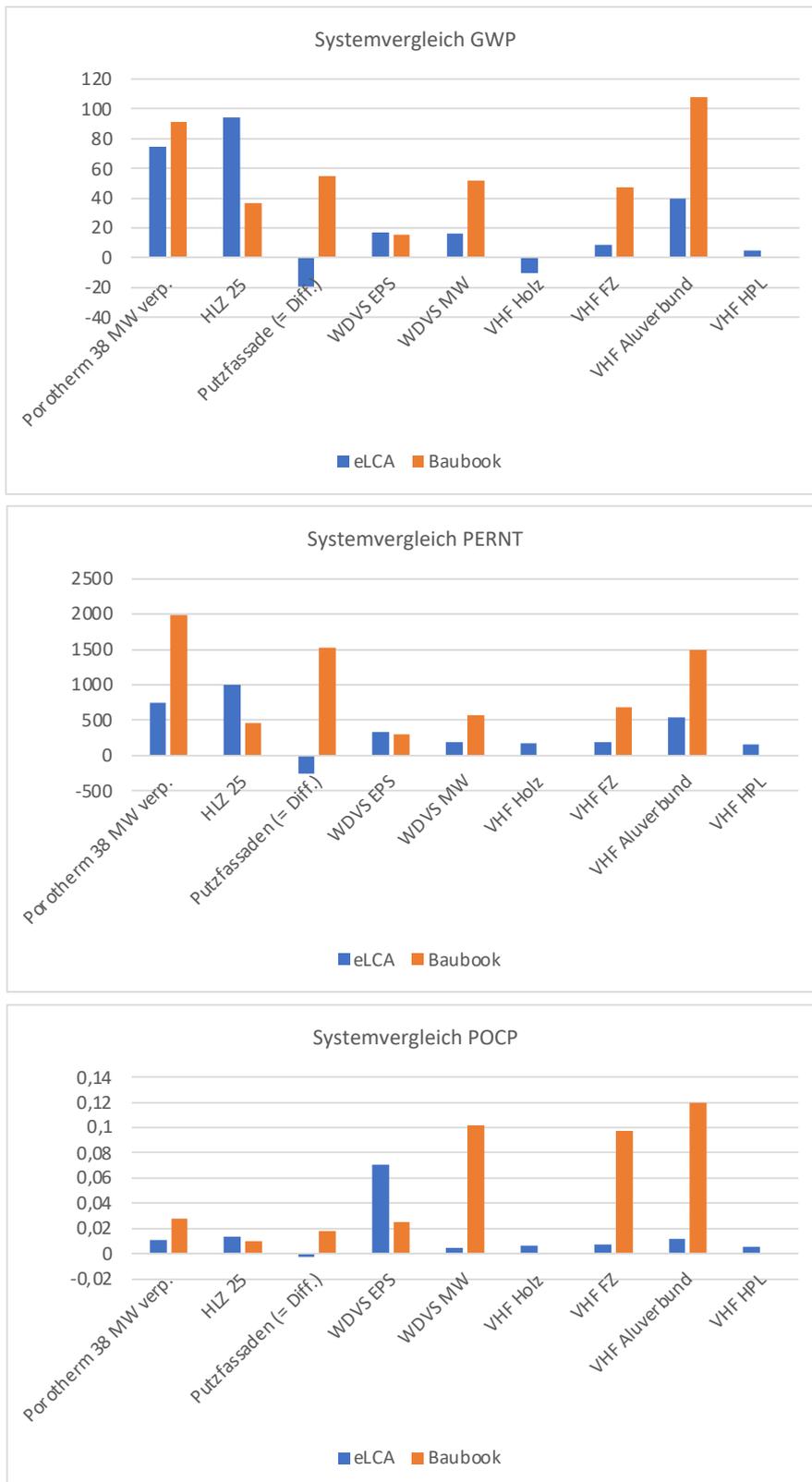


Abb. 3: Gegenüberstellung der Ökokennwerte der Komponenten für die Systeme GWP, PERNT sowie POCP

Die Werte für das Ozonabbaupotential ODP sind aufgrund der relativen Unterschiede in gleicher Weise nicht darstellbar.

Eine Verwendung dieser Daten für eine vergleichende Gegenüberstellung verschiedener Fassadensysteme aufgrund ihrer herstellungsbezogenen Umweltwirkungen erscheint demnach nicht möglich. Eine vertiefende Ermittlung der Ursachen für diese Unterschiede hätte den Rahmen der vorliegenden Studie gesprengt. Unabhängig davon sei auf folgende Probleme bzw. Unsicherheiten in der vergleichenden Ökobilanzierung von Bauteilen hingewiesen:

- Es werden sowohl generische als auch produktspezifische Daten verwendet (z.B. sogenannte Branchen-EPDs)
- Vom deutschen IBU bereitgestellte EPDs basieren in der Regel auf Hintergrunddaten der deutschen Datenbank GaBi (ganzheitliche Bilanzierung), jene der österreichischen Bau-EPD GmbH auf der Schweizer Datenbank ecoinvent (von der ETH Zürich bereitgestellt); diese Unterschiede sind seit langem bekannt, was dazu geführt hat, daß einzelne Hersteller (z.B. Wienerberger Ziegelindustrie) differenzierte EPDs mit Hintergrunddaten aus beiden Datenbanken bereitstellen.
- Im vorliegenden Fall wurde nur die Herstellungsphase bilanziert (A1 bis A3 gem. ÖNORM EN 15804), für die Nutzungs- und EoL-Phase (end of life) wären zusätzlich die Module B, C und D zu bilanzieren, was die Annahme verschiedenster Szenarien bedeutet. In Anbetracht der Unsicherheit der Basisdaten wurde davon Abstand genommen.
- Eine in einschlägigen Kreisen heftig diskutierte Frage betrifft den Modul D (über den Lebenszyklus hinausgehende Belastungen und Vorteile): dazu zählt z.B. die Tatsache, daß beispielsweise Holz während des Wachstums des Baumes CO₂ speichert, was sich mit einem negativen Wert im GWP (A1 bis A3 gem. Abb. 1) niederschlägt; beim Kompostieren oder Verbrennen von Holz (Modul D!) wird die gespeicherte Menge CO₂ jedoch wieder freigesetzt, weshalb Holz über den Lebenszyklus CO₂-neutral bilanziert. Wird nur cradle to gate (A1 bis A3) bilanziert, begünstigt dies - ohne sachliche Begründung - CO₂-speichernde Werkstoffe.
- Die meisten Hersteller veröffentlichen EPDs zu Bauprodukten, nicht jedoch zu Bausystemen (assembled systems) mit Ausnahme von WDV-S-Erzeugern, woraus ebenfalls Unterschiede zu jenen der Bauteilrechner resultieren.
- Eine „Milderung“ dieser Probleme (von „Lösung“ kann aufgrund zu erwartender neuer Fragestellungen wohl kaum die Rede sein) ist erst mit Verfügbarkeit einer europäischen Bauproduktedatenbank zu rechnen, von der wohl seit einigen Jahren die Rede ist, die jedoch noch immer nicht „auf Schiene“ ist.

Fazit: mit dem aktuellen Regelwerk sowie den darauf basierenden ökologischen Produktdatenbanken steht ein umfassender Datensatz nach europaweit harmonisierten Bewertungsregeln zur Verfügung, mit dem auf Gebäudeebene eine Abschätzung der Umweltwirkungen vorgenommen werden kann. Für vergleichende Bewertungen auf Bauteilebene als Grundlage für die Auswahl von Bauprodukten durch planende Architekten und Ingenieure ist ohne vertiefende Prüfung und Quervergleiche der einzelnen Bauprodukte nach verschiedenen Datenquellen abzuraten.

7.2 Kreislauffähigkeit

Die Anforderung „Kreislauffähigkeit von Bauprodukten“ hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen, was nicht nur dem stetig steigenden Umweltbewußtsein, sondern vor allem auch dem gestiegenen Wissen der Politik um einen dringenden Handlungsbedarf in diesem Bereich geschuldet ist, sowohl auf europäischer Ebene als auch – mit Verzögerung – auf nationale Ebene.

Aktuelle Treiber in Europa sind nach dem Kreislaufpaket des Europäischen Rats vor allem der Green Deal der Kommission sowie das darauf aufbauende New European Bauhaus (NEBH). Während der Green Deal sich die Dekarbonisierung der Industrie sowie die Kreislaufwirtschaft zum Ziel gesetzt hat, stellt das NEBH die Umsetzung des Green Deal im Gebäudesektor in den Fokus, ergänzt um die Themen

Baukultur und Inklusion. In Österreich ist Kreislaufwirtschaft auch im Übereinkommen der aktuellen Bundesregierung verankert, ebenso in der Initiative Circular City der Stadt Wien.

Versucht man, einen konkreten Handlungsbedarf zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft im Bausektor zu identifizieren, kommt man rasch zur Erkenntnis der Notwendigkeit, 2 Bereiche zu unterscheiden:

- **Rückbau (also verwertungsorientierter Abbruch) von Bestandsgebäuden:** dies ist primär ein Problem der Recyclingwirtschaft, wie vorhandene Baustoffe mit in der Vergangenheit entwickelten Fügetechniken demontiert, getrennt und in den Stoffkreislauf rückgeführt werden können; Dabei ist auch auf die Marktfähigkeit rezyklierter – und qualitätsgesicherter – Bauprodukte zu achten, die stark von der Preisdifferenz zu Primärprodukten abhängt.
- **Kreislauffähige Gebäude und Bauprodukte:** Planung solcher Gebäude unter Verwendung dafür geeigneter Bauprodukte, Fügetechniken und Einbaubedingungen. Das bedeutet, Gebäude so zu planen und zu errichten, daß die eingebauten Bauprodukte und -elemente – abgestimmt auf die entsprechende Nutzungsdauer - mit geringem Aufwand demontiert und im höchstmöglichen Ausmaß in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden können. Damit sollen nicht nur Ressourcen gespart werden, sondern auch das Abfallaufkommen langfristig reduziert werden.

Nicht zu trennen von der Kreislauffähigkeit ist auch die Dauerhaftigkeit von Bauprodukten: je kürzer die geplante oder tatsächliche Nutzungsdauer eines Gebäudes ist, desto wichtiger ist die Kreislauffähigkeit. Einerseits macht es wenig Sinn, für einen Industriebau mit einer Nutzungsdauer <20 Jahren besonders dauerhafte Bauprodukte auszuwählen, andererseits eignen sich unsachgemäß geplante/eingebaute Bauprodukte durch werkstoffspezifische Schädigungen (z.B. Korrosion von Eisenwerkstoffen, UV-versprödete Kunststoffe, durchfeuchtetes, pilzbefallenes Holz), also mit ungenügender Dauerhaftigkeit, wenig für ein stoffliches Recycling.

Die im Rahmen der vorliegenden Studie betrachteten Fassadensysteme verwenden mit Ausnahme von Aluminium praktisch keine Sekundärbaustoffe. Es ist zu hoffen, daß mit der neuen Bauprodukteverordnung (BPV) 2023 (?) und einer Konkretisierung der Grundanforderung 7 (u.a.: Bauwerke müssen ... rezyklierbar ... sein sowie mit einer künftigen OIB-Richtlinie 7 die nötige Verbindlichkeit und auch Rechtssicherheit für die Bauwirtschaft gegeben sein wird.

Anzumerken ist auch, daß bei mehreren Fassadenwerkstoffen die baupraktischen Usancen die theoretischen stofflichen Verwertungsmöglichkeiten nicht widerspiegeln. So wäre unbehandeltes Holz problemlos in Form von Fasern oder Spänen stofflich verwertbar (wenn auch in Form von Downcycling), wegen der meist nicht herauslösbaren metallischen Verbindungsmittel (Nägel, Schrauben etc.) wird es von Sägewerken ungern angenommen. Faserzement könnte granuliert und gemahlen werden, HPL-Platten thermisch verwertet oder Aluverbundplatten zerspant und eingeschmolzen werden, aufgrund der derzeit geringen Mengen und werkstoffspezifischer Besonderheiten landen diese Stoffe meist auf einer Deponie.

Eine qualitative Bewertung der behandelten Fassadensysteme nach den Grundsätzen der Kreislaufwirtschaft ist aus dem beiden nachfolgenden Tabellen ersichtlich.

Tab. 5: Bewertung der Kreislauffähigkeit verputzter Systeme

| | Verputzte Fassadensysteme (ohne Wandbildner betrachtet) | | |
|--|---|---|---|
| | Dämmputz (auf 38 HLZ Plan MW) | 16cm WDVS/EPS | 16cm WDVS/MW |
| Einsatz v. Sekundärbaustoffen | nicht möglich (außer EPS-Kügelchen im Leichtputz, = einmalige Verwertung) | nicht möglich | nicht möglich |
| Wiederverwendung von Bauteilschichten | nicht möglich | nicht möglich | nicht möglich |
| Demontierbarkeit | händisches oder maschinelles Abschlagen der Putzes | Abziehen von Ober- und Unterputz inkl. Gewebe möglich ("Stripping"), Abschlagen des Mörtelrandstreifens bei vollständiger Entfernung des WDVS; bei allfälligem Aufdoppeln Dämmstoffkombinationen gem. VAR 2019 beachten | grundsätzlich analog EPS, jedoch Ablösen der Putzschale ohne Beschädigung der MW-Platten kaum möglich |
| Trennbarkeit | Trennbarkeit mehrschichtiger Putzlagen bzw. vom Wandbildner nicht relevant, da beide dieselbe Verwertungsschiene durchlaufen; Putzschicht wegen Feinteile nicht verwertbar (gilt für alle mineral. Fraktionen $\leq 4\text{mm}$) | Gewebe vom Unterputz nicht trennbar, Trennung Putzschale - Dämmstoff möglich, jedoch mit anhaftenden Reststücken des Klebemörtels | Gewebe vom Unterputz nicht trennbar, Trennung Putzschale - Dämmstoff möglich, jedoch mit anhaftenden Reststücken des Klebemörtels |
| Rezyklierbarkeit (stoffliche Verwertung) | mineral. Putzschale wird mit HLZ-Mauerwerks abgebrochen, Feinteile nach Brechen/Sieben/Klassieren aussortiert und deponiert (am Markt nicht absetzbar, siehe oben) | Putzschale nicht rezyklierbar, Dämmstoff: meist einmalige Verwertung von zerkleinertem EPS möglich (Downcycling, kein echtes Recycling); neues Verfahren in Erprobung, breite Anwendbarkeit in Österreich kurzfristig nicht zu erwarten | Putzschale nicht rezyklierbar, Mineralwolle aktuell nicht rezyklierbar |
| Verbrennung | nicht brennbar - nicht relevant | thermische Verwertung in dafür geeigneten Verbrennungsanlagen möglich | nicht brennbar - nicht relevant |

Tab. 6: Bewertung der Kreislauffähigkeit vorgehängter, hinterlüfteter Systeme

| | Vorgehängte, hinterlüftete Fassadensysteme | | | |
|--|---|---|--|--|
| | VHF 16 MW + Holzschalung | VHF16 MW + Faserzement | VHF 16MW + Aluverbund | VHF 16MW + HPL |
| Einsatz v. Sekundärbaustoffen | nicht möglich | nicht möglich | Einsatz von Sekundäraluminium für Bleche und Profile | nicht möglich |
| Wiederverwendung von Bauteilschichten | Wiederverwendung von Lärchenbrettern vor Ablauf der Lebensdauer möglich, ebenso der Unterkonstruktion; meist unwirtschaftlich; Mineralwolle theoretisch wiederverwendbar, praktisch unrealistisch | Faserzementplatten vor Ablauf der Lebensdauer grundsätzlich wiederverwendbar, praktisch unrealistisch (Beschädigungen beim Demontieren) | Aluverbundplatten vor Ablauf der Lebensdauer grundsätzlich wiederverwendbar, praktisch unrealistisch (Beschädigung beim Demontieren, Mineralwolle theoretisch wiederverwendbar, praktisch unrealistisch) | Schichtstoffpreßplatten (HPL) vor Ablauf der Lebensdauer grundsätzlich wiederverwendbar, praktisch unrealistisch (Beschädigung beim Demontieren), Mineralwolle theoretisch wiederverwendbar, praktisch unrealistisch |
| Demontierbarkeit | von Hand gut demontierbar | von Hand gut demontierbar | von Hand gut demontierbar | von Hand gut demontierbar |
| Trennbarkeit | alle Komponenten leicht von Hand trennbar | alle Komponenten leicht von Hand trennbar | alle Komponenten leicht von Hand trennbar | alle Komponenten leicht von Hand trennbar |
| Rezyklierbarkeit (stoffliche Verwertung) | Holz ist unabhängig von der Holzart nur als Downcycling stofflich verwertbar, Problem: Nägel, Schrauben; Wiederverwendung anzustreben, Mineralwolle aktuell nicht rezyklierbar | Faserzementplatte sehr begrenzt rezyklierbar, Mineralwolle aktuell nicht rezyklierbar | Aluminiumplatten lt. Erzeugerangaben rezyklierbar, mitunter Probleme bei Abnahme; | Schichtstoffpreßplatten (HPL) nicht rezyklierbar |
| Verbrennung | unbehandeltes Holz ist in geeigneten Anlagen problemlos zu verbrennen, behandeltes in spez. Anlagen | nicht brennbar - nicht relevant; Unterkonstruktion aus unbehandeltem Holz problemlos zu verbrennen | nicht brennbar - nicht relevant; Unterkonstruktion aus unbehandeltem Holz problemlos zu verbrennen | thermische Verwertung; Unterkonstruktion aus unbehandeltem Holz problemlos zu verbrennen |

7.3 Dauerhaftigkeit und Lebensdauer

Die Vorhersage der Lebensdauer und damit die Dauerhaftigkeit von Bauprodukten oder Bauteilen unter höchst unterschiedlichen Einbaubedingungen ist ein höchst komplexes Unterfangen und in einzelnen Bereichen von vornherein zum Scheitern verurteilt. So liefert die Normenreihe ISO 15686 [22] mit der dort angeführten Faktor-Methode Anhaltspunkte, wie spezifische Randbedingungen durch Zu- oder Abschläge berücksichtigt werden können, für die tägliche Planungspraxis erscheint dieses Verfahren jedoch zu aufwendig. Insbesondere bei WDVS hängt die erreichbare Lebensdauer besonders stark von der Planungs- und Ausführungsqualität sowie von der laufenden Wartung und gegebenenfalls Instandsetzung ab. Vorgehängte Fassadensysteme sind vergleichsweise robuster, wenngleich auch hier erhebliche Unterschiede bestehen (z.B. Holz – Aluminium).

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die im Zuge der Literaturrecherche gefundenen Angaben bzw. Hinweise zu den Lebensdauern der einzelnen Systeme (Anm.: es wird nicht immer scharf zwischen Lebens- und Nutzungsdauer unterschieden!):

Tab. 7: Richtwerte für die Lebens/Nutzungsdauer nach Literaturangaben

| | NDK SV-Verband 2006 | NDK SV-Verband 2020 [15] | BTE-Arbeitsgruppe [18] | Nutzungsduern BNB [20] | IEMB 2006 [21] | IFB Lebensdauer der Bauteile ... [17] |
|---------------------|---------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|---------------------------------------|
| WDVS + EPS | 30-40 | | 40 ¹⁾ | 40 | 25-45 | 40 |
| WDVS + Mineralwolle | 30-40 | | 40 ¹⁾ | 40 | 25-45 | 40 |
| VHF + Stahl | 15-30 | 20-30 | 30-50 | 40 ⁴⁾ | 30-50 ⁶⁾ | 40 |
| VHF + Alu | 30- | 20-40 | 50 | ≥50 | 30-60 | |
| VHF + Faserzement | 40-60 | 30-40 | 35 | ≥50 | 50-100 | 60 |
| VHF + Lärche unbeh. | 15-50 | 25-40 | 30 ³⁾ | 30 ²⁾ | - | |
| VHF + Fichte beh. | 15-50 | 15-25 | 30 ³⁾ | 40 ⁵⁾ | 25-50 | 30 |

1) gilt für EPS und Mineralwolle

2) Nadelholz unbehandelt, keine Unterscheidung Lärche - Fichte

3) gilt für Holz, weich

4) Stahl galvanisch verzinkt

5) Nadelholz behandelt

6) Stahl verzinkt

In der Lebenszykluskostenrechnung gem. Abschnitt 7.5 wurde unterstellt, daß alle Systeme bzw. deren Bekleidungs-elemente eine Lebensdauer von 50 Jahren erreichen können, wobei deutlich darunterliegenden Erfahrungen bei einzelnen Systemen durch unterschiedliche Wartungsszenarien entsprochen wurde.

7.4 Schadensanfälligkeit

Bei allen untersuchten Fassadensystemen handelt es sich um ausgereifte und seit Jahrzehnten bewährte Konstruktionen, für die seitens der Erzeuger bzw. Systemlieferanten umfassende Produktinformationen sowie Ausführungs- und Verarbeitungsanleitungen zur Verfügung gestellt werden. Im Falle auftretender Schäden und Mängel sind die Ursachen in Planungs- und/oder Ausführungsmängeln zu suchen, bei Langzeitschäden vielfach auch in einer unzureichenden oder zumeist gänzlich fehlenden Wartung und Instandsetzung. Viele Gebäudeeigentümer und auch Hausverwaltungen gehen immer noch davon aus, daß ein einmal errichtetes Gebäude die nächsten Jahrzehnte keine Instandhaltung benötigt. Möglicherweise hat mit der ÖNORM B 1300 [69] langsam ein Umdenken begonnen.

Konventionelle Putzfassaden sind keine besonders anfälligen Systeme und zeigen im Falle von Schäden häufig vorkommende und bekannte Fehler wie unzureichender oder fehlender Vorspritz

(insbesondere auf schwierigen Untergründen), nicht abgestufte Festigkeiten der einzelnen Schichten (Abnahme der Festigkeit/Steifigkeit von innen nach außen) oder Mängel der Oberflächenstruktur. Dazu kommt häufig eine nicht putzgerechte Fassadenarchitektur wie große ebene Flächen ohne „Sollbruchstellen“ wie Kanten, Vorsprünge, ein- und ausspringende Ecken etc., die viele kleine Risse verursachen, aber wenige breite (und damit sichtbare) Risse vermeiden helfen.

Als ausgesprochen robust und wenig fehleranfällig sind jedenfalls vorgehängte, hinterlüftete Fassaden unabhängig von ihrem Bekleidungsmaterial anzusehen. Die Trennung der einzelnen Funktionen (Unterkonstruktion zur Befestigung der als Witterungsschutz dienenden Fassadenbekleidung, Wärmedämmung, Bekleidungsebene) vermeidet steile Temperaturgefälle und daraus resultierende Zwängungsspannungen, die Hinterlüftung bewirkt auch eine bauphysikalisch „robustere“ Konstruktion.

Anders verhält es sich mit Wärmedämmverbundsystemen. Aufgrund der hochwirksamen Wärmedämmung in Verbindung mit der starr und schubsteif verbundenen, gewebeverstärkten Putzschale entstehen aufgrund von Witterung und Sonneneinstrahlung hohe Zwängungsspannungen, die als Zugspannungen von Armierungsgewebe aufgenommen werden müssen, wenn in der steifen Putzschale keine Risse auftreten sollen. Über mehrere Jahre nicht verschlossene Risse erleichtern das Eindringen von Niederschlagswasser, was in Verbindung mit Frost und hohen Temperaturwechseln die Lebensdauer deutlich verringern kann. Daher benötigen WDVS deutlich mehr laufende Inspektion und Instandsetzung als alle anderen Systeme, wenn die von den Herstellern immer behauptete Lebensdauer von mehr als 30 ... 40 Jahren erreicht werden soll. Wie schon in [31] ausgeführt benötigen WDVS

- eine fachkundige, detaillierte Planung unter konsequenter Einhaltung der aktuellen Verarbeitungsrichtlinien,
- eine ebenso fachkundige wie sorgfältige Ausführung, ebenso unter konsequenter Einhaltung der aktuellen Verarbeitungsrichtlinien, sowie eine erfahrene örtliche Bauaufsicht,
- regelmäßige Inspektion der gesamten Fassade während der Nutzungsdauer einschl. kritischer Bereiche wie z.B. Sockel und Anschlüsse.

Unter diesen Voraussetzungen, die erfahrungsgemäß in der Praxis meist nicht gegeben sind, können auch WDVS die in sie gesetzten Erwartungen erfüllen.

7.5 Wirtschaftlichkeit und Lebenszykluskosten

Die Wirtschaftlichkeit von Fassadensystemen wird im Wesentlichen bestimmt von den Herstellungskosten, den Folgekosten sowie den Beseitigungskosten, alles in Verbindung mit der Lebens- bzw. Nutzungsdauer. Robustheit und Wartungsarmut, Aufwand und Intervalle der Reinigung sowie der Beitrag zum Erscheinungsbild beeinflussen auch den Verkehrswert einer Immobilie, je nachdem, welches Bewertungsverfahren zur Anwendung kommt. Im Rahmen einer technischen Due Diligence-Prüfung ist die Berücksichtigung dieser Eigenschaften unerlässlich.

7.5.1 Annahmen und Datengrundlagen

Standen bisher die Errichtungskosten (bzw. auf das eigentliche Bauwerk bezogen die Bauwerkskosten gem. ÖNORM B 1801-1) im Fokus von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, geht der Trend seit einigen Jahren in Richtung Lebenszykluskosten. Gemäß ÖNORM-Reihe B 1801 setzen sich diese zusammen aus den Errichtungskosten und den Folgekosten. Demnach zählen zu den Errichtungskosten die

- Bauwerkskosten: KG 2: Bauwerk - Rohbau, KG 3: Bauwerk - Technik, KG 3: Bauwerk-Ausbau, und den
- Kosten für Aufschließung, Einrichtung, Außenanlagen, Planungsleistungen, Nebenleistungen und Reserven

Im Gegensatz zu den Errichtungskosten, die zum Zeitpunkt $t=0$, also zu Beginn der Nutzungsdauer, anfallen, ergeben sich die Folgekosten verteilt über die ganze Nutzungsdauer, sowohl als regelmäßig als auch als unregelmäßig anfallende Kosten. Die Lebenszykluskosten können dabei addiert (im Sinne einer statischen Investitionsrechnung) oder auch entsprechend ihrem Anfallszeitpunkt auf den Bezugspunkt abgezinst werden (dynamische Investitionsrechnung). Als dynamisches Rechenverfahren wird meist die Barwertmethode verwendet. Diese ermöglicht, unterschiedliche Kosten-Zeit-Verläufe miteinander zu vergleichen. Der Barwert ist der auf einen Referenzzeitpunkt bezogene, abgezinste Wert zukünftiger Zahlungen (ÖNORM B 1801-4) und gibt an, welchen Betrag man zum Betrachtungszeitpunkt auf die Bank legen müßte, um davon bei einer Verzinsung von r alle Zahlungen im Betrachtungszeitraum zu leisten. Bei Neubauten ist der Referenzzeitpunkt jener der Übergabe des Objekts. Bei regelmäßigen Zahlungen ebenso wie bei Einzelzahlungen (Instandsetzungen, Austausch) sind auch die absehbaren Preissteigerungen zu berücksichtigen. Annahmen betreffend Zinssätze und Preissteigerungen werden von Zertifizierungssystemen meist vorgegeben (z.B. ÖGNI, DGNB).

Die Ermittlung des Barwerts regelmäßiger Zahlungen erfolgt gem. ÖNORM B 1801-4 nach folgender Formel:

$$k_n = k_o * \left(\frac{q}{d}\right) * \frac{\left(\left(\frac{q}{d}\right)^n - 1\right)}{\left(\frac{q}{d}\right) - 1} \quad (1)$$

Abzinsung und Preissteigerung werden für Einzelzahlungen nach folgender Formel berücksichtigt:

$$K_m = K_0 * \frac{q^m}{d^m} \quad (2)$$

wobei gilt:

- k_n Barwert jährlicher Zahlungen nach n Jahren
- k_o jährliche Zahlungen (Kosten)
- K_m Barwert einer einmaligen Zahlung nach m Jahren
- K_0 einmalige Zahlung
- r jährl. Rendite des eingesetzten Kapitals in %
- $d=1+r$ Abzinsungsfaktor
- p jährl. Preissteigerung in %
- $q=1+p$ Preissteigerungsrate

Die der Barwertmethode zu Grunde liegende Abzinsung hat jedoch die systemimmanente Eigenheit – und für Lebenszyklusbetrachtungen den Nachteil – daß Kosten umso weniger ins Gewicht fallen, je weiter sie in der Zukunft liegen. Die Auswahl höherwertige Bauprodukte und Bauteile, die dauerhafter und kreislauffähiger sind oder Vorteile in Reinigung und Instandsetzung aufweisen und meist teurer in der Anschaffung sind, wird dadurch „bestraft“, da sich der langfristige Kostenvorteil mit der Barwertmethode nicht darstellen läßt (abhängig vom angenommenen Zinssatz). Die Anwendung der Barwertmethode als (eine von mehreren) Entscheidungsgrundlagen bei der Auswahl von

Bauprodukten und -systemen ist daher kritisch zu sehen, zumal ja ohnehin höchst unsichere Annahmen betreffend die Kapitalmarktzinsen oder Baupreissteigerungen getroffen werden müssen. Eine kritische Auseinandersetzung mit diesem Problem oder gar eine Alternative in der Literatur ist dem Verfasser nicht bekannt.

Zusammengefaßt ist die Ermittlung von Lebenszykluskosten sowohl in der Phase der Projektentwicklung als Grundlage für Investitionsentscheidungen als auch in der Planung im Hinblick auf die Auswahl der Bauweisen und -produkte mit folgenden Unsicherheiten behaftet (was naturgemäß auch für Fassadensysteme und damit für die vorliegende Studie gilt):

- Die bisher relativ leicht einschätzbaren Herstellungskosten sind seit knapp 2 Jahren höchst volatil, Angebote verschiedener Firmen zu verschiedenen Zeitpunkten schwanken erheblich; die in der 2. Hälfte 2021 für diese Studie erhobenen Preise sind daher nur als Richtwerte anzusehen;
- Die objektbezogenen Randbedingungen beeinflussen auch die Preise, insbesondere die Folgekosten wie Inspektion, Reinigung oder Instandsetzung; diese hängt auch mit der Zugänglichkeit der jeweiligen Fassaden zusammen (Aufstiegshilfe, Arbeitsbühnen, Gerüste);
- Für die Kapitalmarktzinsen wurde ein Zinssatz von 2% angenommen (ÖGNI früher 5,5%, jetzt 3%), für die Baupreise eine jährliche Steigerung von 3%;
- Die Ermittlung der Lebenszykluskosten eines Gebäudes oder auch nur des Fassadensystems ermöglicht keine echte Prognose des Barwerts, sondern kann lediglich prüffähige und nachvollziehbare Einschätzungen auf Basis der zu Grunde gelegten Szenarien liefern.

7.5.2 Zu Grunde gelegte Wartungs- und Instandsetzungsszenarien

Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit einer Fassade ist aber neben den Herstellungskosten und der Lebensdauer aber auch der Wartungsaufwand, der wiederum, insbesondere bei WDVS, die Lebensdauer und damit die (wirtschaftliche) Nutzungsdauer beeinflusst. Da ein sinnvoller Wartungsaufwand von Objekt zu Objekt stark variieren kann und auch schwer vorherzusehen ist, müssen Szenarien angenommen werden. Der Lebenszykluskostenermittlung wurden folgende – realistisch erscheinende – Szenarien zu Grunde gelegt, wobei für WDVS-Fassaden 2 Extremszenarien angenommen wurden:

- Szenario „optimal“: regelmäßige Reinigung, Inspektion und kleine Instandsetzung; Lebensdauer 50 Jahre,
- Szenario „real“: sozusagen der zumeist anzutreffende Umgang mit WDVS, keine Reinigung, Wartung oder Instandsetzung, Lebensdauer 25 Jahre.

Allen anderen Fassadensystemen wurde eine rechnerische Lebens- und Nutzungsdauer („estimated service life“) von 50 Jahren zu Grunde gelegt, was auch die Annahme der meisten Gebäude-zertifizierungssysteme darstellt. Die nachstehende Tabelle zeigt die angenommenen Szenarien der LZK-Rechnung:

Tab. 8: Der Ermittlung der Folgekosten zu Grunde gelegte Szenarien für Reinigung, Inspektion, kleine Instandhaltung sowie Tausch und Rückbau

| | Bestandsdauer in Jahren | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| 38cm HLZ MW Leichtputz | | | | | | | | | | | |
| Reinigung | | | | | | ● | | | | | |
| Inspektion | | | | ○ | | ○ | | ○ | | ○ | |
| kl. Instandsetzung | | | | | ◇ | | | | | | |
| Tausch | | | | | | | | | | | |
| Rückbau inkl. Entsorgung | | | | | | | | | | | ■ |
| WDVS EPS + MW - optimal | | | | | | | | | | | |
| Reinigung | | | ● | | ● | | ● | | ● | | |
| Inspektion | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| kl. Instandsetzung | | | ◇ | | ◇ | | ◇ | | ◇ | | |
| Tausch | | | | | | | | | | | |
| Rückbau inkl. Entsorgung | | | | | | | | | | | ■ |
| WDVS EPS + MW - real | | | | | | | | | | | |
| Reinigung | | | | | | | | | | | |
| Inspektion | | | | | | | | | | | |
| kl. Instandsetzung | | | | | | | | | | | |
| Tausch | | | | | | ◆ | | | | | |
| Rückbau inkl. Entsorgung | | | | | | ■ | | | | | ■ |
| VHF Lärche | | | | | | | | | | | |
| Reinigung | | | | | | | | | | | |
| Inspektion | | | ○ | | ○ | | ○ | | ○ | | |
| kl. Instandsetzung | | | | | | ◇ | | | | | |
| Tausch | | | | | | | | | | | |
| Rückbau inkl. Entsorgung | | | | | | | | | | | ■ |
| VHF Fichte | | | | | | | | | | | |
| Reinigung | | | | | | | | | | | |
| Inspektion | | | ○ | | ○ | | ○ | | ○ | | |
| kl. Instandsetzung | | | | | | ◇ | | | | | |
| Tausch | | | | | | | | | | | |
| Rückbau inkl. Entsorgung | | | | | | | | | | | ■ |
| VHF Faserzement | | | | | | | | | | | |
| Reinigung | | | | | | ● | | | | | |
| Inspektion | | | | | | ○ | | | | | |
| kl. Instandsetzung | | | | | | ◇ | | | | | |
| Tausch | | | | | | | | | | | |
| Rückbau inkl. Entsorgung | | | | | | | | | | | ■ |
| VHF Aluverbund | | | | | | | | | | | |
| Reinigung | | | | | | ● | | | | | |
| Inspektion | | | | | | ○ | | | | | |
| kl. Instandsetzung | | | | | | ◇ | | | | | |
| Tausch | | | | | | | | | | | |
| Rückbau inkl. Entsorgung | | | | | | | | | | | ■ |
| VHF HPL | | | | | | | | | | | |
| Reinigung | | | | | | ● | | | | | |
| Inspektion | | | | | | ○ | | | | | |
| kl. Instandsetzung | | | | | | ◇ | | | | | |
| Tausch | | | | | | | | | | | |
| Rückbau inkl. Entsorgung | | | | | | | | | | | ■ |

Eine Übersicht über die aktuell (2. Halbjahr 2021) erhobenen Herstellungs- und Folgekosten sowie über die -wenn erforderlich – valorisierten Kosten aus und [3], [4] und [14] sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

7.5.3 Angenommene Herstellungs- und Folgekosten

Tab. 9: Erhobene und aus der Literatur abgeleitete Kosten in €/m² exkl. USt.

| | | Por. 38 Putz | WDVS- EPS | WDVS- MW | VHF- Lärche | VHF- Fichte | VHF-FZ | VHF-Alu | VHF-HPL |
|---------------------------|--------------------------|-----------------|--------------|-------------|----------------|----------------|----------|----------|----------|
| Herstellung | Kulmer | € 70,00 | € 90,00 | € 130,00 | € 195,00 | € 188,00 | € 263,00 | € 325,00 | € 265,00 |
| | Nussmüller | | € 75,00 | € 90,00 | € 195,00 | € 188,00 | € 240,00 | € 250,00 | € 190,00 |
| | Flögl (val.) | | € 79,00 | € 102,00 | | | € 237,00 | € 240,00 | € 244,00 |
| | Hasler 1 val. | | € 76,00 | € 99,00 | | € 156,00 | € 206,00 | | |
| | Hasler 2 | € 142,00 | € 79,00 | € 102,00 | € 148,00 | € 130,00 | € 195,00 | € 292,00 | |
| | gewählt | € 100,00 | € 90,00 | € 90,00 | € 195,00 | € 188,00 | € 240,00 | € 260,00 | € 190,00 |
| Inspektion | Kulmer | | € 3,50 | € 3,50 | | | | | |
| | Nussmüller | | € 1,00 | € 1,00 | | | | | |
| | Flögl | | | | | | | | |
| | gewählt | € 5,00 | € 5,00 | € 5,00 | € 2,00 | € 2,00 | € 2,00 | € 2,00 | € 2,00 |
| Reinigung | Kulmer inkl. Aufstiegsh. | | € 5,00 | € 5,00 | | | | | |
| | Nussmüller | | € 2,50 | € 2,50 | | | | | |
| | Flögl (val.) | | € 4,00 | € 4,00 | | | € 1,60 | € 1,60 | € 1,60 |
| | gewählt | | € 2,50 | € 2,50 | - | - | € 2,50 | € 2,50 | € 2,50 |
| kl. Instandsetzung | Kulmer inkl. Aufstiegsh. | | € 2,00 | € 2,00 | | | | | |
| | Nussmüller | | € 20,00 | € 20,00 | | | | | |
| | Flögl (val.) | | € 9,00 | € 12,00 | | | € 10,30 | € 10,40 | € 10,80 |
| | gewählt | € 20,00 | € 20,00 | € 20,00 | € 10,00 | € 10,00 | € 10,00 | € 10,00 | € 10,00 |
| Rückbau | Kulmer | € 23,00 | € 66,00 | € 85,00 | € 50,00 | € 50,00 | € 66,00 | € 65,00 | € 66,00 |
| | Nussmüller | | € 60,00 | € 30,00 | | | | | |
| | Flögl (val.) | | € 77,00 | € 70,00 | - | - | € 59,00 | € 50,00 | € 54,00 |
| | Hasler 2 | € 8,00 | € 16,00 | € 25,00 | € 35,00 | € 34,00 | € 35,00 | € 32,00 | |
| | gewählt | € 20,00 | € 60,00 | € 70,00 | € 35,00 | € 35,00 | € 65,00 | € 60,00 | € 65,00 |

Aus der Tabelle 9 sind die aktuell höchst unterschiedlichen, aus verschiedenen Quellen (Bauunternehmung, Architekturbüro, z.T. valorisierte Literaturwerte) stammenden Kostenansätze für Herstellungs- und Folgekosten ersichtlich, ebenso, welche der weiteren Ermittlung der Lebenszykluskosten zu Grunde gelegt wurden. In der folgenden Tabelle 10 wurden die während der Nutzungsphase anfallenden Kosten auf jährlich anfallende umgerechnet.

Tab. 10: Angenommene Folgekosten

Angenommene Kosten je Arbeitsgang und m2 Fassadenfläche (exkl. USt)

| | | Δ HLZ 38 LP - HLZ 25 | WDVS- EPS optimal | WDVS- EPS real | WDVS- MW optimal | WDVS- MW-real | VHF- Lärche | VHF- Fichte | VHF- Faser- zement | VHF- Alu | VHF- HPL |
|--------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|------------------|----------------|----------------|--------------------------|-------------|-------------|
| Herstellung | Kosten | € 40,00 | € 90,00 | € 90,00 | € 130,00 | € 130,00 | € 195,00 | € 188,00 | € 240,00 | € 260,00 | € 190,00 |
| Inspektion | Kosten | € 5,00 | € 5,00 | € 5,00 | € 5,00 | € 5,00 | € 2,00 | € 2,00 | € 2,00 | € 2,00 | € 2,00 |
| | Häufigkeit in 50a | 4 | 4 | 0 | 4 | 0 | 4 | 4 | 1 | 1 | 1 |
| Reinigung | Kosten | € 2,50 | € 2,50 | € 2,50 | € 2,50 | € 2,50 | € 2,50 | € 2,50 | € 2,50 | € 2,50 | € 2,50 |
| | Häufigkeit in 50a | 1 | 4 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| kl. Instandsetzung | Kosten | € 20,00 | € 20,00 | | € 20,00 | | € 10,00 | € 10,00 | € 10,00 | € 10,00 | € 10,00 |
| | Häufigkeit in 50a | 1 | 4 | 0 | 4 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Rückbau | Kosten | € 20,00 | € 60,00 | € 60,00 | € 70,00 | € 70,00 | € 35,00 | € 35,00 | € 65,00 | € 60,00 | € 65,00 |

Jährliche Kosten der mehrmals anfallenden Leistungen je m2 Fassadenfläche (umgerechnet auf jährlichen Anfall, exkl. USt)

| | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-----------|--------|--------|-----|--------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| Inspektion | aliquote | € 0,40 | € 0,40 | € - | € 0,40 | € - | € 0,16 | € 0,16 | € 0,04 | € 0,04 | € 0,04 |
| Reinigung | jährliche | € 0,05 | € 0,20 | € - | € 0,20 | € - | € - | € - | € 0,05 | € 0,05 | € 0,05 |
| kl. Instandsetzung | Kosten | € 0,40 | € 1,60 | € - | € 1,60 | € - | € 0,20 | € 0,20 | € 0,20 | € 0,20 | € 0,20 |
| Σ jährliche Folgekosten | | € 0,85 | € 2,20 | € - | € 2,20 | € - | € 0,36 | € 0,36 | € 0,29 | € 0,29 | € 0,29 |

7.5.4 Barwertermittlung für die einzelnen Fassadensysteme

Die nachstehende Tabelle stellt die in den vorangegangenen Abschnitten ermittelten Kosten für die einzelnen Systeme gegenüber und ermittelt den Barwert in € je m² Fassadenfläche aufgrund der folgenden Annahmen:

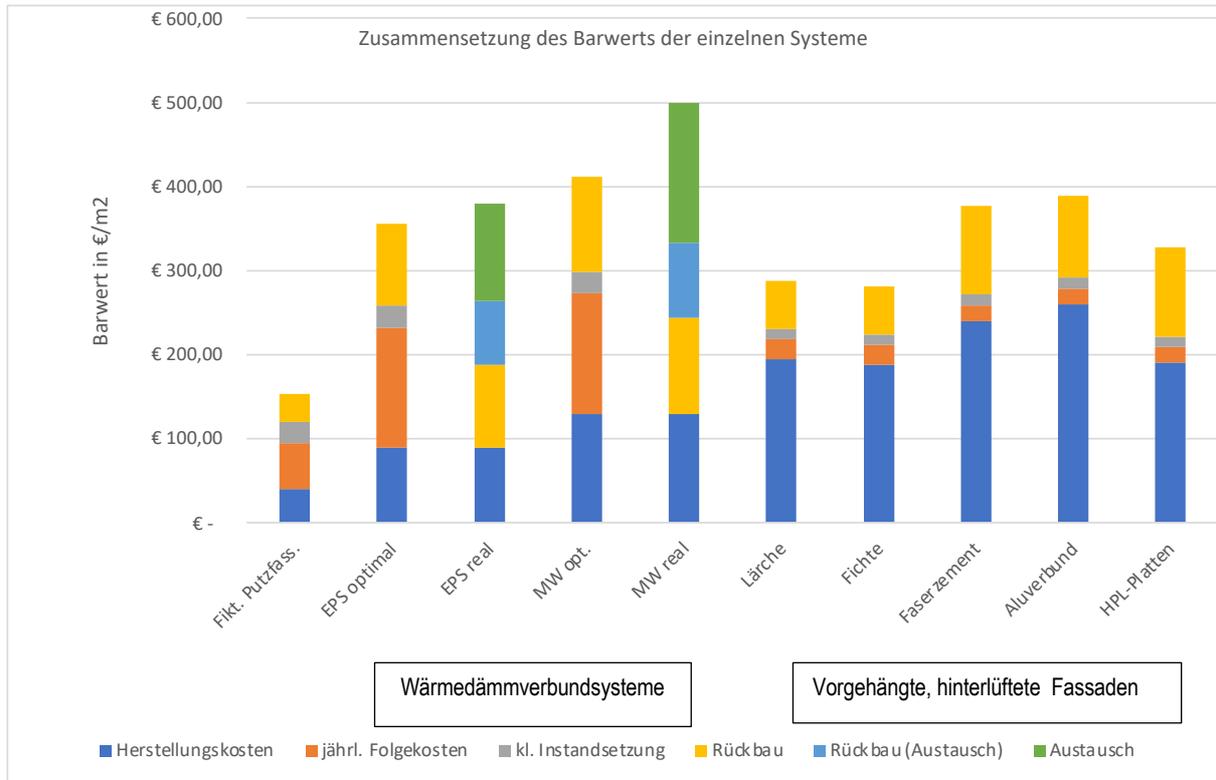
Tab. 11: Barwertermittlung für die einzelnen Systeme

| | |
|----------------------------------|-------|
| angenommene Nutzungsdauer | 50 |
| r ... Jährliche Rendite | 2,0% |
| Abzinsungsfaktor d = 1 + r | 1,020 |
| p ... Jährliche Preissteigerung | 3,0% |
| Preissteigerungsfaktor q = 1 + p | 1,03 |

| | Anfallszeitpunkt (nach ... Jahren) | Δ HLZ 38 LP - HLZ 25 | WDVS- EPS optimal | WDVS- EPS real | WDVS- MW optimal | WDVS- MW-real | VHF- Lärche | VHF- Fichte | VHF- Faser- zement | VHF- Alu | VHF- HPL |
|------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|------------------|----------------|----------------|--------------------------|--------------|--------------|
| Herstellungskosten | 0 | € 40,00 | € 90,00 | € 90,00 | € 130,00 | € 130,00 | € 195,00 | € 188,00 | € 240,00 | € 260,00 | € 190,00 |
| jährl. Folgekosten | jährlich | € 55,05 | € 142,47 | € - | € 142,47 | € - | € 23,31 | € 23,31 | € 18,78 | € 18,78 | € 18,78 |
| kl. Instandsetzung | 25 | € 25,52 | € 25,52 | € - | € 25,52 | € - | € 12,76 | € 12,76 | € 12,76 | € 12,76 | € 12,76 |
| Rückbau | 50 | € 32,57 | € 97,72 | € 97,72 | € 114,01 | € 114,01 | € 57,01 | € 57,01 | € 105,87 | € 97,72 | € 105,87 |
| Rückbau (Austausch) | 25 | € - | € - | € 76,57 | € - | € 89,34 | € - | € - | € - | € - | € - |
| Austausch | 25 | € - | € - | € 114,86 | € - | € 165,91 | € - | € - | € - | € - | € - |
| Σ Barwert | | € 153 | € 356 | € 379 | € 412 | € 499 | € 288 | € 281 | € 377 | € 389 | € 327 |

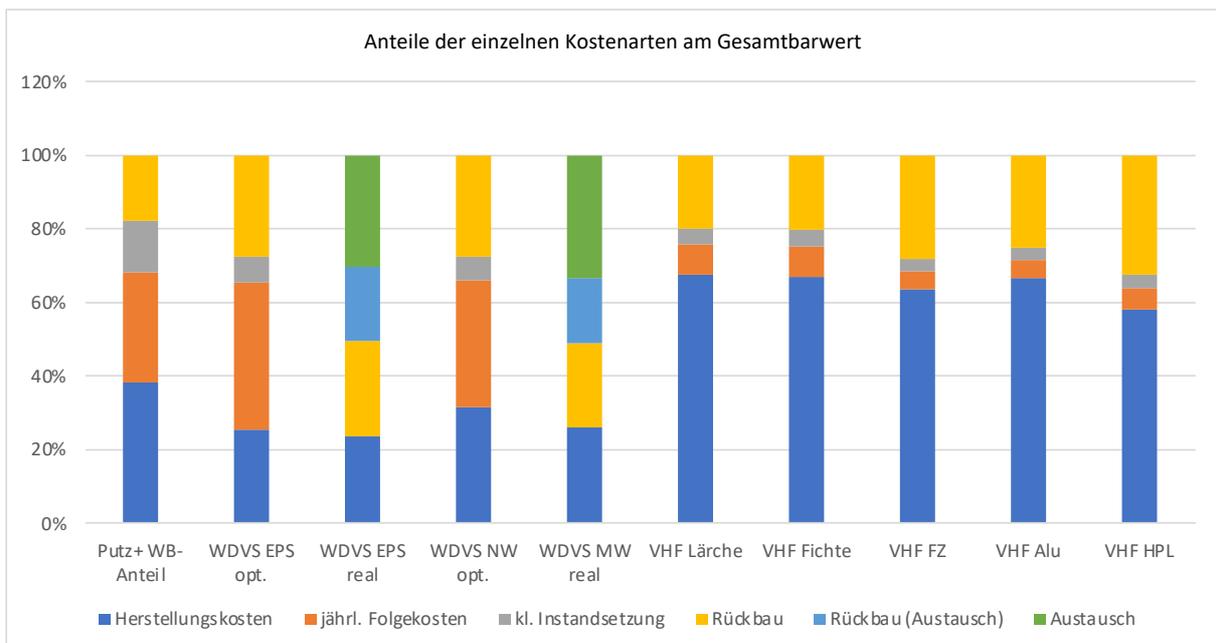
Abb. 4 zeigt die Anteile der jeweiligen Kostenarten am Gesamtbarwert der einzelnen Fassadensysteme im direkten Vergleich:

Abb. 4: Anteile der einzelnen Kostenarten am Gesamtbarwert



Bezogen auf Gesamtbarwert ergibt sich folgendes Bild:

Abb. 5: Auf den Gesamtbarwert bezogene Teilbarwerte



Zusammengefaßt läßt sich sagen, daß die Ergebnisse der Untersuchungen in [3], [4] und [14] bestätigt wurden: demnach schlägt ein höherer Aufwand in der Nutzungsphase für Inspektion, Wartung,

Reinigung oder Instandsetzung, vor allem aber ein vorzeitiger Austausch zufolge Alterung voll auf die Lebenszykluskosten durch. Dies gilt auch für den Barwert der Investitionen in die Fassade trotz Abzinsung, im gegenständlichen Fall unter Annahme einer Kapitalverzinsung von 2% p.a.

8 Fazit, Ausblick und zusammenfassende Bewertung

8.1 Fazit

Die untersuchten Fassadensysteme sind durchwegs als technisch ausgereift anzusehen, die bei konsequenter Einhaltung der einschlägigen Regelwerke (technische Normen, Verarbeitungsrichtlinien und -empfehlungen der Hersteller, Produktdatenblätter) in Planung, Ausführung und Wartung/Instandhaltung die in sie gestellten Erwartungen erfüllen und technische Lebensdauern von 50 Jahren und darüber erreichen können. Erfahrungsgemäß ist dies in der Praxis oft nicht der Fall. Je nach Robustheit der Systeme (im Sinne von Funktionserfüllung bei außerplanmäßigen Einwirkungen, Fehlern in Planung und Ausführung oder unzureichender Wartung) zeigen die betrachteten Systeme unterschiedliche Abweichungen von der erwarteten Lebensdauer („estimated service life“), was zu höchst unterschiedlichen Erfahrungen und Einschätzungen unter Baupraktikern führt.

Die monolithische Außenwand (HLZ mineralwolle-gefüllt mit Leichtputz ist nur bedingt mit den anderen Systemen vergleichbar, übernimmt doch der Wandbildner auch einen Teil der Funktion der eigentlichen Fassaden. Sie vereint hohe Wirtschaftlichkeit mit Reparaturfähigkeit, erfordert jedoch sorgfältige Ausführung der dünnen Klebemörtelschichten. Die Trennung des keramischen Scherbens von der (aktuell nicht rezyklierbaren) Mineralwolle erhöht die Aufbereitungskosten beim Recycling.

WDVS eilt der Ruf geringerer Lebensdauer voraus, was sich aus den verfügbaren Forschungsarbeiten nicht verallgemeinernd ableiten läßt. Tatsache ist, daß WDVS mit EPS oder auch MW als Dämmstoff sehr empfindlich gegenüber Planungsfehlern und Ausführungsmängeln sind und darüber hinaus laufender Wartung und gegebenenfalls auch Instandsetzung bedürfen. Daher schlägt sich eine verkürzte Lebensdauer ebenso wie ein Reinigungs- und Wartungsaufwand in entsprechend höheren Lebenszykluskosten nieder. Nicht HBCD-haltiges WPS kann granuliert und (begrenzt) verwertet werden, HBCD-haltiges ist stofflich derzeit nicht verwertbar (thermische Verwertung). Für Mineralwolle existieren derzeit keine Verwertungsmöglichkeiten (was auch für VHF-Fassaden gilt).

Hinterlüftete Fassaden mit Holz als Bekleidungswerkstoff sind als vergleichsweise robust anzusehen, die nur geringe Anforderungen an Wartung und Instandsetzung stellen. Eine Reinigung ist meist nicht erforderlich. Unabhängig von der verwendeten Holzart zeigen sie jedoch in den ersten Jahren erhebliche Farbänderungen, was durch Vorvergrauung zum Teil kompensiert werden kann. Lebensdauer und mittel- bis langfristiges Erscheinungsbild werden durch Planung und konstruktive Ausführung (Faserrichtung, Fugenausbildung, konstruktiver Holzschutz) erheblich beeinflusst, was eine werkstofforientierte Architektur verlangt, die eine ästhetische Bewertung nicht vor 5 bis 10 Jahren Bewitterung zuläßt. Etwas höhere Herstellungskosten stehen vergleichsweise geringen Folgekosten gegenüber.

Hinterlüftete Fassaden mit Faserzement, Aluverbund- oder HPL-Platten (high pressure laminated) stellen sehr robuste und flexible Systeme dar, die allerdings vergleichsweise hohe Herstellungskosten aufweisen und daher – insbesondere im geförderten – Wohnbau kaum zur Anwendung kommen. Lebensdauern >50 Jahre sind durchaus möglich, insbesondere bei Aluminium als Bekleidungselement. Die plattenförmigen Bekleidungselemente ermöglichen einen problemlosen Plattentausch bzw. örtliche Reparaturen. Die Problematik der aktuell nicht möglichen stofflichen Verwertung von Mineralwolle gilt naturgemäß auch für diese Systeme.

8.2 Schlußfolgerungen und Ausblick

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß aus langfristiger ökonomischer Sicht ein dringender Handlungsbedarf besteht, wie Herstellungs- und Folgekosten in künftige Finanzierungsmodelle bzw. in die Wohnbauförderung integriert werden können, zumal alle einschlägigen Förderungsmodelle auf die Herstellungskosten abgestimmt sind. Aufgrund der höchst unterschiedlichen Randbedingungen verschiedener Wohnbauprojekte lassen sich Folgekostenprognosen (besser: Einschätzungen) nur schwer präziser bzw. „belastbarer“ ermitteln. Im Sinne des in der „Nachhaltigkeitsszene“ verbreiteten Schlagworts „Nutzen statt Kaufen“ wäre zu prüfen, wie weit aus der TGA bekannte Contracting-Modelle nicht auf Fassaden erweitert werden könnten, zumal die Fassade den Energiebedarf eines Gebäudes neben dem Heizsystem erheblich mitbestimmt. Die künftig notwendige verstärkte Integration von Photovoltaik in die Fassaden könnte einen zusätzlichen Anreiz darstellen. Damit wäre auch das auch für Fassaden relevante Investor-Nutzer-Dilemma entschärft, da ein Anbieter ein klares Interesse haben muß, langfristig niedrige Kosten (Herstellung und Betrieb) sicherzustellen.

In diesem Zusammenhang ist auch darauf hinzuweisen, daß Fassaden, insbesondere im Wohnbau, künftig neben den Funktionen Erscheinungsbild und (thermische) Gebäudehülle auch jene der Erzeugung erneuerbarer Energie erfüllen müssen. Neben der Kreislauffähigkeit wird auch bei entsprechender Orientierung auch die Integration von PV-Modulen in Neubau und Sanierung erheblich an Bedeutung gewinnen. Schließlich können Fassaden einen wesentlichen Beitrag zur Umsetzung von Green Deal, European Bauhaus, Kreislaufwirtschaftsstrategie und anderen Initiativen beitragen. Dies wird bei der Weiterentwicklung bestehender Fassadensysteme zu beachten sein.

8.3 Zusammengefaßte Bewertung (Bewertungsmatrix)

„Für den eiligen Leser“, also für Praktiker aus Planung und Ausschreibung, die erfahrungsgemäß nicht die Zeit haben, Forschungsberichte zu lesen, dient im Anhang die Bewertungsmatrix, die eine kurze, zusammengefaßte Bewertung der Eigenschaften der untersuchten Fassadensysteme darstellt. Das Schema zur Grobbewertung (Ampelsystem) stellt kein wissenschaftlich fundiertes Bewertungssystem im Sinne einer ABC-Analyse aufgrund quantitativer, prüffähiger Daten dar, sondern soll dem Praktiker bei Auftraggebern und Planern einen raschen Überblick über Vor- und Nachteile der untersuchten Fassadensysteme in den jeweiligen Bereichen liefern.

Es liegt in der Verantwortung des Planers, ausgehend von den Vorgaben des Auftraggebers entsprechend den projektspezifischen Randbedingungen das jeweils optimale System auszuwählen. Die der LZK-Rechnung zugrunde gelegten Preise sind nicht zuletzt in Anbetracht der aktuellen Volatilität nur als grobe Richtwerte zu verstehen. Ähnliches gilt auch für die Kapitalverzinsung sowie die Baupreissteigerungen, die der aktuellen Entwicklung entsprechend festzulegen sind.

Anhang: Bewertungsmatrix (Format A3)

Rechenschema zur Ermittlung der Lebenszykluskosten (Barwert) für frei wählbare Herstellungs- und Folgekosten der einzelnen Fassadensysteme sowie Zinssätze und Preissteigerungen

Literaturverzeichnis

- [1] Pech, A. (Hrsg.), Pommer, G., Zeininger, J., Fassaden, Springer Wien-New York, 2014
- [2] Heusler, W., Kadija, K., Gebäudehüllen gestern, heute und morgen, in: Bauphysik Kalender 2017, Ernst&Sohn Berlin, 2017
- [3] Hasler, E., Fassadensysteme im Fokus der Lebenszyklusbetrachtung, Studie im Auftrag der WKO Steiermark, Landesinnung Bau, 2016
- [4] Hasler, E., Fassadensysteme im Fokus der Lebenszyklusbetrachtung - Ergänzung, Studie im Auftrag der WKO Oberösterreich, 2021
- [5] Baunetzwissen, Anforderungen an Fassaden,
<https://www.baunetzwissen.de/fassade/fachwissen/grundlagen/anforderungen-an-fassaden-1451893>
- [6] Hasler, E., Bewertung unterschiedlicher Fassadenkonstruktionen unter Lebens-zyklusaspekten mit einer Fallstudie Bürogebäude, Bauphysik 35 (2013), Heft 4, Ernst&Sohn
- [7] ÖGNI – Österr. Gesellschaft für nachhaltige Immobilienwirtschaft, Die Fassade der Zukunft – Ein Positionspapier der Arbeitsgruppe Fassaden der ÖGNI, 2021
- [8] Bogenstätter, U., Technische Lebensdauer von Bauteilen, ca. 6100 Datensätze nach DIN 276, ifBOR 2018
- [9] Tersluisen, A. et al., Untersuchung zeitgemäßer monolithischer Wandaufbauten hinsichtlich bauphysikalischer, ökologischer und ökonomischer Eigenschaften, Bericht zum Forschungsvorhaben F 3064, Fraunhofer IRB, 2018
- [10] Unger, T., Leitschuh, St., König H., Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden, Kurzfassung zum Forschungsvorhaben im Auftrag des Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Energie und Technologie und des Bayerischen Landesamts für Umwelt, 2018
- [11] Lützkendorf, T., Lorenz, D., Nachhaltigkeit in der Wohnungswirtschaft, in: Arnold, D., Rottke, N., Winter, R. (Hrsg.), Wohnimmobilien – Lebenszyklus, Strategie, Transaktion, Springer Gabler, 2017
- [12] Waltenberger, L., Lebenszykluskosten und Ökobilanzierung von Fassadensystemen im Industriebau, Diplomarbeit, TU Wien, 2011
- [13] Guttenbrunner, R., Ökologischer und ökonomischer Vergleich von Außenwandaufbauten im mehrgeschoßigen Wohnbau n Österreich, Master Thesis im Rahmen des Universitätslehrgangs „Nachhaltiges Bauen“, TU Graz/TU Wien, 2015
- [14] Ipser, C., Flögl, H., Radinger, G., Lebenszykluskosten von Fassaden, Abschlußbericht zum Forschungsprojekt „Lebenszyklusanalyse hinterlüfteter Fassaden“ im Auftrag des ÖFHF-Österr. Fachverband für hinterlüftete Fassaden, Krems, 2015
- [15] Hauptverband d. allg. beeid. u. gerichtl. zert. Sachverständigen, LV Steiermark und Kärnten, Der Nutzungsdauerkatalog baulicher Anlagen und Anlagenteile, Graz, 2020
- [16] Bahr, C., Lennerts, K., Lebens- und Nutzungsdauer von Bauteilen, Endbericht zum Forschungsvorhaben im Auftrag des BBSR und des BBR, 2010
- [17] IFB – Institut für Bauforschung, Lebensdauer der Baustoffe und Bauteile zur Harmonisierung der wirtschaftlichen Nutzungsdauer im Wohnungsbau, Endbericht zum Forschungsvorhaben F 2464 , IRB Baufachinformation, 2005 (?)
- [18] BTE - Bund technischer Experten, Lebensdauer von Bauteilen, Zeitwerte, Arbeitsblatt der BTE-Arbeitsgruppe Lebensdauer von Bauteilen, ohne Datum
- [19] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Leitfaden Nachhaltiges Bauen, herausgegeben vom BMVBS, 2. Auflage Berlin, 2011

- [20] BBSR, Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen BNB, Stand: 24.2.2017, <https://www.nachhaltigesbauen.de/austausch/nutzungsdauern-von-bauteilen/>
- [21] IEMB-Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V. an der TU Berlin, Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten, BMVBS und BBSR, 2006
- [22] ISO 15686-Reihe, Buildings and Constructed Assets, Service Life Planning, Teile 1 bis 11, unterschiedliche Ausgabedaten
- [23] Hasler, E., Huber, Ch., Leindecker H., Schrag, T., Stocker, E., Wartha, Ch., Bewertung unterschiedlicher Fassadenkonstruktionen unter Lebenszyklusaspekten mit einer Fallstudie Bürogebäude, Bauphysik 35 (2013), S. 250 - 256
- [24] S-E-E, carbotech, iBF, Langzeitverhalten von EPS-Dämmstoffen, 2. Teil einer Studie über die Nachhaltigkeit von EPS, Auszug aus einer Studie „Alterungsbeständigkeit von EPS mit Langzeitnachweis im Auftrag des EPS-Verbandes, 2004
- [25] Ökokauf der Stadt Wien, Kriterienkatalog 07001, Dämmstoffe aus geschäumten Kunststoffen, Ökologische Kriterien für die Beschaffung von Dämmstoffen aus geschäumten Kunststoffen Wien, 2011
- [26] Fitz, C., Künzel, H., Alterungsverhalten von Mineralwolleplatten in Wärmedämmverbundsystemen, Bauphysik 31 (2009), Heft 3, S. 186 – 191
- [27] ETAG 004, Außenseitige Wärmedämmverbundsysteme mit Putzschicht, Ausgabe 2000/11/13, Leitlinie für die Europäische Technische Zulassung, EOTA 2013
- [28] Hladik, M., Lebensdauer von WDVS-Fassaden, in: Hladik, M. (Hrsg.), Gebäudehülle im Fokus. Planung – Konstruktion – Auauführung – Technologie – Bauschäden, Fraunhofer IRB, 2012
- [29] Pommer, G., Pöhn, Ch., Nachhaltigkeit der thermischen Sanierung der Fassaden von Wohnbauten im Auftrag der Magistratsabteilung 50, Teil I, Dauerhaftigkeit von Wärmedämmverbundsystemen, MA 39 – VFA-der Stadt Wien, Wr. Wohnbau-forschung, 2006
- [30] Künzel, H., Künzl, H.M., Sedlbauer, K., Langzeitverhalten von Wärmedämmverbundsystemen, IPB-Mitteilung 461, 32 (2005) Forschungsergebnisse kurz gefaßt, Fraunhofer Institut für Bauphysik
- [31] Hladik, M., Wärmedämmverbundsysteme – Von der Planung bis zur Sanierung, Fortbildungsseminar des Hauptverbandes der allg. beeid. und gerichtl zert. Sachverständigen, LV Oberösterreich und Salzburg, Nov. 2021
- [32] QG Wärmedämmsysteme, Verarbeitungsrichtlinie VAR 2019, technische Richtlinien und Detailzeichnungen, Ausgabe 1.1.2019; Hrsg.: Arge Qualitätsgruppe Wärmedämmsysteme im Fachverband der Stein- und keramischen Industrie, Vorgängerdokumente aus 1985, 1998, 1999, 2001, 2004, 2007 und 2011
- [33] ÖNORM B 6400-1 Außenwand-Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) - Teil 1: Planung und Verarbeitung, Ausgabe 2017
- [34] ÖNORM B 6400-2 Außenwand-Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) - Teil 2: Produkte, Prüfungen und Anforderungen, Ausgabe 2020
- [35] QG Wärmedämmsysteme, Pflege und Wartung von Wärmedämmverbundsystemen, Infofolder der QG WDS, 2004
- [36] VDPM – Verband für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e.V., WDVS Planungsatlas – Handbuch zum Schnelleinstieg, 2017
- [37] VDPM – Verband für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e.V., WDVS Planungsatlas – Informationen zum Brandschutz, 2017
- [38] GPH – Güteschutzgemeinschaft Polystyrol-Hartschaum, Faktenblätter, Information der GPH, Stand 07/2019

- [39] PE Europe, Ökobilanz StoTherm Cell – Wärmedämmverbundsysteme im Vergleich, Studie im Auftrag der sto AG, 2002
- [40] Sous, S., Neues bei Wärmedämm-Verbundsystemen: Wirtschaftlichkeit, Schimmel, Algen, Brandschutz, Entsorgung, Qualitätsklassen, Schadensvermeidung, Aachener Bausachverständigentage 2016 (?)
- [41] Sprengard, Ch., Tremel, S., Hilm, A.H., Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe, Metastudie Wärmedämmstoffe – Produkte – Anwendungen – Innovationen, Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V., München 2013
- [42] Steiner, T. (Hrsg.), Ökologie und Ökonomie des Dämmens – Analyse und Bewertung von Dämmmaßnahmen in der Altbausanierung, Fraunhofer IRB Verlag, 2018
- [43] Weiterhin schwierig zu verwerten: Wärmedämmverbundsysteme, EU-Recycling, Fachmagazin für den europäischen Recyclingmarkt, 3.5.2019, <http://eu-recycling.com/>
- [44] Vogdt, F., Fischer, D., Schaudienst, F., Schober, M., Leitfaden Recyclingpotential von Mineralwolle, Forschungsprojekt LifeCycle KMF Optimierung der Stoffströme im Lebenszyklus von Bauprodukten aus künstlichen Mineralfaserdämmstoffen, 2019
- [45] Vogdt, F., Fischer, D., Schaudienst, F., Schober, M., Life Cycle KMF – Optimierung der Stoffströme im Lebenszyklus von Bauprodukten aus künstlichen Mineralfaserdämmstoffen, Endbericht zum Forschungsvorhaben F 3166 gefördert durch das BBSR und das BBR, Fraunhofer IRB Verlag, 2019
- [46] Industrieverband Hartschaum e.V., Pressemitteilung: Innovative PolyStyreneLoop- Anlage kann EPS-Dämmmaterial aus Abbrucharbeiten wiederverwerten und wertvolle Rohstoffe zurückgewinnen, 7.6.2021
- [47] <https://www.ivv.fraunhofer.de/de/recycling-umwelt/kunststoff-recycling-creasolv.html#creasolv>
- [48] Schlummer M.; Fell T.; Mäurer A.; Altnau G. (2020). Die Rolle der Chemie beim Recycling - Physikalisches und chemisches Kunststoffrecycling im Vergleich. Kunststoffe 6, 2020, 51-54
- [49] Altnau, G., Hamann, J., Dias Fonseca, J., Technologien des werkstofflichen Recyclings in der Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe – eine kritische Bestandsaufnahme (, Firmenschrift, 2021), <https://plasticker.de>
- [50] Albrecht, W., Schwitalla, W., Rückbau, Recycling und Verwertung von WDVS, IBP-Bericht BBHB 019/2014/281, Fraunhofer Institut für Bauphysik, 2014
- [51] Hahn, B., Darauf müssen Sie bei der Entsorgung von WDVS achten, praxisnahe Kurzinfo aus haustec.de, 2018
- [52] Eibensteiner, F., STREC EPS/XPS Recycling im Baubereich, Endbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben im Auftrag von BMLFUW, Land OÖ sowie Sunpor GmbH, 2016
- [53] WKO, Kurzanleitung für den Umgang mit künstlichen Mineralfasern (KMF) im Bauwesen – Glaswollen und Steinwollen, 2018
- [54] Sims, St., Urban, H., Stier, Ch., Deaktivierbare Klebstoffe zur Wiederverwertung von Wärmedämmverbundsystemen – WDVS-Deaktiv, Schlußbericht zum Forschungs-vorhaben F 3164 des Fraunhofer Instituts für Chemische Technologie (ICT), 2019
- [55] Frischenschlager, H., Klimarelevanz ausgewählter Recyclingprozesse in Österreich, UBA, Report REP 0303, 2010
- [56] Eberl-Pacan. R., Brandschutz und WDVS – Möglichkeiten und Grenzen der Gebäudedämmung, in: Mängel und Schäden bei Wärmeschutz. Problempunkte und Sanierung, 51. Frankfurter Bausachverständigentag 2016,

- [57] DIBt, Brandverhalten von Wärmedämmverbundsystemen mit Polystyrol-Dämmstoff, Abschlußbericht zum gleichnamigen Forschungsvorgaben des Deutschen Instituts für Bautechnik T 3360, Fraunhofer IRB Verlag, 2016
- [58] Kaudelka, S., Hoffmann-Böllinghaus, A., Hauswaldt, S., Krause, U., Auswirkungen von Zündquellen und Systembeschaffenheit auf das Brandverhalten EPS-basierter Wärmedämm-Verbundsysteme, Bauphysik 37 (2015), Heft4, S. 205 – 212
- [59] UBA – Umweltbundesamt Dessau/BRD, Hintergrundbroschüre „Hexabromcyclodecan (HBCD) – Antworten auf häufig gestellte Fragen, 2017
- [60] IBO, HBCD und (k)ein Ende in Sicht?, Kurzinfo auf der Website des IBO – Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie, <https://www.ibo.at/forschung/referenzprojekte/data/hbcd-kein-ende-in-sicht>
- [61] Div. Autoren, Holzaltern, Zuschnitt 4, 1. Jg., proHolz Austria, 2001
- [62] Fischer, J., Sell, J., Wigger, U., Oberflächenschutz von Holzfassaden, Forschungs panorama, Zuschnitt 4, 1. Jg., proHolz Austria, 2001
- [63] Pfabigan, N., Es kommt drauf an: Zur Dauerhaftigkeit unbehandelter Hölzer in der Außenanwendung, Zuschnitt 23 Holzarten, 6. Jg., proHolz Austria, 2006
- [64] Div. Autoren, Holzfassaden, Zuschnitt 63, 16. Jg., proHolz Austria, 2016
- [65] Grill, G., Forsthuber, B., Wenn Holzfassaden in die Jahre kommen . Alterung von beschichteten Holzfassaden mit und ohne Wartung, Holzbau 2/2019, S. 45 – 49
- [66] Schober, P., Koch, C. et al., Fassaden aus Holz, proHolz Austria, 3. überarb. Auflage, 2018
- [67] Horn, S., Bauwerkintegrierte Photovoltaik – Entwicklung und Bewertung von Fassadensystemen, Diss. TU Dresden, 2017
- [68] Korjenic, A., Heiduk, E., Berger, K., Rauter, E., Lebeda, Ch., Fraisslich, M., Sondierung für PV-Fassadensysteme aus leichten Kunststoffmodulen mit reversiblen Befestigungen für Neu- und Altbauten, Berichte aus der Energie- und Umweltforschung 56/2019, Nachhaltig Wirtschaften, BMVIT
- [69] ÖNORM B 1300 Objektsicherheitsprüfungen für Wohngebäude - Regelmäßige Prüfroutinen im Rahmen von Sichtkontrollen und zerstörungsfreien Begutachtungen - Grundlagen und Checklisten, Ausgabe 2018