

Master's Thesis

# Evaluation of Bioplastics for Application in Facade Greening Systems

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Diplom-Ingenieur  
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

---

Diplomarbeit

## Evaluierung von Biokunststoffen zur Anwendung in Fassadenbegrünungssystemen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades einer  
Diplom-Ingenieurin  
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Lisa Sesar, BSc**

Matr.Nr.: 01126841

unter der Anleitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Azra Korjenic**

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. **Vasiliki-Maria Archodoulaki**

Institut Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie  
Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien  
Technische Universität Wien  
Karlsplatz 13, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Juni 2022

---



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Danksagung

Dem Klimawandel entgegenzuwirken ist eine der wichtigsten Aufgaben unserer Generation und ich freue mich, dass ich mit dieser Arbeit einen spannenden Diskussionsansatz liefern konnte. Es ist mir daher ein Anliegen, mich an dieser Stelle bei allen zu bedanken, die mich während dieser Zeit unterstützt haben.

Ich möchte mich bei Frau Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Azra Korjenic, Frau Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Vasiliki-Maria Archodoulaki und besonders Herrn Univ.Ass. Dipl.-Ing. Florian Teichmann für die engagierte und geduldige Betreuung und Begleitung während der Erstellung meiner Diplomarbeit bedanken. Mit ihren gezielten Fragen, fachlichen Anmerkungen, interessanten Hinweisen, konstruktiver Kritik und hilfreichen Ratschläge konnte ich das Thema immer wieder aus neuen Blickwinkeln betrachten.

Des Weiteren gilt mein Dank Andreas Lichtblau, Florian Freutel, Harald Eichhorn und Sascha Haas für das zur Verfügung stellen von Informationen zu den unterschiedlichen Begründungssystemen, die netten Gespräche und den fachlichen Austausch. Vielen Dank für die tolle Zusammenarbeit!

Außerdem möchte ich mich bei Christoph bedanken, der sich die Zeit nahm, meine Arbeit durchzulesen und Schwächen aufzuzeigen.

Besonders herzlich möchte ich mich außerdem bei meinem Mann Markus, meinen Eltern und Schwiegereltern, meinen Schwestern und meiner Schwägerin sowie meinen Freunden bedanken, die mich auf meinem Weg durch das Studium begleitet, unterstützt und motiviert haben. Durch offene Ohren, aufmunternde Worte und viele liebevolle Umarmungen wart ihr eine großartige emotionale und mentale Unterstützung auf meinem Weg zum Studienabschluss.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Kurzfassung

Mit dem Ziel, den Klimawandel zu bekämpfen, wird in allen möglichen Bereichen unseres Alltags geforscht, um unsere Lebensweise ökologischer und umweltfreundlicher gestalten zu können. Im Bereich der Stadtentwicklung bieten sich hier Fassadenbegrünungen an, da diese viele Vorteile mit sich bringen, und auch die Stadt Wien sieht diese als Teil der Lösung zur Bekämpfung von urbanen Hitzeinseln. Die Begrünung von Fassaden kann im dicht besiedelten Gebiet nicht nur zur Steigerung der Lebensqualität der Menschen, sondern auch zur Verbesserung der Luftqualität und des Mikroklimas sowie zur sommerlichen Kühlung des jeweiligen Gebäudes beitragen, um nur einige wenige der vielen Vorteile zu nennen. Bei einer ganzheitlichen Betrachtung muss man neben all den Vorteilen jedoch auch die Nachteile berücksichtigen.

Die Tragsysteme für vertikale Begrünungen bestehen häufig aus Aluminium, bei welchem zwar die Möglichkeit des Recycling besteht, bei dessen Herstellung jedoch ein hoher Primärenergieeinsatz erforderlich ist und zusätzlich schädliche Substanzen entstehen, die deponiert werden müssen. Zudem gestaltet sich das Recycling in Wahrheit schwieriger, als oft versprochen, da eine Vielzahl an Aluminiumlegierungen in unserem Alltag zu finden sind, die sortenrein getrennt werden müssen, um eine Qualitätsabnahme zu verhindern. Um der Klimakrise bestmöglich entgegen zu wirken, wird nach Möglichkeiten geforscht, vertikale Begrünungen umweltfreundlicher und ressourcenschonender gestalten zu können. Die Verwendung biobasierter Kunststoffe könnte einen Teil der Lösung darstellen, da diese aus nachwachsenden Rohstoffen erzeugt werden, schon jetzt viele Begrünungssysteme einen hohen Kunststoffanteil aufweisen und bei der Herstellung weniger CO<sub>2</sub> benötigt wird als bei Aluminium.

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, herauszufinden, inwiefern biobasierte Kunststoffe, also Kunststoffe, welche aus nachwachsenden Ressourcen hergestellt werden, in Fassadenbegrünungssystemen zur Anwendung kommen können, um den ökologischen Fußabdruck des Gesamtsystems zu verbessern. Um eine Funktion des Fassadenbegrünungssystems über seine gesamte Lebensdauer zu gewährleisten, dürfen die untersuchten Materialien unter alltäglichen Einwirkungen jedoch nicht abbaubar sein.

Als erstes wird ein Überblick über die gängigen Materialien in Begrünungssystemen geschaffen und über innovative Systeme aus anderen Werkstoffen berichtet. Danach wird der Stand der Technik im Bereich der biobasierten Kunststoffe recherchiert und es werden Beispiele gebracht, die den Einsatz von Kunststoffen in der Architektur und im Bauwesen darstellen. Zudem wird ein Überblick über die wichtigsten Kunststoffadditive und ihre Verwendung gegeben. Darauf folgend werden biobasierte, nicht abbaubare Kunststoffe vorgestellt und es wird bei den drei wichtigsten Vertretern durch eine Ökobilanz auf ihre Umweltauswirkungen hingewiesen. In einem dritten Schritt werden gängige Begrünungssysteme gedanklich in ihre Einzelteile zerlegt und die jeweiligen Anforderungen an die Komponenten besprochen. Dann kann anhand der zuvor vorgestellten Materialeigenschaften verglichen werden, ob die derzeitigen Biokunststoffe bereits alle Anforderungen erfüllen, um in Fassadenbegrünungssystemen eingesetzt werden zu können. Im Anschluss werden die Anforderungen an einen Biokunststoff, welcher als tragende Struktur eingesetzt werden soll, herausgearbeitet und nach ihrer Dringlichkeit kategorisiert, um die Richtung aufzuzeigen, in die noch weiter geforscht werden muss, um einen Einsatz zu ermöglichen. Abschließend werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und diskutiert.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Abstract

With the goal of fighting climate change, research is being carried out in all possible areas of our everyday lives in order to be able to make our way of life more ecological and environmentally friendly. In the field of urban development, green facades are an obvious choice, as they bring many advantages, and the city of Vienna also sees them as part of the solution to combat urban heat islands. In densely populated areas, the greening of facades can contribute not only to an increase in the quality of people's life, but also to improve the air quality and microclimate, as well as to cool the respective building in summer, to name just a few of the many benefits. However, when taking a holistic view, in addition to all the advantages, it is necessary to consider the disadvantages as well.

The support systems for vertical greening are often made of aluminum, which, although it is possible to recycle it, has a high primary energy consumption and its production generates harmful substances that have to be landfilled. In addition, recycling is actually more difficult than frequently promised, since a large number of aluminum alloys can be found in our everyday lives, which must be separated according to type to prevent any degradation in quality. In order to deal with the climate crisis in the best possible way, research is being carried out into ways of making vertical greening more environmentally friendly and more resource-efficient. The use of bio-based plastics could be part of the solution, since they are produced from renewable resources, many greening systems already have a high plastic content, and less CO<sub>2</sub> is needed in their production than for aluminum.

The aim of this work is to find out to what extent biobased plastics, which means plastics that are produced from renewable resources, can be used in facade greening systems to improve the ecological footprint of the overall system. However, in order to ensure a function of the facade greening system over its entire service life, the investigated materials must not be degradable under everyday influences.

The first step is to provide an overview of the common materials used in greening systems and to report on innovative systems made of other materials. Then, the state of the art in the field of bio-based plastics has to be researched and examples are listed to show the use of plastics in architecture and construction. In addition, an overview of the most important plastic additives and their use is given. Subsequently, biobased, non-degradable plastics are presented and their environmental impact is shown by means of a life cycle assessment for the three most important representatives. In a third step, common greening systems are mentally separated into their individual parts and the respective requirements for the components are discussed. Then, based on the material properties presented earlier, it can be compared whether current bioplastics already meet all the requirements to be used in facade greening systems. Subsequently, the requirements for a bioplastic to be used as a load-bearing structure are elaborated and categorized according to their urgency to show the direction in which further research is needed to enable their use. Finally, the results of the work are summarized and discussed.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Abkürzungen

CA	Celluloseacetat
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CTA	Cellulosetriacetat
DIN	Deutsche Industrienorm
EN	Europäische Norm
EP	Epoxidharz
EPS	expandiertes Polystyrol
FVK	faserverstärkter Kunststoff
GF	Glasfaser
GF-UP	Ungesättigtes Polyesterharz mit Glasfaserverstärkung
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
GK	Gebäudeklasse
HDPE	Polyethylen hoher Dichte
LCA	Life Cycle Assessment, Lebenszyklusanalyse
LDPE	Polyethylen geringer Dichte
LLDPE	lineares Polyethylen geringer Dichte
NFK	naturfaserverstärkter Kunststoff
NFRBP	naturfaserverstärktes Biopolymer
OIB	Österreichisches Institut für Bautechnik
ÖNORM	Österreichische Norm
PA	Polyamid
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PEF	Polyethylenfuranat
PES	Polyester
PET	Polyethylenterephthalat
PF	Phenolharz
PHA	Polyhydroxyalkanoat
PHB	Polyhydroxybutyrat, Polyhydroxybutansäure
PHBV	Copolymer aus Hydroxybutansäure und Hydroxyvaleriansäure
PLA	Polylactid
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PTT	Polytrimethylenterephthalat
PU(R)	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
UHPC	Ultrahochleistungsbeton
UP	Ungesättigtes Polyesterharz
VE	Vinylesterharz
WPC	Holz-Polmer-Werkstoff
XPS	extrudiertes Polystyrol



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>14</b>
1.1	Ausgangssituation und Hintergrund . . . . .	14
1.2	Fragestellung und Zielformulierung . . . . .	14
1.3	Wissenschaftliche Recherche . . . . .	15
<b>2</b>	<b>Technische Regeln und Normen</b>	<b>17</b>
2.1	Fassadenbegrünungen . . . . .	17
2.2	Biobasierte Kunststoffe . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Grundlagen der vertikalen Begrünung</b>	<b>22</b>
3.1	Vorteile von Fassadenbegrünungen . . . . .	22
3.2	Nachteile von Fassadenbegrünungen . . . . .	23
3.3	Eingesetzte Materialien bei Fassadenbegrünungen . . . . .	23
3.3.1	Aluminium . . . . .	23
3.3.2	Stahl und Edelstahl . . . . .	27
3.3.3	Holz . . . . .	27
3.3.4	Kunststoffe . . . . .	28
3.3.5	Innovative Systeme aus sonstigen Materialien . . . . .	29
3.3.5.1	Beton . . . . .	30
3.3.5.2	Kalksandstein . . . . .	31
<b>4</b>	<b>Grundlagen (Bio-)Kunststoffe</b>	<b>33</b>
4.1	Kunststoffe allgemein . . . . .	33
4.2	Biokunststoffe . . . . .	34
4.2.1	Biologisch abbaubare Kunststoffe . . . . .	35
4.2.2	Biobasierte Kunststoffe . . . . .	35
4.2.3	Zertifizierung biobasierter Kunststoffe . . . . .	36
4.3	Kunststoffe in Architektur und Bauwesen . . . . .	38
4.3.1	Kunststoffe als tragende Bauteile . . . . .	38
4.3.1.1	Faserverstärkte Kunststoffe (FVK) . . . . .	39
4.3.1.2	Anwendungsbeispiele von FVK als tragende Struktur . . . . .	40
4.3.2	Fassadenanwendungen von Kunststoffen . . . . .	45
4.3.2.1	Anwendungsbeispiele mit erdölbasierten FVK . . . . .	45
4.3.2.2	Anwendungsbeispiele mit biobasierten Kunststoffen . . . . .	47
4.4	Kunststoffadditive . . . . .	50
4.4.1	Weichmacher . . . . .	51
4.4.2	Antioxidantien . . . . .	52
4.4.3	Lichtstabilisatoren (UV-Absorber) . . . . .	52
4.4.4	Flammschutzmittel . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Nicht abbaubare, biobasierte Kunststoffe</b>	<b>53</b>
5.1	Natürliche Polymere und biogene Rohstoffe . . . . .	53
5.1.1	Polysaccharide . . . . .	53

5.1.2	Lignin . . . . .	54
5.1.3	Proteine . . . . .	54
5.1.4	Biogene Polyester . . . . .	54
5.1.5	Sonstige . . . . .	54
5.2	Modifizierte, natürliche Polymere . . . . .	55
5.2.1	Celluloseacetat (CA) . . . . .	55
5.2.2	Polyhydroxyalkanoat (PHA) . . . . .	55
5.3	Aus biogenen Monomeren synthetisierte Biopolymere . . . . .	56
5.3.1	Biobasierte Polyester . . . . .	56
5.3.1.1	Polylactid (PLA) . . . . .	56
5.3.1.2	Bio-Polyethylenterephthalat (Bio-PET) . . . . .	58
5.3.1.3	Polyethylenfuranoat (PEF) . . . . .	58
5.3.1.4	Polytrimethylenterephthalat (PTT) . . . . .	59
5.3.1.5	Polycarbonat (PC) mit biobasiertem Weichmacher . . . . .	59
5.3.1.6	Biobasierte, ungesättigte Polyesterharze (Bio-UP) . . . . .	59
5.3.2	Biobasierte Polyamide (PA) . . . . .	60
5.3.3	Biobasierte Polyolefine . . . . .	61
5.3.3.1	Bio-Polyethylen (Bio-PE) . . . . .	61
5.3.3.2	Bio-Polypropylen (Bio-PP) . . . . .	63
5.3.4	Biobasiertes Polyvinylchlorid (Bio-PVC) . . . . .	64
5.3.5	Biobasierte Epoxidharze . . . . .	65
5.3.6	Biobasierte Polyurethane (PU oder PUR) . . . . .	66
5.4	Bioverbundwerkstoffe . . . . .	66
5.4.1	Naturfaserverbundwerkstoffe . . . . .	66
5.4.1.1	Naturfasern und ihre Eigenschaften . . . . .	67
5.4.1.2	Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK) . . . . .	70
5.4.1.3	Biobasierte Kunststoffe mit Faserverstärkung . . . . .	71
5.4.2	Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) . . . . .	72
<b>6</b>	<b>Komponenten ausgewählter Begrünungssysteme</b>	<b>73</b>
6.1	Bodengebundene Begrünungssysteme . . . . .	73
6.1.1	Beschreibung System <i>Polygrün</i> . . . . .	73
6.1.2	Komponenten . . . . .	74
6.1.2.1	Rankgitter (GF-UP) . . . . .	74
6.1.2.2	Abstandhalter und Konsolen (Edelstahl) . . . . .	76
6.1.2.3	Fassadenanker (Stahl/GFK) . . . . .	77
6.2	Geotextilsysteme . . . . .	77
6.2.1	Beschreibung System <i>Living Wall</i> . . . . .	77
6.2.2	Komponenten . . . . .	79
6.2.2.1	Vliese (PES/PP, Glasfaser oder Glas-Basalt-Gestrick) . . . . .	79
6.2.2.2	Tropfschläuche (PE) . . . . .	80
6.2.2.3	Trägerplatte (Aluminium-Verbund) . . . . .	80
6.2.2.4	Rahmen (Aluminium, Edelstahl) . . . . .	80
6.2.2.5	Trägerelemente und Konsolen (Aluminium) . . . . .	81
6.3	Troggebundene Begrünungssysteme . . . . .	81
6.3.1	Beschreibung System <i>grünwand</i> . . . . .	81
6.3.2	Komponenten . . . . .	82
6.3.2.1	Tröge und Unterkonstruktion (Aluminium) . . . . .	83
6.3.2.2	Tropfschläuche (PE) . . . . .	83

6.3.2.3	Multifunktionsvlies (PP)	83
6.4	Mattenssysteme	83
6.4.1	Beschreibung System <i>90deGreen</i>	84
6.4.2	Komponenten	85
6.4.2.1	Zweischichtvlies und Trennschicht (PP)	85
6.4.2.2	Pflanzfasermatte (Steinwolle)	85
6.4.2.3	Wärmedämmplatte (EPS)	86
6.4.2.4	Lochblechprofil (Aluminium)	87
6.4.2.5	Tropfschläuche (PE)	87
6.4.2.6	Rahmen (Aluminium)	88
6.4.2.7	Trapezblech und Unterkonstruktion (Aluminium)	88
<b>7</b>	<b>Anforderungen an eine tragende Struktur aus Biokunststoffen</b>	<b>89</b>
7.1	Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit	89
7.2	Brandschutzanforderungen	90
7.3	Verträglichkeit mit Pflanzen, Substrat und Düngemitteln	93
7.4	Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen, Insekten- und Pilzbefall	94
7.5	Dauerhaftigkeit	95
7.6	Ökologische Anforderungen	95
7.7	Ökonomische Anforderungen	96
7.8	Verarbeitbarkeit	97
7.9	Ästhetische und sonstige Ansprüche	97
7.10	Anforderungskatalog in tabellarischer Form	97
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>99</b>
	<b>Literatur</b>	<b>102</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>117</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>119</b>

# 1 Einleitung

Die folgenden Abschnitte sollen eine kurze Einführung in das Thema darstellen. Es werden die Ausgangssituation und die Ziele der Arbeit besprochen und ein Einblick in die Vorgehensweise gegeben.

## 1.1 Ausgangssituation und Hintergrund

Begrünte Gebäude werden in den nächsten Jahren im urbanen Bereich eine immer größer werdende Rolle spielen, denn während immer mehr Menschen in Großstädten und Metropolen leben und arbeiten, wird der Lebensraum genau dort immer geringer. Um Platz für die Menschen und ihre Versorgung zu schaffen, müssen immer mehr Grün- und Freiflächen weichen. Etwa drei Prozent der Erdoberfläche sind bereits städtisch verbaut, gleichzeitig tragen Städte jedoch zu 80 % zum globalen CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei [128]. Der Gebäudesektor bietet somit ein enormes Einsparpotential an Treibhausgasen. Neben energieeffizienteren Haushaltsgeräten und haustechnischen Anlagen können auch vertikale Begrünungen einen wichtigen Beitrag leisten, indem bisher ungenutzte Bereiche ohne zusätzlichen Flächenverbrauch begrünt werden können.

Fassadenbegrünungen tragen zu einer Verbesserung der Luftqualität und des Wohlbefindens der Menschen bei und sind sowohl platzsparend als auch ästhetisch. Zudem bringen sie einige bauphysikalische Vorteile mit sich. Neben einem verbesserten Schallschutz kann auch der U-Wert verbessert werden. Am Beispiel des Bürogebäudes der Magistratsabteilung 48 der Stadt Wien wurde gezeigt, dass durch eine begrünte Fassade sowohl der winterliche Wärmeverlust als auch die sommerliche Erwärmung reduziert werden können [63]. Durch die Beeinflussung des Mikroklimas können Fassadenbegrünungen außerdem das Risiko der Bildung urbaner Hitzeinseln (Urban-Heating-Island, kurz UHI), also Stadtregionen, die sich stärker als ihre Umgebung aufheizen, reduzieren [154]. Grün- und Freiräume sowie offene Wasserflächen stehen nur bedingt zur Verfügung um hier regulierend zu wirken, zumal immer mehr Flächen versiegelt werden. In Hinblick auf die Klimakrise, die gestiegene Anzahl an Hitzetagen (Tage mit Temperaturen über 30°C) sowie den prognostizierten Anstieg an Sommertagen (Tagen mit Temperaturen über 25°C) [204] sind Fassadenbegrünungen ein gutes Mittel, um den städtischen Hitzeeffekt zu mildern. Die Stadt Wien hat bereits im Jahr 2015 einen Strategieplan zur Reduktion von urbanen Hitzeinseln veröffentlicht [155]. Hier werden unter anderem Fassadenbegrünungen als Maßnahmen vorgesehen.

Begrünte Fassaden sollten allerdings unter Betrachtung der verwendeten Materialien möglichst ökologisch sein, um durch deren Produktion nicht zusätzlich den Treibhauseffekt anzukurbeln.

## 1.2 Fragestellung und Zielformulierung

Wie die Diplomarbeit von Pamminer [149] zeigt, steigt jedoch durch die zusätzliche Schicht und deren benötigten Materialien einer begrünten Fassade im Gegensatz zu einer kahlen Wand der Anteil der grauen Energie in der Ökobilanz zwangsläufig, da für Herstellung, Instandhaltung und Recycling bzw. Entsorgung zusätzliche Energie benötigt wird. Die Vorteile von Fassadenbegrünungen lassen sich jedoch kaum in Werten darstellen. Was ist der positive Einfluss auf das menschliche Wohlbefinden und die Lebensqualität wert? Kann ein besseres Mikroklima und eine

bessere Luftqualität den zusätzlichen Ressourcenverbrauch und einen höheren Anteil an grauer Energie wettmachen? In wie weit relativiert sich der Herstellungsaufwand durch eingesparte Heiz- und Kühlenergie? Wie können Fassadenbegrünungssysteme in ihrer Ökobilanz weiter optimiert werden? Diese Fragen sind schwer zu beantworten und zeigen zum Teil neue Forschungsfelder auf.

Einen großen Einfluss auf den Primärenergiebedarf hat die Wahl des Tragsystems der Begrünung. Die Konstruktionen sind meist aus Aluminium, dessen Herstellung eine beachtliche Menge an Energie und Ressourcen verbraucht. Es stellt sich daher die Frage, ob der Einsatz von anderen Materialien für die Tragstruktur die Gesamtenergieeffizienz der Systeme erhöhen kann und welche Materialien dafür in Frage kommen, wobei diese Arbeit den Einsatz von Biokunststoffen in Fassadenbegrünungssystemen untersuchen soll. Aber auch die nicht tragenden Komponenten tragen zum Primärenergiebedarf bei, weshalb auch überlegt werden soll, welche Kleinteile mit wenig Aufwand durch einen biobasierten Kunststoff substituiert werden könnten.

### 1.3 Wissenschaftliche Recherche

Für die Bearbeitung der Frage, wie Biokunststoffe in Begrünungssystemen eingesetzt werden können, sind mehrere Arbeitsschritte erforderlich. Diese bauen zum Teil auf einander auf und sollen nun kurz vorgestellt werden.

Im ersten Schritt erfolgt eine Literaturrecherche. Der Fokus liegt am Anfang auf Biokunststoffen und Fassadenbegrünungen im Allgemeinen. Dadurch soll zunächst ein Überblick über die verschiedenen Forschungsbereiche geschaffen werden, um später strukturiert arbeiten zu können. Zu den Quellen zählen Bücher, Forschungsarbeiten, Zeitschriftenartikel, Studien, Masterarbeiten und Dissertationen sowie vertrauenswürdige Internetseiten. Zudem wird in Kapitel 2 *Technische Regeln und Normen* ein Überblick über wichtige Normen und Regelwerke zu den beiden Themengebieten, Fassadenbegrünungen und biobasierte Kunststoffe, geboten.

Im nächsten Schritt werden erste Erkenntnisse aus der Literaturrecherche zusammengefasst und die *Grundlagen der vertikalen Begrünung* behandelt. Bei den vertikalen Begrünungen wird vor allem auf die Idee hinter dieser Arbeit eingegangen, nämlich, dass die Tragstruktur meist aus Aluminium ist und warum dies ökologisch betrachtet problematisch sein könnte. Dies führt zur Frage, welche Anforderungen an die Tragstruktur einer Fassadenbegrünung gestellt werden und ob Biokunststoffe Aluminium in diesem Bereich ersetzen können. Zudem werden weitere typische und innovative Materialien, welche in Fassadenbegrünungssystemen verwendet werden, vorgestellt.

Wie bereits erwähnt, konzentriert sich diese Arbeit auf nicht abbaubare, biobasierte Kunststoffe, weshalb Publikationen zum Thema Biokunststoffe dahin gehend gefiltert werden müssen. Dazu muss im nächsten Schritt (Kap. 4) ein Überblick über Kunststoffe und Biokunststoffe gegeben werden. Es wird darauf eingegangen, was genau Biokunststoffe sind, wie sie eingeteilt, klassifiziert und zertifiziert werden können. Da die Hauptaufgabe die Bestimmung der Anforderungen an tragende Bauteile aus Biokunststoffen in Fassadenbegrünungssystemen ist, werden Beispiele aus der Architektur und dem Bauwesen angeführt, bei denen Kunststoffe in tragenden Bauteilen oder an der Fassade verwendet wurden. Dabei wird darauf geachtet, sowohl Beispiele mit petrochemisch basierten Kunststoffen als auch mit Biokunststoffen zu geben. Zudem werden in diesem Kapitel auch einige Kunststoffadditive vorgestellt.

Das nächste Kapitel (Kap. 5) widmet sich eingehender den nicht abbaubaren, biobasierten Kunststoffen. Es werden einige Vertreter aufgelistet und es folgt ein kurzer Einblick in die Herstellung des jeweiligen Kunststoffes, seine Eigenschaften und seine Haupteinsatzgebiete.

Nach der Zusammenfassung des Standes der Technik kann mit der eigentlichen Forschungsarbeit begonnen werden (Kap. 6). Nach Gesprächen mit einigen Systemherstellern werden die

Begrünungssysteme gedanklich in ihre Einzelteile zerlegt und es wird analysiert, welche Anforderungen sich an die jeweiligen Komponenten ergeben und welche Biokunststoffe diese am besten erfüllen.

Nachfolgend werden in Kapitel 7 die Anforderungen an eine tragende Struktur eingehend diskutiert. Diese werden definiert, kategorisiert, beschrieben, quantifiziert und Tabelle 7.3 zusammengefasst.

Abschließend werden in Kapitel 8 *Zusammenfassung und Ausblick* die Ergebnisse und Rückschlüsse präsentiert.

## 2 Technische Regeln und Normen

Laut *Bauproduktenverordnung (EU) Nr. 305/2011, Anhang I* [191] gilt, dass Bauwerke in ihrer Gesamtheit und damit auch die diversen Bauteile und Bauprodukte bestimmte Grundanforderungen zu erfüllen haben. Im vorliegenden Fall betrifft dies also sowohl das System der Fassadenbegrünung als Ganzes, aber auch die verwendeten Werkstoffe, insbesondere die Biokunststoffe als tragende Komponenten, da solche noch nicht am Markt erhältlich sind.

Die in [191] beschriebenen Grundanforderungen umfassen die folgenden Bereiche:

- Mechanische Festigkeit und Standsicherheit
- Brandschutz
- Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz
- Sicherheit und Barrierefreiheit bei der Nutzung
- Schallschutz
- Energieeinsparung und Wärmeschutz
- Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen

In harmonisierten technischen Spezifikationen (Normen) werden die jeweiligen Anforderungen für ein Bauprodukt genauer festgelegt. Für nicht vollständig erfasste oder neue Bauprodukte kann der Hersteller eine Europäische Technische Bewertung beantragen, um für sein Produkt eine CE-Kennzeichnung zu erhalten.

### 2.1 Fassadenbegrünungen

Derzeit wird in Österreich an normativen Bestimmungen zu Fassadenbegrünungen gearbeitet. Seit 01.04.2021 gibt es die Norm *ÖNORM L 1136:2021 04 01 – Vertikalbegrünung im Außenraum - Anforderungen an Planung, Ausführung, Pflege und Kontrolle* [142], welche die Anforderungen an vertikale Begrünungen genauer festlegt. In Deutschland gibt es die bereits im Jahr 2000 erschienenen und 2018 überarbeiteten *Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Fassadenbegrünungen* [108], welche verbindliche Vorgaben setzen und so für eine sichere Umsetzung sorgen (siehe auch Hüfing et al. [82]). Außerdem müssen laut [82], [142] und [154], neben Einwirkungsnormen und für die jeweiligen Schichten der Außenwände relevante, auch folgende Normen als mitgeltend betrachtet werden:

- ÖNORM B 2241:2013 – Gartengestaltung und Landschaftsbau
- ÖNORM L 1110:2017 – Pflanzen - Güteanforderungen, Anzuchtformen und Sortierungsbestimmungen
- ÖNORM L 1111:2019 – Gartengestaltung und Landschaftsbau - Technische Ausführung
- ÖNORM L 1112:2010 – Anforderungen an die Bewässerung von Grünflächen

- ÖNORM L 1120:2016 – Gartengestaltung und Landschaftsbau - Grünflächenpflege, Grünflächenerhaltung
- ÖNORM L 1210:2007 – Anforderungen für die Herstellung von Vegetationstragschichten

## 2.2 Biobasierte Kunststoffe

Die *ÖNORM EN 17228:2019 04 15 – Kunststoffe - Biobasierte Polymere, Kunststoffe und Kunststoffprodukte - Begriffe, Merkmale und Kommunikation* [141] regelt Aspekte zur Terminologie und verweist auf weitere Normen zur Bestimmung des biobasierten Gehalts bzw. dem Gehalt an biobasiertem Kohlenstoff, zur Ökobilanz, Nachhaltigkeitsaspekten und Deklarationsinstrumenten. Sie verweist auf folgende Normen:

- ÖNORM (und DIN) EN 16575:2014 – Biobasierte Produkte - Terminologie
- ÖNORM (und DIN) EN 16640:2017 – Biobasierte Produkte - Gehalt an biobasiertem Kohlenstoff - Bestimmung des Gehalts an biobasiertem Kohlenstoff mittels Radiokarbonmethode
- ÖNORM (und DIN) EN 16785-1:2016 – Biobasierte Produkte - Biobasierter Gehalt - Teil 1: Bestimmung des biobasierten Gehalts unter Verwendung der Radiokarbon- und Elementaranalyse
- ÖNORM (und DIN) EN 16785-2:2018 – Biobasierte Produkte - Biobasierter Gehalt - Teil 2: Bestimmung des biobasierten Gehalts unter Verwendung der Materialbilanzmethode
- ÖNORM (und DIN) EN 16848:2016 – Biobasierte Produkte - Anforderungen an die Kommunikation von Eigenschaften bei Firmenkundengeschäften unter Verwendung eines Datenblattes
- ÖNORM (und DIN) EN 16935:2017 – Biobasierte Produkte - Anforderungen an die Aussagen von Unternehmen und die Kommunikation zwischen Unternehmen und Verbrauchern
- DIN EN ISO 14020:2002 – Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Allgemeine Grundsätze
- ISO 16620-2:2019 – Plastics. Biobased content. Determination of biobased carbon content
- ISO 16620-4:2016 – Plastics. Biobased content. Determination of biobased mass content

Zusätzlich sind noch folgende Normen in Zusammenhang mit biobasierten Kunststoffen bzw. in Bezug auf die Verwendung in Fassadenbegrünungssystemen wichtig:

- DIN EN ISO 62:2008 – Kunststoffe - Bestimmung der Wasseraufnahme
- DIN EN ISO 178:2019 – Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften
- DIN ISO 294-1:2017 – Kunststoffe - Spritzgießen von Probekörpern aus Thermoplasten - Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Herstellung von Vielzweckprobekörpern und Stäben
- DIN ISO 294-2:2019 – Kunststoffe - Spritzgießen von Probekörpern aus Thermoplasten - Teil 2: Kleine Zugstäbe

- DIN ISO 294-3:2020 – Kunststoffe - Spritzgießen von Probekörpern aus Thermoplasten - Teil 3: Kleine Platten
- DIN ISO 294-4:2019 – Kunststoffe - Spritzgießen von Probekörpern aus Thermoplasten - Teil 4: Bestimmung der Verarbeitungsschwindung
- DIN ISO 294-5:2018 – Kunststoffe - Spritzgießen von Probekörpern aus Thermoplasten - Teil 5: Herstellung von Standardprobekörpern zur Ermittlung der Anisotropie
- DIN EN ISO 527-1:2019 – Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze
- DIN EN ISO 527-2:2012 – Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen
- DIN EN ISO 527-4:1997 – Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe
- DIN EN ISO 527-4:2020 (Entwurf) – Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe
- DIN EN ISO 527-5:2010 – Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 5: Prüfbedingungen für unidirektional faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe
- DIN EN ISO 527-5:2020 (Entwurf) – Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 5: Prüfbedingungen für unidirektional faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe
- ASTM D 833c:2019 – Kunststoffe - Begriffe
- EN ISO 877-1:2010 – Kunststoffe - Freibewitterung - Teil 1: Allgemeine Anleitung
- DIN EN ISO 899-1:2018 – Kunststoffe - Bestimmung des Kriechverhaltens - Teil 1: Zeitstand-Zugversuch
- DIN EN ISO 899-2:2015 – Kunststoffe - Bestimmung des Kriechverhaltens - Teil 2: Zeitstand-Biegeversuch bei Dreipunkt-Belastung
- DIN EN ISO 1043-1:2016 – Kunststoffe - Kennbuchstaben und Kurzzeichen - Teil 1: Basis Polymere und ihre besonderen Eigenschaften
- DIN EN ISO 1043-2:2012 – Kunststoffe - Kennbuchstaben und Kurzzeichen - Teil 2: Füllstoffe und Verstärkungsstoffe
- DIN EN ISO 1043-3:2017 – Kunststoffe - Kennbuchstaben und Kurzzeichen - Teil 3: Weichmacher
- DIN EN ISO 1043-4:2021 – Kunststoffe - Kennbuchstaben und Kurzzeichen - Teil 4: Flammschutzmittel
- DIN EN ISO 1183-1:2019 – Kunststoffe - Verfahren zur Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunststoffen - Teil 1: Eintauchverfahren, Verfahren mit Flüssigkeitspyknometer und Titrationsverfahren
- DIN EN ISO 1183-2:2019 – Kunststoffe - Verfahren zur Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunststoffen - Teil 2: Verfahren mit Dichtegradientensäule

- DIN EN ISO 1183-3:2000 – Kunststoffe - Verfahren zur Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunststoffen - Teil 3: Gas-Pyknometer-Verfahren
- ÖNORM B 3030:2005 – Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe - Terminologie und Klassifizierung
- ÖNORM B 3031:2007 – Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe - Materialeigenschaften und allgemeine Prüfverfahren
- ÖNORM B 3032:2007 – Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe - Produkteigenschaften und allgemeine Prüfverfahren
- ASTM D 5048a:2020 – Prüfverfahren für die Messung des vergleichenden Brandverhaltens und der Durchbrennfestigkeit fester Kunststoffe mittels einer 125mm langen Flamme
- DIN EN ISO 6721-1:2019 - Kunststoffe - Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundlagen
- DIN EN ISO 6721-2:2019 - Kunststoffe - Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften - Teil 2: Torsionspendel-Verfahren
- DIN EN ISO 6721-3:2021 - Kunststoffe - Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften - Teil 3: Biegeschwingung
- DIN EN 13706-1:2003 – Verstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe - Spezifikationen für pultrudierte Profile - Teil 1: Bezeichnung
- DIN EN 13706-2:2003 – Verstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe - Spezifikationen für pultrudierte Profile - Teil 2: Prüfverfahren und allgemeine Anforderungen
- DIN EN 13706-3:2003 – Verstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe - Spezifikationen für pultrudierte Profile - Teil 3: Besondere Anforderungen
- ÖNORM (und DIN) EN 15534-1:2018 – Verbundwerkstoffe aus cellulosehaltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) oder Naturfaserverbundwerkstoffe (NFC) genannt) - Teil 1: Prüfverfahren zur Beschreibung von Compounds und Erzeugnissen
- ÖNORM (und DIN) CEN/TS 15534-2:2007 – Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) - Teil 2: Beschreibung von WPC-Werkstoffen
- ÖNORM (und DIN) EN 15534-5:2014 – Verbundwerkstoffe aus cellulosehaltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) oder Naturfaserverbundwerkstoffe (NFC) genannt) - Teil 5: Anforderungen an Profile und Formteile für Wandbekleidungen
- ÖNORM (und DIN) EN 15534-5:2019 (Entwurf) – Verbundwerkstoffe aus cellulosehaltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) oder Naturfaserverbundwerkstoffe (NFC) genannt) - Teil 5: Anforderungen an Profile und Formteile für Wandbekleidungen
- ONR (und DIN) CEN/TR 16208:2011 – Biobasierte Produkte - Übersicht über Normen
- DIN 16459:2021 – Bestimmung des Faservolumengehaltes (FVG) von faserverstärkten Kunststoffen mittels Thermogravimetrischer Analyse (TGA)

- DIN CEN/TR 16721 – Biobasierte Produkte - Überblick über Verfahren zur Bestimmung des biobasierten Gehalts
- ÖNORM (und DIN) EN 16751:2016 – Biobasierte Produkte - Nachhaltigkeitskriterien
- ÖNORM (und DIN) EN 16760:2016 – Biobasierte Produkte - Ökobilanzen
- DIN 16945:1989 – Reaktionsharze, Reaktionsmittel und Reaktionsharzmassen - Prüfverfahren
- DIN CEN/TR 16957 – Biobasierte Produkte - Leitlinien für die Sachbilanzierung von Produkten in der Nachnutzungsphase
- ONR CEN/TS 17158:2018 – Verbundwerkstoffe aus cellulosehaltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) oder Naturfaserverbundwerkstoffe (NFC) genannt) - Bestimmung der Partikelgröße von lignocellulosehaltigem Material
- DIN EN 17228:2019 – Kunststoffe - Biobasierte Polymere, Kunststoffe und Kunststoffprodukte - Begriffe, Merkmale und Kommunikation
- DIN EN 17351:2020 – Biobasierte Produkte - Bestimmung des Sauerstoffgehaltes unter Verwendung eines Elementaranalysators
- DIN 18200:2021 – Übereinstimmungsnachweis für Bauprodukte - Werkseigene Produktionskontrolle, Fremdüberwachung und Zertifizierung

Die aufgezählten Normen stellen einen Überblick dar und sind keine vollständige Aufzählung aller Normen im Kunststoffbereich. Explizit für das Bauwesen und daher besonders hervorzuheben sind außerdem noch folgende Richtlinien:

- VDI 2014 Blatt 1:1989 (Geplante Überarbeitung bis 2024) – Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund - Grundlagen
- VDI 2014 Blatt 2:1993 (Geplante Überarbeitung bis 2024) – Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund - Konzeption und Gestaltung
- VDI 2014 Blatt 3:2006 (Geplante Überarbeitung bis 2024) – Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund - Berechnungen
- BÜV-Empfehlung (08/2010) – Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen [TKB] - Entwurf, Bemessung und Konstruktion

Unter Betrachtung der aufgezählten Normen und Regelwerke lässt sich Folgendes feststellen: Es gibt recht wenige Regelungen zu Fassadenbegrünungssystemen. Bei den biobasierten Kunststoffen ist die Lage etwas besser, auch weil betreffend der Prüfung der Materialeigenschaften die selben Regelungen wie für herkömmliche Kunststoffe gelten. Es fällt weiters auf, dass es aufgrund der schon längeren, breiteren Verwendung von glasfaserverstärkten Kunststoffen bereits einige Normen hierzu gibt. Jedoch gibt es zu naturfaserverstärkten Kunststoffen (NFKs) und Holz-Polymer-Werkstoffen (WPCs) explizit wieder nur recht wenige Normen. Vor allem Bauteile aus NFK sind kaum genormt. Die genannte BÜV-Empfehlung bezieht sich auf die im Bauwesen stärker vertretenen glasfaserverstärkten Kunststoffe.

In den nächsten Kapiteln sollen nun die Grundlagen zu Fassadenbegrünungen und Biokunststoffen aufgearbeitet und somit ein besseres Verständnis für die zu bearbeitenden Themen geschaffen werden.

## 3 Grundlagen der vertikalen Begrünung

Der *Leitfaden Fassadenbegrünung* der Stadt Wien [154] unterscheidet bodengebundene Begrünungen und fassadengebundene Begrünungssysteme.

Bodengebundene Begrünungen, welche mit oder ohne Kletterhilfe ausgeführt werden können, sind bei der Herstellung und Pflege günstiger, allerdings benötigen die Pflanzen genügend Platz zum Boden hin oder ausreichend dimensionierte Tröge, um den Wurzeln genug Platz zum Wachsen zu geben. Die Tröge können je nach Architektur neben dem Gebäude auf dem Gelände oder auf einer statisch geeigneten Stelle auf Terrassen oder Ähnlichem stehen. Bei dieser Art der Bepflanzung ist zu bedenken, dass die Pflanzen einige Zeit benötigen, um die gewünschte Fläche zu bewachsen und dass nur bestimmte Pflanzenarten, nämlich Kletterpflanzen, in Betracht kommen. Die maximale Höhe der zu begrünenden Fläche ist ebenfalls von der Pflanzenart abhängig.

Fassadengebundene Systeme sind in der Gestaltung freier, sowohl was die Geometrie und die Höhe der begrüneten Fläche betrifft als auch in der Wahl der Pflanzen, und lassen sich außerdem rasch realisieren. Im Gegenzug muss hier mit teils deutlich höheren Kosten bei der Herstellung und Pflege gerechnet werden. Bei den fassadengebundenen Systemen gibt es Vegetationsträger, welche punktuell oder linear mit Hilfe von Trögen oder Rinnen für Begrünung sorgen, und Vegetationsträger, welche als modulares Baukastensystem oder als Gesamtsystem hergestellt werden. Als Tragsystem wird hier hauptsächlich Aluminium verwendet.

### 3.1 Vorteile von Fassadenbegrünungen

Begrünte Fassaden bringen viele Vorteile mit sich, welche hier jedoch nur exemplarisch genannt werden, da diese bereits Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten waren. Eine gute Übersicht hierzu bietet der *Leitfaden Fassadenbegrünung* der Stadt Wien [154], welcher folgende Vorteile nennt:

- Verbesserung des Mikroklimas und der Luftqualität in Städten durch Verdunstung und Verdunstungskälte, sowie Schadstoffbindung und Sauerstoffproduktion
- Positiver Einfluss auf das menschliche Wohlbefinden durch Erhöhung von Komfort, Lärmschutz und Behaglichkeit
- Erhaltung der Biodiversität durch Habitatschaffung
- Lebenszyklusverlängerung und Schutz der Bausubstanz durch Schutz vor mechanischen und chemischen Umwelteinflüssen, Vermeidung von Spechtlöchern und Vandalismus durch Graffiti, was zu geringeren Sanierungskosten führt
- Bei wärmebrückenfreier Ausführung Verbesserung des U-Wertes der Außenwand im Vergleich zu einer Konstruktion ohne Begrünung
- Rückhalt, Speicherung und Verdunstung von Wasser führen zu einer Entlastung von Kanalsystem und Kläranlage und verringern die Gefahr von Überflutungen

- Nutzung von städtebaulichen Restflächen
- Ästhetische Aufwertung des Stadtbildes

## 3.2 Nachteile von Fassadenbegrünungen

Neben den vielfältigen Vorteilen müssen jedoch auch die Nachteile von vertikalen Begrünungen genannt werden. Zum einen sind dies die Kosten für Herstellung und Wartung der Begrünung, welche vor allem bei den komplexeren fassadengebundenen Systemen recht hoch sind, zum anderen ist vor allem bei der nachträglichen Herstellung einer Fassadenbegrünung mit selbstklimmenden Kletterpflanzen auf eine intakte Bausubstanz zu achten, da bereits vorhandene Risse im Putz zu weiteren Bauschäden oder dem Eindringen von Insekten in die Gebäudehülle führen können. Bei fassadengebundenen Begrünungssystemen erhöht sich außerdem der Primärenergie- und Ressourcenverbrauch im Vergleich zu einer herkömmlichen Fassade zwangsläufig durch die Einführung einer zusätzlichen Schicht [149]. Der Primärenergiebedarf und Ressourcenverbrauch gehen Hand in Hand mit den verwendeten Materialien für die vertikale Begrünung. Während bei ungedämmten Wänden die Anbringung eines Fassadenbegrünungssystems zu einer Verbesserung des U-Wertes führt, kann die Montage eines Begrünungssystems bei gedämmten Wänden zu Wärmebrücken bei der Durchdringung der Dämmschichte und dadurch zu einer Verschlechterung des U-Wertes führen. Noch nicht hinreichend erforscht ist hingegen, welcher Dämmstärke der Dämmwert unterschiedlicher Fassadenbegrünungen entsprechen würde, ob eine Fassadenbegrünung im Einzelfall die thermische Sanierung einer Außenwand ersetzen könnte und wie stark sich das auf die Ökologie des Gebäudes auswirken würde.

## 3.3 Eingesetzte Materialien bei Fassadenbegrünungen

Die gestiegene Nachfrage nach vertikalen Begrünungen in den letzten Jahren hat dazu geführt, dass es immer mehr Unternehmen gibt, die Fassadenbegrünungen anbieten und diese montieren. Viele der Systeme sind patentrechtlich geschützt, weswegen nahezu jeder Hersteller ein eigenes System entwickelt hat. Im Folgenden werden die Materialien, die hierbei am häufigsten vorkommen, genauer betrachtet.

### 3.3.1 Aluminium

In den meisten Fällen wird als Tragsystem für vertikale Begrünungen eine Aluminiumkonstruktion verwendet. Die Gründe hierfür sind leicht erklärbar. Während die Dichte von Stahl etwa  $7850 \text{ kg/m}^3$  beträgt, besitzt Aluminium als Leichtmetall eine geringe Dichte von nur rund  $2700 \text{ kg/m}^3$ . Die Festigkeiten von bestimmten Aluminiumlegierungen, beispielsweise mit Magnesium oder Silizium, lassen sich jedoch durchaus mit jenen von Stahl vergleichen. Ein weiterer Vorteil ist die gute Verarbeitbarkeit: Aluminium lässt sich durch diverse Gießverfahren, aber auch Strangpressen oder Walzen in Form bringen, wodurch auch das Herstellen von komplizierten Profilen ermöglicht wird. Bei Raumtemperatur bildet sich bei Kontakt mit Luft an der Oberfläche des Materials eine Oxidschicht, welche das Aluminium resistenter gegen Korrosion macht [42]. Ein oft genannter Vorteil von Aluminium ist seine gute Rezyklierbarkeit. Sortenreines Aluminium lässt sich theoretisch unendlich oft ohne Qualitätsverlust recyceln und benötigt dabei nur ungefähr  $24 \text{ MJ/kg}$  an grauer Energie, was in etwa  $10 \%$  der Primärenergie entspricht [69]. Neben eingesparter Energie sprechen auch ein geringerer Ressourcenabbau und Deponierungsbedarf für ein Recycling [16].

In der Praxis ist dies jedoch oft nicht so einfach, da es bis zu 450 verschiedene Aluminiumlegierungen gibt ([150] zitiert nach [51]), die zwar ein breites Anwendungsspektrum ermöglichen, aber auch das Recycling erheblich erschweren, da sich diese nicht mehr in ihre ursprünglichen Bestandteile zerlegen lassen [157]. Konkret bedeutet das, dass von 45 häufig verwendeten Legierungselementen nur sechs im Zuge des Umschmelzprozesses durch Oxidation und Verbleiben in der Schlacke oder durch Verdampfen entfernt werden können, was durch den relativ niedrigen Schmelzpunkt von Aluminium und seine starke Sauerstoffaffinität erklärt werden kann. Die restlichen 39 Elemente können nicht extrahiert werden. Von den sechs am häufigsten verwendeten Legierungselementen Kupfer (Cu), Silizium (Si), Eisen (Fe), Mangan (Mn), Magnesium (Mg) und Zink (Zn) können zumindest Magnesium und Zink entfernt werden [123].

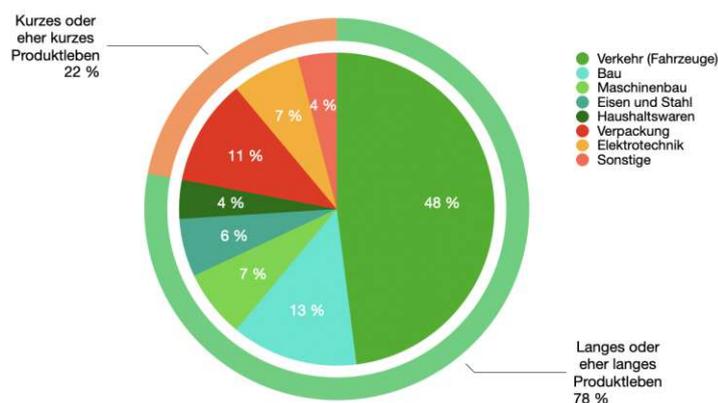
Um eine gute Rezyklierbarkeit zu gewährleisten, muss Aluminiumschrott also sortenrein getrennt werden. Das Sortieren von verschiedenen Legierungen ist technisch bereits möglich, jedoch mit einem großen Aufwand verbunden. Bei Altschrott, also Schrott, welcher vom Endkunden stammt, ist außerdem die Zusammensetzung oft nicht mehr nachvollziehbar. Bei der Herstellung oder vor dem Verkauf an den Endkunden anfallender Schrott wird als Neuschrott bezeichnet. Hier ist zwar meist die Zusammensetzung der Legierung bekannt, da er direkt vom Produzenten stammt, oft muss dieser Neuschrott jedoch noch aufbereitet werden, um Verunreinigungen durch Lacke oder Fette zu entfernen. Auch wenn die Sortierverfahren durch technologischen Fortschritt immer besser werden, kommt es in der Realität meistens zum sogenannten Downcycling. Das bedeutet, dass die Materialqualität mit dem Recyclingprozess durch das Mischen von verschiedenen Legierungen abnimmt und das neu entstandene Material nur noch für minderwertigere Einsatzzwecke in Frage kommt. Das Hinzufügen von frisch gewonnenem Primäraluminium zur Schrottschmelze kann den Qualitätsverlust bis zu einem gewissen Grad ausgleichen (siehe auch [16]). Ab einem bestimmten Punkt der Materialverschlechterung ist jedoch auch das nicht mehr sinnvoll und der Schrott muss deponiert werden. Dennoch ist Downcycling besser als Deponierung und erneuter Rohstoffabbau und stellt somit einen wichtigen Prozess in der Wertschöpfungskette dar.

Im Gegensatz zu den im Bauwesen am häufigsten verwendeten Al-Mg-Si-Knetlegierungen, in denen unter 4 Gewichtsprozent an Legierungselementen enthalten sind, kann die Gesamtkonzentration an Legierungselementen in Guss- und Druckgusslegierungen bis zu 27 % betragen [123]. Ein Großteil dieser Legierungen wird zur Herstellung von Motoren verwendet. Nach Nakajima et al. [123] wirken Aluminiumprodukte aus Guss- und Druckgusslegierungen aufgrund der hohen Toleranz gegenüber Verunreinigungen quasi als „letzte Senke für relativ minderwertigen Aluminiumschrott“.

Während die Gesamtrecyclingquote für Aluminiumschrott seit Jahren bei etwa 30 % stagniert, werden in der Automobilindustrie und im Bauwesen die höchsten Recyclingquoten mit etwa 85 bis über 90 % erzielt [16, 69]. Allerdings sind genau in diesen Branchen die Materialanforderungen besonders hoch bzw. der Anteil an Legierungselementen sehr klein, weshalb hier laut dem Forum Nachhaltiges Bauen [69] zur Zeit fast ausschließlich Primäraluminium zur Anwendung kommt.

Die größten Abnehmer von Aluminium waren 2016 der Verkehr (Fahrzeuge, Flugzeuge, Schiffe) mit 48 % und die Baubranche mit 13 %. Dahinter folgte mit 11 % die Verpackungsindustrie. Maschinenbau, Elektrotechnik, Eisen- und Stahlherstellung sowie Haushaltswaren zählen ebenfalls zu den Hauptanwendungsgebieten, sind jedoch nur mit jeweils 4-7 % vertreten [122]. Abbildung 3.1 veranschaulicht die Mengenteile der Hauptanwendungsgebiete und beurteilt diese auch nach ihrer Lebensdauer. Während man bei Aluminiumprodukten in der Rubrik Verkehr von einem relativ langen Produktleben in verschiedensten Fahrzeugteilen (Karosserie, Felgen, Motor etc.) ausgehen kann, wird das Produktleben einer Aluminiumfolie, Getränkedose oder Kaffeekapsel (dem Bereich Verpackung zugeordnet) recht kurz sein. Am Bau findet man Aluminium vor allem als Fensterrahmen und -griffe, Konstruktionselemente für beispielsweise Glasfassaden aber auch

als Beschichtung für Dampfsperrfolien. Hier wird ein langes Produktleben angenommen. Auch Produkte aus der Eisen- und Stahlindustrie, in welchen Aluminium als Legierungselement dient, finden sich oft am Bau wieder, weshalb auch hier von einem langen Produktleben ausgegangen wird. Aluminiumprodukte im Maschinenbau, wie Teile von Industrierobotern und Pumpen, sind meist jahrelang im Einsatz und besitzen daher ebenfalls eine lange Lebensdauer. Im Haushalt findet sich Aluminium beispielsweise in Kochtöpfen und Pfannen, diversen Küchengeräten oder auch Trittleitern wieder. Auch hier kann von einem eher langen Produktleben ausgegangen werden. Neben einem besonders kurzen Leben bei einem Einsatz als Verpackung, werden auch Produkte der Sparte Elektrotechnik, beispielsweise Smartphones oder Laptops, bereits nach einigen Jahren ersetzt, weshalb bei diesen Produkten und der nicht genauer definierten Kategorie Sonstiges von einem kurzen oder eher kurzen Produktleben ausgegangen wird.



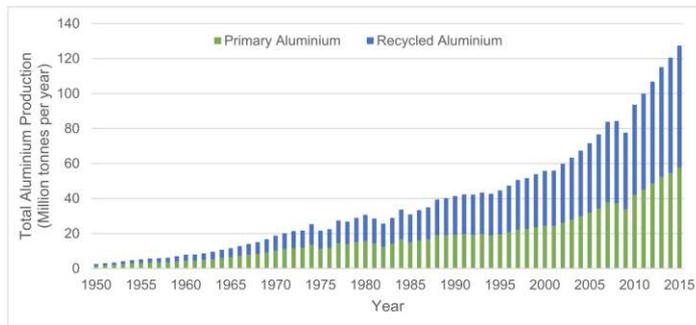
**Abb. 3.1:** Hauptanwendungsgebiete von Aluminium und eine Abschätzung der Lebensdauer der jeweiligen Produkte  
(Bildquelle: eigene Grafik, Hauptanwendungsgebiete nach Müller [122])

Aus der genannten Grafik 3.1 geht hervor, dass man bei einem Großteil der Aluminiumprodukte mit einem relativ langen Produktleben rechnen kann. In der Baubranche ist dieses mehrere Jahrzehnte lang. Da Bauprodukte besonders hohe Qualitätsanforderungen besitzen und daher auch kaum das Ergebnis eines Downcyclings sein können, kann in der Baubranche also nur recycelt werden, was vor vielen Jahren verbaut wurde. Gleichzeitig steigt der globale Aluminiumverbrauch jedoch stetig an [174]. Selbst bei einer Annahme von 100 % Recycling im Bauwesen muss ein Großteil der Nachfrage durch Primäraluminium abgedeckt werden [17].

Beispielsweise wird in Abb. 3.2b der Aluminiumbedarf im Baugewerbe von 1972 und 2012 verglichen. Die angenommene Recyclingquote beträgt hier 100 %, dennoch müsste 76 % des Bedarfs von 2012 mit Primäraluminium gestillt werden.

Das deutsche Umweltbundesamt sieht auch für die kommenden Jahre eine weiter steigende Nachfrage an Aluminium, vor allem durch den Netzausbau für die Energiewende und den wachsenden Anteil an Elektromobilität, da hier besonders viele Aluminiumteile, wie Karosserie, Batteriegehäuse oder für die Leistungselektronik verbaut werden. Ein bewussterer Umgang und Verbrauch sollte deswegen auf jeden Fall angestrebt werden.

Der Nachhaltigkeitsgedanke verbreitet sich auch in der Aluminiumindustrie selbst. Der norwegische Hersteller Hydro beispielsweise achtet bei seinen Produkten besonders auf eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Einerseits in der Prozesskette des Primäraluminiums durch erneuerbare Energiequellen und eine hocheffiziente Elektrollysetechnologie [131], andererseits durch einen hohen Recyclinganteil durch moderne Sortiertechnik [130]. Der Mindestrecyclinganteil an Verbraucherschrott wird für die angesprochene Produktgruppe mit 75 % angegeben. Aufgrund der



(a) Weltweite Produktion von Primär- und Sekundär aluminium 1950-2015 (Bildquelle: Soo et al. [174])



(b) Primär aluminiumbedarf der Baubranche 2012 bei einer Recyclingquote von 100 % (Bildquelle: [17])

**Abb. 3.2:** Produktionswachstum von Aluminium und Auswirkung auf Recyclingquote

weiter oben beschriebenen Thematik der langen Einsatzdauer und der weiterhin stark steigenden Aluminiumnachfrage, dürfte jedoch bei einem Materialvergleich trotz Einsatz eines „umweltbewussten“ Aluminiums nur ein Anteil von maximal 24 % an recyceltem Aluminium und folglich mindestens 76 % an Primär aluminium angesetzt werden. Denn selbst wenn der Recyclinganteil bei einem speziellen Produkt höher ist, muss das hier vermeintlich eingesparte Primär aluminium dem Kreislauf an anderer Stelle zugefügt werden, um die hohe Nachfrage an Aluminium abzudecken.

Die Herstellung von Primär aluminium ist aber aus umwelttechnischer Sicht durchaus problematisch. Aluminium ist zwar nach Sauerstoff und Silicium das dritthäufigste Element der Erdkruste, tritt aber in der Natur nicht in seiner reinen Form auf. Meist findet man es in Form von Alumosilikaten in tonhaltiger Erde, Granit und Gneis oder in Form von Aluminiumoxiden und -hydroxiden im Aluminiumerz Bauxit [14, 42]. Die Gewinnung von Aluminium aus Alumosilikaten ist wirtschaftlich nicht sinnvoll, weshalb es in der Praxis aus Bauxit gewonnen wird. Neben seinen aluminiumhaltigen Verbindungen besteht Bauxit unter anderem aus Eisenoxid, Siliziumoxid, Titanoxid, Kieselsäure und Schwermetallen. Durch das Bayer-Verfahren werden die Aluminiumverbindungen mit Hilfe einer Natronlauge von den anderen Bestandteilen getrennt, wobei giftiger Rotschlamm als Abfall entsteht. Aus dem so gewonnenen Aluminiumoxid wird anschließend gemeinsam mit Kryolith in einer Schmelzelektrolyse Hüttenaluminium hergestellt [69]. Der Energieverbrauch bei diesem Prozess liegt bei etwa 13000 - 15000 kWh pro gewonnener Tonne Aluminium und ist damit vergleichbar mit dem Jahresverbrauch von vier Haushalten mit einem Durchschnittsverbrauch von je 3500 kWh pro Jahr [42].

Umweltschutzorganisationen kritisieren nicht nur den hohen Energieaufwand, sondern auch den hohen Flächenverbrauch durch den Bauxitabbau sowie die großen Mengen an umweltschädlichem Rotschlamm. Etwa 1,5 Tonnen fallen pro produzierter Tonne Aluminium an und müssen deponiert werden. Die rote Farbe erhält der Rotschlamm durch Eisen-III-Verbindungen. Weiters verbleiben die umweltschädlichen Schwermetalle wie Arsen, Blei, Cadmium, Vanadium und Quecksilber aus dem Bauxit im Rotschlamm [157]. Im Bauxit sind diese gebunden und ungefährlich. Bei der Vermengung mit Natronlauge, einer stark ätzenden Lauge, welche den zweiten Bestandteil dieses toxischen Gemischs bildet [38], verflüchtigen sich die Schwermetalle und werden zum Umweltrisiko. Immer wieder kommt es zu Unfällen mit Rotschlamm. Der letzte große Unfall in Europa fand im Jahr 2010 in Ungarn statt, wo ein Auffangbecken brach und über eine Milliarde Liter Rotschlamm austraten, wobei einige Dörfer, Felder und Bäche überflutet wurden. Dabei wurden Böden und Grundwasser verseucht, Häuser unbewohnbar gemacht und 150 Menschen

verletzt sowie 10 getötet. Durch die Revitalisierung der Gegend entstand auch ein wirtschaftlicher Schaden in einer Höhe von etwa 130 Millionen Euro [157].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es im Bereich des Aluminiumrecyclings, im Speziellen der Vorsortierung, noch Aufholbedarf gibt. Der weltweit steigende Aluminiumbedarf resultiert außerdem in einem steigenden Bedarf an Primäraluminium, selbst bei guten Recyclingquoten, weshalb bei einem Vergleich mit anderen Materialien ein Anteil von mindestens 76 % Primäraluminium anzusetzen ist. Der Bauxitabbau und die Herstellung von Primäraluminium sind jedoch alles andere als umweltfreundlich. Auch wenn Aluminium aufgrund seiner theoretisch guten Rezyklierbarkeit oft als umweltfreundliches Material angepriesen wird, lohnen sich daher ein Blick über den Tellerrand hinaus und eine Suche nach möglichen Materialien, welche einige Komponenten der konventionellen Tragstrukturen von Fassadenbegrünungssystemen ersetzen könnten, wobei diese Arbeit den Einsatz von biobasierten Kunststoffen, also Kunststoffen, welche aus nachwachsenden Ressourcen hergestellt werden, untersucht.

### 3.3.2 Stahl und Edelstahl

Bei bodengebundenen Fassadenbegrünungen kommen oft Rankhilfen aus Stahl oder Edelstahl zur Anwendung. Die Möglichkeiten reichen hier von zierlichen Systemen wie punktuell an der Fassade befestigten Seilen, Netzen und Gittern aus Edelstahl mit recht geringem Abstand der Pflanzen zur Fassade bis hin zu eigenen, teilweise selbststehenden, Konstruktionen wie Stahlrahmen. Diese können auch in einem größeren Abstand zur Fassade errichtet werden [154]. Die Systeme (Rahmen, Gitter, Seile, Netze) lassen sich beliebig kombinieren. Ein weiteres großes Einsatzgebiet von Stahl bei Fassadenbegrünungen stellt die Befestigungstechnik mit dem darunterliegenden Wandsystem dar: Befestigungsanker oder tragende Profile aus Stahl als Unterkonstruktion für fassadengebundene Begrünungssysteme aller Art stellen neben Aluminium den Stand der Technik dar.

Stahl ist dauerhaft, lässt sich gut verarbeiten und ist recycelbar. Allerdings muss der Korrosionsschutz gewährleistet sein. Bei Edelstahlkomponenten muss darauf geachtet werden, sie von unedleren Metallen zu trennen, um Kontaktkorrosion zu vermeiden. Aufgrund seines hohen Gewichts ist Stahl als Material für eine großflächige wandgebundene Begrünung aus statischer Sicht eher ungeeignet. Der *Leitfaden Fassadenbegrünung* der Stadt Wien [154] weist des Weiteren darauf hin, dass es an der Oberfläche von Stahlteilen aufgrund von Sonneneinstrahlung und Witterung zu Temperaturschwankungen kommen kann, die die Pflanzen schädigen können.

### 3.3.3 Holz

Kletterhilfen aus Holz kommen oft bei privaten Einfamilienhäusern zum Einsatz. Sie werden hier meist für einzelne, kleinflächige Begrünungen verwendet. Einfache Systeme hierfür lassen sich in so gut wie jedem Baumarkt finden. Der *Leitfaden Fassadenbegrünung* der Stadt Wien [154] stuft Holz als Werkstoff für Fassadenbegrünungen jedoch nur als *bedingt geeignet* ein und führt dies auf eine beschränkte Nutzungsdauer bzw. Dauerhaftigkeit, eine maximale Höhe bis zu zwei Stockwerken und einen im Vergleich zu anderen Materialien recht großen Mindestquerschnitt der Konstruktion zurück. Bei fassadengebundenen Systemen kommt Holz bisher aus den genannten Gründen kaum zur Anwendung, im Zuge des Projekts *MehrGrüneSchulen* der TU Wien [89] wird es jedoch an einer Forschungsfassade als tragende Unterkonstruktion für verschiedene Fassadenbegrünungssysteme eingesetzt. Nachteilig wirkt sich die Eigenschaft der Wasseraufnahme aus, welche die Dauerhaftigkeit beeinträchtigt und zu Insektenbefall sowie Schimmelbildung führen kann, aber auch die Brennbarkeit, die die Verwendung von Holz als Baustoff für große, hohe Gebäude oft einschränkt [169]. Dennoch ist ökologisch betrachtet die Verwendung von

Holz sehr vorteilhaft, da Holz einen deutlich geringeren CO<sub>2</sub>-Abdruck verursacht als andere Baumaterialien wie Stahl, Beton oder Glas. Bei der Verwendung von heimischen Hölzern erhöht sich dieser Effekt, da hier durch einen kürzeren Transportweg große Mengen an CO<sub>2</sub> eingespart werden können. Außerdem ist Holz recycelbar und eine Kaskadennutzung (mehrfache Nutzung mit abnehmender Wertschöpfung) ist möglich.

### 3.3.4 Kunststoffe

Bei bodengebundenen Begrünungssystemen können Kunststoffe als Rankhilfen verwendet werden. Beispiele hierfür sind das System *Polygrün* [37], ein Rankgerüst, welches aus einem Glasfaserverbundwerkstoff (GFK) mit einer Matrix aus einem ungesättigtem Polyesterharz besteht, oder das System *solidian GREENWALL* [173], welches ebenfalls ein Rankgerüst aus GFK ist. Ähnlich zu Stahlseilen ist auch eine Ausführung mit Seilen aus Kunststoff möglich. So wurde das Institut für Physik an der *Humboldt-Universität zu Berlin* mit gespannten Polyethylenseilen [93] als Rankhilfen begrünt.

In nahezu allen wandgebundenen Fassadenbegrünungssystemen werden Kunststoffe außerdem in Form von Geotextilien eingesetzt. Dies sind beispielsweise Filtervliese, Trenn-, Schutz- und Speichervliese sowie Wurzelschutzbahnen. Je nach gewünschter Funktion können unterschiedliche Vliese verwendet werden. Die Geotextilien können aus Polyamiden (PA), Polyestern (meist PET), Polypropylenen (PP) und Polyethylen hoher Dichte (HDPE) hergestellt werden [154]. Auch der Einsatz von Kunststoffen als Trägermaterial für die Pflanzen ist möglich. Patrick Blanc, ein Vorreiter auf dem Gebiet der Fassadenbegrünungen, verwendet bei seinem substratlosen System beispielsweise Vliese als Trägermaterial [172]. Bei dem in Abschnitt 6.2 *Geotextilsysteme* besprochenen System kommen hingegen mit Substrat gefüllte Taschen aus Geotextilien zum Einsatz.

Die österreichische Firma Vertical Green hat drei Systeme zur Auswahl, in denen verschiedenste Kunststoffe eingesetzt werden. Das günstigste Modell besteht aus einem Modul mit Pflanztöpfen aus recyceltem Kunststoff<sup>1</sup> und wird in Abb. 3.3a dargestellt. Das preislich in der Mitte liegende Modell setzt sich aus Modulen aus recycelbarem EPP (expandiertem Polypropylen) zusammen und ähnelt den Begrünungsmodulen *LivePanel* der deutschen Firma Mobilane, welche ebenfalls aus EPP gefertigt werden [117] und in Abb. 3.3b abgebildet sind.



(a) Kunststoffmodul Fa. Vertical Green (Bildquelle: ©Vertical Green GmbH [59])



(b) *LivePanel* Fa. Mobilane aus EPP (Bildquelle: Greenbop [76] ©Mobilane GmbH)

**Abb. 3.3:** Beispiele für Begrünungen aus Kunststoff

<sup>1</sup>Die Art des verwendeten Kunststoffes konnte die Vertical Green GmbH leider nicht genauer beschreiben.

Das dritte Modell von Vertical Green ähnelt in seinem Aufbau jenem System aus Abschnitt 6.4 *Mattenssysteme*, jedoch kommen hier Matten aus einem speziellen Outdoor-Schaumstoff<sup>2</sup> zum Einsatz.

Aufgrund der meist eingeschränkten Zugänglichkeit sind viele Grünwände mit Bewässerungsanlagen ausgestattet. Anschlüsse, Verbindungs- und Endstücke sowie Schläuche werden auch hier aus den oben genannten Kunststoffen (meist PE) hergestellt.

Ob und wie die genannten Bauteile aus Biokunststoffen hergestellt werden können, wird in Kapitel 6 *Komponenten ausgewählter Begrünungssysteme* erörtert.

Im Rahmen eines vom europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) geförderten Projekts forschte das ITKE Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen der *Universität Stuttgart* bereits ab 2011 an den Anwendungsmöglichkeiten von biobasierten Kunststoffen für Innen- und Außenverkleidungen von Gebäuden. Im Zuge dessen wurde bei der Hannover Messe 2013 der Prototyp einer mit Moosen begrünter Fassadenverkleidung aus Biokunststoffen vorgestellt [85].



(a) Fassaden-Moos-Modul (Bildquelle: ITKE, Universität Stuttgart [85] ©Yordan Domuzov)

(b) Exponat Hannover Messe 2013 (Bildquelle: ITKE, Universität Stuttgart [85])

**Abb. 3.4:** Biokunststoff-Moos-Modul des ITKE Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, Universität Stuttgart

Nach dem Entwurf von Yordan Domuzov wurden dreidimensionale, hexagonal geformte Platten aus einem biobasierten Kunststoff hergestellt, in deren Vertiefungen die Oberflächenstruktur einen Haftgrund für Moose bietet [91]. Es können sowohl fertig kultivierte Moosmatten mit einem pflanzenverträglichen, wasserfesten Kleber aufgebracht werden, als auch Moosprossen mit Hilfe einer Anspritzbegrünung. Bei der Montage können je nach Ausrichtung der Module unterschiedliche Muster erzeugt werden. Das verwendete Moos nimmt Feinstaub als Dünger auf und besitzt einen hohen Schallabsorptionsgrad, wodurch sich „neue Möglichkeiten für biobasierte innerstädtische Fassaden an viel befahrenen Straßen“ [85] ergeben könnten.

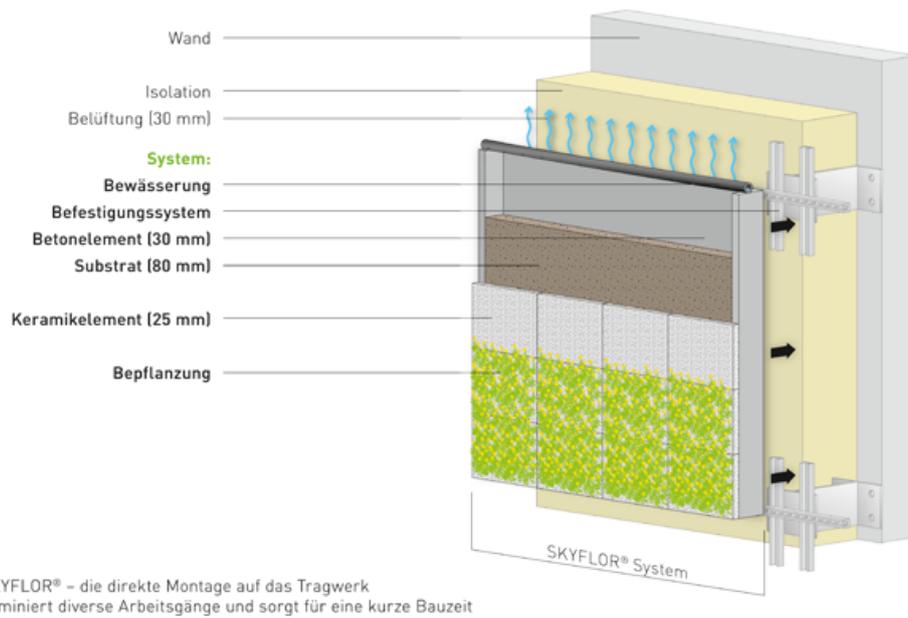
### 3.3.5 Innovative Systeme aus sonstigen Materialien

Mittlerweile gibt es unzählige Systeme aus verschiedensten Materialien und Werkstoffkombinationen, um Fassaden zu begrünen. Es wird in alle Richtungen geforscht, um die Systeme besonders umweltfreundlich zu gestalten. Im Folgenden werden einige Entwicklungen im Bereich der Fassadenbegrünungen vorgestellt, deren Tragstruktur aus Beton oder Kalksandstein hergestellt wird.

<sup>2</sup>Hier wollte der Systemhersteller leider keine genaueren Angaben zur Art des Schaumstoffes machen.

### 3.3.5.1 Beton

Bei ihrem System *Skyflor*<sup>®</sup> arbeitet die schweizer Firma Creabeton Matériaux mit einem faserverstärkten Ultrahochleistungsbeton (UHPC = Ultra High Performance Concrete). Die Konstruktion besteht aus einer 30 mm starken UHPC-Platte, vor welcher eine 80 mm dicke Substratschicht liegt. Den Abschluss bildet eine 25 mm starke poröse Keramikplatte, auf welcher die Pflanzensamen gesät werden [49, 50]. Das Keramikelement dient dabei gleichzeitig als Untergrund für die Pflanzen und als sichtbare Schicht der Fassade.



(a) Schematischer Aufbau *Skyflor*<sup>®</sup>



(b) Detailaufnahme Außenfassade *Skyflor*<sup>®</sup> mit sichtbarer Keramikoberfläche

**Abb. 3.5:** System *Skyflor*<sup>®</sup> (Bildquelle: © Creabeton Matériaux AG)

Einen anderen Ansatz verfolgt das Weimarer Institut für Angewandte Bauforschung (IAB). Dort wurde ein Fertigteil aus ultra-hochfestem Beton mit Carbonbewehrung und Kunststoffasern entwickelt, welches etwa 3,00 x 3,17 m<sup>2</sup> groß ist. Das Fertigteil besteht aus mehreren horizontal angeordneten Rinnen, die mit Substrat gefüllt und bepflanzt werden. Die Vorinstallation des Bewässerungssystems kann vorab im Werk erfolgen. Die Fertigteile können dann als vorgehängte

Fassade mit oder ohne Belüftungsebene installiert werden [84]. Wird die Unterkonstruktion der vorgehängten Fassade dem Stand der Technik entsprechend mit Stahlbauteilen verankert, kommt ein Fassadenaufbau mit solch einem Betonfertigteile, im Gegensatz zu den meisten am Markt erhältlichen vertikalen Begrünungssystemen, also komplett ohne Aluminium aus.



**Abb. 3.6:** Betonfertigteile zur Fassadenbegrünung des IAB Weimar direkt nach der Bepflanzung (Bildquelle: Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH [84])

### 3.3.5.2 Kalksandstein

Die äußere Form des Systems *Biolit Vertical Green*<sup>®</sup>, welches u.A. vom Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT entwickelt wurde, ähnelt mit seinen horizontal angeordneten Rinnen der des Systems des IAB Weimar. Anstatt eines großen Betonfertigteils wird hier jedoch mit 25 x 24 x 24 cm<sup>3</sup> großen Pflanzsteinen [11] auf Basis von Kalksandstein gearbeitet.



**Abb. 3.7:** Begrünung *Biolit Vertical Green*<sup>®</sup> (Bildquelle: Mayer [111] © DVS-Begrünung)

Kalksandstein kann Feuchtigkeit schnell aufnehmen, gut transportieren und auch schnell wieder freisetzen [111]. Gleichzeitig wurde das System jedoch so konzipiert, dass es beständig gegen Frost ist [156]. Die Pflanzsteine besitzen die Fähigkeit, Niederschlagswasser aufzunehmen und an die

Pflanzen abzugeben; ein zusätzliches von außen nicht sichtbares Bewässerungssystem sichert einen darüber hinausgehenden Wasserbedarf ab. Seit 2014 wurden drei Pilotwände in Deutschland und Spanien gebaut. Gute Erfolge wurden dabei mit flachwurzelnden mehrjährigen Pflanzen wie Storchenschnabel und Lavendel, aber auch diversen Kräutern, Gräsern und Nutzpflanzen wie Erdbeeren und Tomaten erzielt [111]. Laut einer Presseaussendung von Fraunhofer UMSICHT [203] vom 13. April 2021 wird an einer Markteinführung gearbeitet.

# 4 Grundlagen (Bio-)Kunststoffe

In diesem Kapitel werden die Grundlagen von Kunststoffen im Allgemeinen und Biokunststoffen im Speziellen erläutert. Es wird erklärt, wie sich Kunststoffe und Biokunststoffe einteilen lassen, und es werden Beispiele für die Anwendung von Kunststoffen in der Architektur und im Bauwesen gezeigt.

## 4.1 Kunststoffe allgemein

Kunststoffe bzw. Polymere sind durch ihre vielfältigen Verarbeitungsmöglichkeiten und guten technischen Eigenschaften beliebte Werkstoffe, die aus der heutigen Zeit kaum noch wegzudenken sind. Der chemische Begriff Polymer (*poly*: griechisch für viele, *meros*: griechisch für Teilchen) beschreibt zu Makromolekülen verknüpfte Monomere (*mono*: griechisch für allein, einzig), also Einzelmoleküle, wobei die Verknüpfung linear, verzweigt oder netzartig erfolgen kann [168]. Obwohl laut Thielen [183] die ersten Kunststoffe Celluloid und Galalith, welche in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts erfunden worden sind, auf biogenen Rohstoffen basierten, setzten sich mit der zunehmenden Verfügbarkeit von Erdöl Anfang des 20. Jahrhunderts Kunststoffe aus fossilen Rohstoffen durch. Erst seit der zweiten Ölkrise 1979/1980 und dem steigenden Umweltbewusstsein in den 2000er Jahren wird wieder stärker an biobasierten und bioabbaubaren Kunststoffen geforscht.

Generell kann man drei Arten von Kunststoffen unterscheiden. Die mit einem Marktanteil von 80 % [183] wichtigste Gruppe sind die Thermoplaste. Sie bestehen aus linearen und teilweise verzweigten Molekülketten, welche nur durch schwache physikalische Kräfte zusammengehalten werden. Wird solch ein Kunststoff erwärmt, werden die Nebenvalenzbindungen schwächer und der Kunststoff wird weich und formbar [92]. Thermoplastische Kunststoffe lassen sich also wiederholt einschmelzen, was sie recycelbar macht. Allerdings sind ihre mechanischen Eigenschaften dadurch etwas schlechter.

Die zweite Gruppe stellen die Duroplaste dar, bei welchen die Monomere netzartig verbunden sind [168]. Bei diesem dichten und engmaschigen Netz sind die Molekülketten durch eine starke

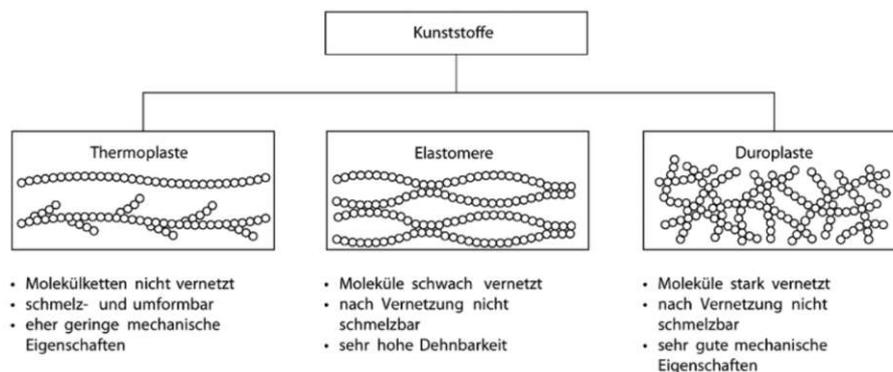


Abb. 4.1: Arten von Kunststoffen nach ihrem chemischen Aufbau (Bildquelle: Knippers et al. [92] nach [90])

chemische Verbindung miteinander verbunden. Dies hat zur Folge, dass sich die Form von duroplastischen Kunststoffen nach dem Aushärten nicht mehr verändern lässt [92]. Duroplaste sind daher weder schmelz- noch recycelbar, besitzen jedoch gute mechanische Eigenschaften.

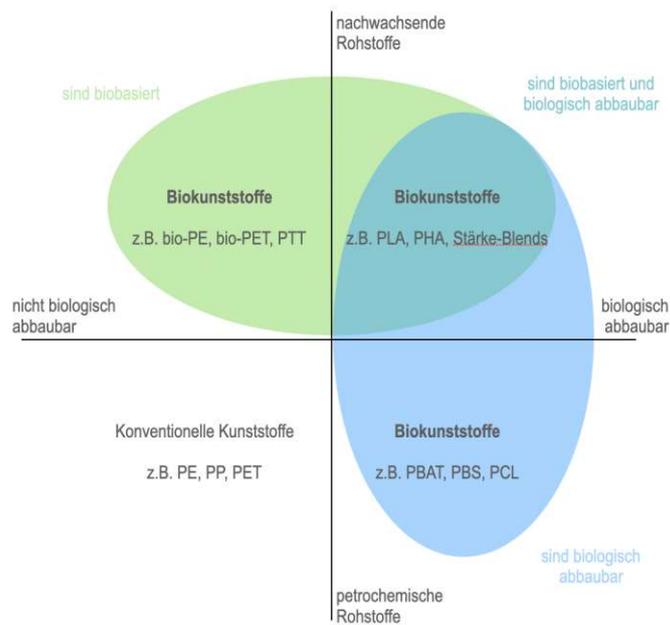
Die dritte große Gruppe bilden die Elastomere, die, wie ihr Name bereits verrät, elastische Eigenschaften besitzen [183]. Diese Eigenschaft ergibt sich aus den weitmaschig und schwach vernetzten Molekülketten. Elastomere weisen eine hohe Dehnbarkeit auf. Nach der Vernetzung sind sie jedoch nicht schmelzbar [92].

Um die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen zu verbessern, können Verbundwerkstoffe, in diesem Fall faserverstärkte Kunststoffe (FVK), hergestellt werden. Verbund- oder Kompositwerkstoffe sind Werkstoffe, die aus mindestens zwei miteinander verbundenen Materialien bestehen, welche in ihrer ursprünglichen Form erhalten bleiben und durch den Verbund einen neuen Werkstoff bilden, der meist bessere Materialkennwerte besitzt, als die Einzelkomponenten. Faserverstärkte Kunststoffe bestehen aus einer Kunststoffmatrix und Verstärkungsfasern. Bei der Auswahl der Materialien ist darauf zu achten, dass E-Modul und Bruchfestigkeit der Fasern größer sind, als jene der Matrix [92], während die Bruchdehnung der beiden Komponenten etwa gleich groß oder jene der Fasern kleiner sein soll.

Für faserverstärkte Kunststoffe kann man Fasern aus Glas, Basalt, Kohlenstoff oder Kunststoffen aber auch Naturfasern verwenden, wobei laut Knippers et al. [92] „aufgrund der hohen Streuung der mechanischen Eigenschaften sowie der geringen Dauerbeständigkeit bzw. hohen Wasseraufnahme“ Naturfasern für tragende Konstruktionen im Bauwesen bisher kaum eine Rolle spielen.

## 4.2 Biokunststoffe

Die Bezeichnung Biokunststoffe kennzeichnet sowohl Kunststoffe, die auf nachwachsenden Rohstoffen basieren (diese werden auch biobasierte Kunststoffe genannt), als auch Kunststoffe, welche bioabbaubar sind.



**Abb. 4.2:** Definition von Biokunststoffen  
(Bildquelle: eigene Grafik nach Endres und Siebert-Raths [61])

Zweitere, biologisch abbaubare Kunststoffe, können sowohl auf petrochemischen als auch auf nachwachsenden Rohstoffen basieren. Analog dazu ist bei den biobasierten Kunststoffen eine Unterscheidung in abbaubar und nicht abbaubar möglich. Des Weiteren steht zur Debatte, auch biokompatible Kunststoffe, also Kunststoffe, die für medizinische Zwecke geeignet sind, da sie mit menschlichem oder tierischem Gewebe verträglich sind, als Biokunststoffe zu benennen (siehe auch [187]).

Neben der weit umfassenden Bezeichnung für verschiedene Arten von Kunststoffen, birgt die Vorsilbe „bio-“ ein weiteres Problem, nämlich dass für den Verbraucher der Eindruck entstehen könnte, dass die verwendeten Rohstoffe (z. B. Zuckerrohr) aus biologischer Landwirtschaft stammen würden, was wünschenswert wäre, jedoch meist nicht zutrifft. Der Begriff Biokunststoff kann daher schnell zu Missverständnissen führen, wenn vorher nicht definiert wurde, was damit gemeint ist.

In den folgenden Abschnitten werden die Begrifflichkeiten „biologische Abbaubarkeit“ und „biobasiert“ noch genauer erklärt und es wird auf die Zertifizierung von biobasierten Kunststoffen eingegangen.

#### 4.2.1 Biologisch abbaubare Kunststoffe

Wie bereits anfangs erwähnt, gibt es sowohl erdölbasierte als auch biobasierte Kunststoffe, sowie Mischformen (Blends), die als biologisch abbaubar gelten. Diese Eigenschaft ergibt sich aus dem molekularen Aufbau, die Rohstoffherkunft ist unerheblich (Köhler-Hammer [95] nach Endres und Siebert-Raths [61]). Die biologische Abbaubarkeit ist gegeben, wenn die Nachweise nach ÖNORM EN 13432 [138] erfüllt sind. Das bedeutet, dass sich ein Material unter normierten Bedingungen nach einer bestimmten Maximaldauer zu mehr als 90 % zu Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), Biomasse und Wasser abgebaut haben muss [21]. Diese Bedingungen sehen folgendermaßen aus [60]:

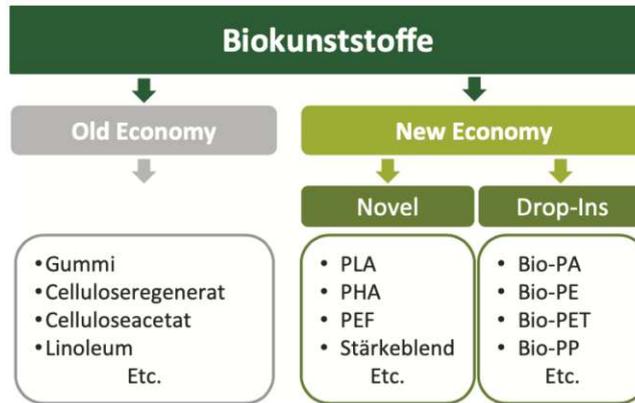
- Industriell kompostierbar innerhalb von 6 Monaten bei einer Temperatur von  $57 \pm 2^\circ\text{C}$
- Heim- und gartenkompostierbar innerhalb von 12 Monaten bei  $25 \pm 5^\circ\text{C}$
- Bioabbaubar in Boden innerhalb von 24 Monaten bei  $20\text{-}28^\circ\text{C}$
- Bioabbaubar in Süßwasser innerhalb von 56 Tagen bei  $20\text{-}25^\circ\text{C}$
- Bioabbaubar in Meerwasser innerhalb von 6 Monaten bei  $30 \pm 2^\circ\text{C}$

In der Realität kommen diese konstanten Bedingungen in der Umwelt jedoch oft nicht vor und auch in industriellen Anlagen ist die Verweildauer oft zu kurz, als dass ein vollständiger Abbau gewährleistet werden könnte. Aus diesem Grund werden vor allem biobasierte, bioabbaubare Kunststoffe vor dem Recyclingprozess oft aussortiert und verbrannt. Im Gegensatz zu konventionellen Kunststoffen ist aber bei biobasierten Kunststoffen die Menge an bei der Verbrennung freigesetztem CO<sub>2</sub> geringer [125].

#### 4.2.2 Biobasierte Kunststoffe

Im Gegensatz zu herkömmlichen Kunststoffen, welche auf fossilen Rohstoffen basieren, werden biobasierte Kunststoffe, vollständig oder teilweise, aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt. Aufgrund der vielen verschiedenen Endprodukte gibt es auch unterschiedliche Arten der Kategorisierung. Eine Möglichkeit ist die Unterscheidung in „Old Economy“ und „New Economy“-Werkstoffe. Während Old Economy-Materialien schon lange bekannt sind und zu den ersten entwickelten Kunststoffen zählen, sind New Economy-Werkstoffe relativ neue Erfindungen

der letzten Jahrzehnte. Diese wiederum lassen sich unterteilen in Novels, also neu entwickelte Kunststoffe mit einzigartigen Eigenschaften, und Drop-Ins, wie Bio-PE. Diese „sind strukturgleich zu ihren konventionellen Pendanten, besitzen also dieselben chemischen und mechanischen Eigenschaften und können für die gleichen Anwendungen eingesetzt und problemlos zusammen recycelt (z. B. PET und Bio-PET) werden“ [60].



**Abb. 4.3:** Klassifikation von Biokunststoffen  
(Bildquelle: Endres et al. [60])

Strukturell lassen sich Biokunststoffe außerdem noch danach unterscheiden, wie weit sie chemisch verändert wurden bzw. wie viel menschliches Zutun notwendig ist, um diese herzustellen. Grob lassen sich hier folgende drei Gruppen unterscheiden:

- natürliche Polymere
- Biopolymere aus biogenen Monomeren
- Bioverbundwerkstoffe

Natürliche Polymere sind von lebenden Organismen wie Pflanzen, Algen oder Mikroorganismen stammende Polymere wie beispielsweise Lignin, Proteine oder Polysaccharide (Mehrfachzucker), und werden auch als Biopolymere bezeichnet [183]. Je nach weiterer Verwendung muss die chemische Struktur nur geringfügig verändert werden oder kann sogar erhalten bleiben [141].

Ebenfalls als Biopolymere werden Polymere bezeichnet, welche durch menschliches Zutun aus biobasierten Monomeren synthetisiert werden [187]. Die Ausgangsstoffe sind also biogenen Ursprungs, werden aber durch chemische Prozesse stark verändert, um das gewünschte Material zu erhalten.

Die dritte Gruppe bilden die Bioverbundwerkstoffe. Sie setzen sich in der Regel aus einer Kunststoffmatrix und einer Faser-Komponente zusammen und werden dann als Bioverbundwerkstoffe bezeichnet, wenn zumindest eine der Komponenten biobasiert ist. Die wichtigsten sind die naturfaserverstärkten Kunststoffe (NFK) und die Holz-Polymer-Werkstoffe (englisch: *Wood-Plastic-Composites*, kurz WPC) [39].

### 4.2.3 Zertifizierung biobasierter Kunststoffe

Zur Zeit gibt es keine normativen Regelungen, ab welchem biobasierten Gehalt tatsächlich von einem biobasierten Kunststoff zu sprechen ist. In der ÖNORM EN 17228 [141] wird angemerkt, dass die Experten von CEN/TC249/WG17 die Aussage „biobasiert“ unter einem biobasierten Gehalt von 25 % der Gesamtmasse als nicht sinnvoll erachten. Auch bei der Ermittlung des

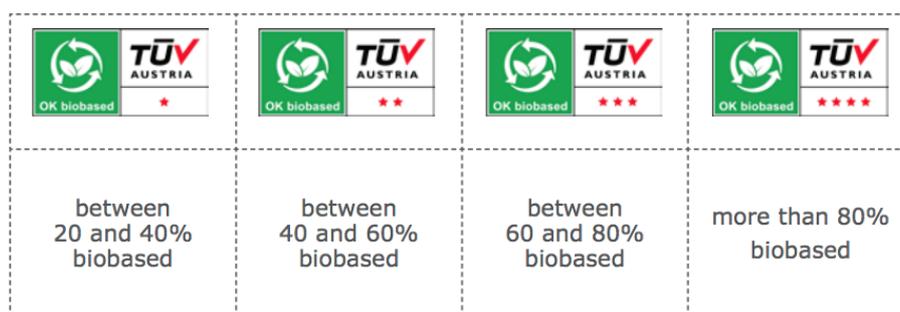
biobasierten Anteils gibt es verschiedene Ansätze, die für das gleiche Produkt zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. So kann zum einen die Masse des biobasierten Anteils durch eine Elementaranalyse ermittelt und in Relation zur Gesamtmasse angegeben werden. Andererseits kann durch die Radiokarbonmethode der Anteil an biobasiertem Kohlenstoff bestimmt und mit dem gesamten Kohlenstoffgehalt verglichen werden. Zusätzlich kann durch Ermittlung des Glühverlustes der Anteil an organischen Stoffen bestimmt werden, da beim Verbrennen einer zuvor bis zur Massekonstanz getrockneten Probe organisches Material verbrennt und anorganische Stoffe als Rückstand übrig bleiben [55].

Die Ansätze für eine Zertifizierung sind demnach unterschiedlich. So gibt es nach Iwata [86] beispielsweise in Japan mehrere Logos zur Kennzeichnung von biobasierten Kunststoffen, wobei ein Zertifikat schon ab einem biobasierten Gehalt von  $> 5\%$  verliehen wird. In Europa geht der Ansatz in die Richtung, den biobasierten Gehalt in unterschiedlichen Gehaltsklassen darzustellen. DIN CERTO unterteilt die Qualitätsstufen nach dem Anteil an biobasiertem Kohlenstoff in die Bereiche  $20 - 50\%$ ,  $50 - 85\%$  und  $> 85\%$ . Zusätzlich muss der Anteil an organischem Material mindestens  $20\%$  betragen [55].



**Abb. 4.4:** Zertifizierung durch DIN CERTCO durch Unterteilung nach Anteil an biobasiertem Kohlenstoff in drei Qualitätsstufen (Bildquelle: DIN CERTCO – Zertifizierungsprogramm Biobasierte Produkte [55])

Im Dezember 2017 übernahm die TÜV AUSTRIA Group von der belgischen Zertifizierungsstelle Vinçotte das Label *ok compost* und damit auch das Label *ok biobased*, welches den Anteil an biobasiertem Kohlenstoff in vier Qualitätsstufen darstellt. Hier wird 1 Stern für  $20 - 40\%$  vergeben, zwei Sterne für  $40 - 60\%$ , drei Sterne für  $60 - 80\%$  und vier Sterne für einen biobasierten Kohlenstoffanteil von  $> 80\%$ .

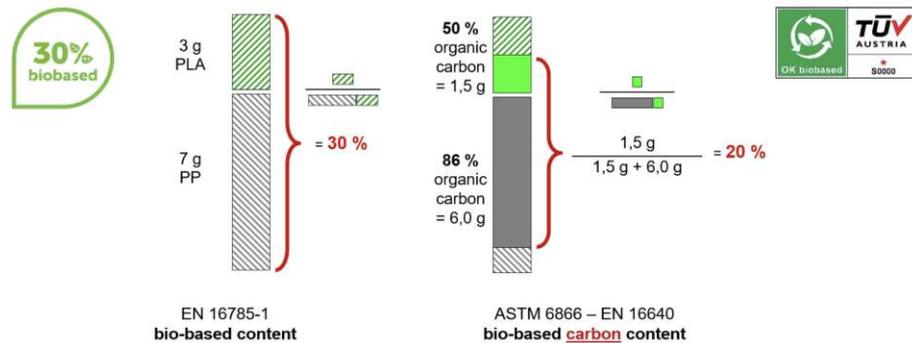


**Abb. 4.5:** Klassifikation der Zertifizierung durch TÜV AUSTRIA durch Vergabe von ein bis vier Sternen (Bildquelle: Beta Analytic [24])

Eine dritte Möglichkeit bietet das Zertifikat des niederländischen Normungsinstitutes NEN *biobased%*, welches von DIN CERTCO und TÜV AUSTRIA Belgium ausgestellt wird [124]. Im Gegensatz zu den anderen beiden Zertifikaten wird hier jedoch der biobasierte Gehalt der

Gesamtmasse, welcher durch eine Elementaranalyse ermittelt wurde, angegeben. Die Angabe erfolgt außerdem nicht in Klassen sondern auf den Prozent genau.

Die unterschiedlichen Konzepte der Angabe von biobasiertem Masse- bzw. Kohlenstoffanteil können somit für ein Produkt zu verschiedenen Ergebnissen führen. Im Informationsdokument 536 der TÜV AUSTRIA Belgium [188] wird dies anhand folgenden Beispiels erklärt:



**Abb. 4.6:** Vergleich der Nachweiskonzepte biobasierte Masse und biobasierter Kohlenstoffanteil (Bildquelle: TÜV AUSTRIA Belgium – Information Document 536 – bio-based content vs bio-based carbon content [188])

Es wird von einem Produkt ausgegangen, welches zu 30 % aus pflanzenbasiertem PLA besteht, was wiederum 50 % Kohlenstoff enthält, und zu 70 % aus PP petrochemischen Ursprungs mit einem Kohlenstoffgehalt von 86 %. Bei einem Nachweis über die biobasierte Masse erhält man als Ergebnis einen biogenen Anteil von 30 %, bei einem Nachweis über den biobasierten Kohlenstoffanteil liegt das Ergebnis nur bei 20 %.

### 4.3 Kunststoffe in Architektur und Bauwesen

Nach der Verpackungsindustrie, welche 2015 fast 36 % der jährlich produzierten Kunststoffmenge weltweit beanspruchte, ist der Bausektor mit 16 % bzw. 65 Millionen Tonnen der zweitgrößte Abnehmer für Kunststoffe [40]. Hier ist der am häufigsten verwendete Kunststoff Polyvinylchlorid (PVC), welches beispielsweise für Bodenbeläge, Fensterrahmen und Kabelisierungen verwendet wird. Aber auch Polyethylen (PE) findet sich im Bauwesen häufig, dieses wird z. B. für Folien und Rohre verwendet. Ebenfalls kaum noch aus der Bauindustrie wegzudenken sind Dämmplatten aus expandiertem bzw. extrudiertem Polystyrol (EPS und XPS).

#### 4.3.1 Kunststoffe als tragende Bauteile

Die oben angeführten typischen Einsatzgebiete sind allesamt Anwendungen in statisch nicht relevanten Funktionen, doch neben diesen werden Kunststoffe im Bauwesen auch in tragender Form verbaut. Während sich die Anwendung von Kunststoffen wie Epoxidharz und Epoxidharzmörtel als Verstärkung und Reparatur von Beton- und Mauerwerksbauten „aufgrund der hohen erreichbaren Druck- und Biegezugfestigkeit, der guten Haftung auf im Bauwesen üblichen Stoffen und Oberflächen und der guten Beständigkeit gegenüber Wasser und wässrigen Lösungen verschiedenster Chemikalien“ [161] jedoch schon längst bewährt hat, werden gänzlich aus Kunststoffen bestehende tragende Bauteile im Moment noch relativ selten realisiert. Allerdings haben Krahwinkel und Gehmert [96] bereits 2011 auf den wachsenden Trend von (faserverstärkten) Kunststoffen als Werkstoff für tragende Bauteile im Bauwesen hingewiesen.

Die Verwendung von faserverstärkten Kunststoffen (FVK) vergrößert die Einsatzgebiete von Kunststoffen drastisch. Im nachfolgenden Kapitel werden daher faserverstärkte Kunststoffe genauer beschrieben, da diese zumeist zum Einsatz kommen, wenn tragende Bauteile aus Kunststoffen hergestellt werden sollen. Anschließend folgt eine Vorstellung von einigen Bauwerken, die mit FVK realisiert wurden.

#### 4.3.1.1 Faserverstärkte Kunststoffe (FVK)

Wie auch schon in Kapitel 4.1 *Kunststoffe allgemein* beschrieben, bestehen FVK aus einer Kunststoffmatrix und Verstärkungsfasern, wobei diese so miteinander verbunden werden, dass ein neuer Verbundwerkstoff mit höherwertigen Eigenschaften entsteht.

Die Hauptgründe für die bisher geringe Rolle von Kunststoffen als tragende Bauteile sind ihre Brennbarkeit und der Fakt, dass die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen sehr stark von der Dauer der Belastung und der umgebenden Temperatur abhängig sind. So führen eine längere Belastungsdauer sowie Temperaturen ab 40°C zu deutlich geringeren Festigkeitswerten als eine kurzzeitige Belastung bei 20°C [161]. Diese Eigenschaften sind bei Duroplasten weniger stark ausgebildet als bei Thermoplasten, allerdings sind Duroplaste schlechter recycelbar, da sie nach dem Aushärten nicht mehr einschmelzbar sind. Aufgrund der besseren mechanischen Eigenschaften sowie der höheren Langzeit- und thermischen Stabilität [92], werden im Bauwesen derzeit vor allem Duroplaste als Matrixkomponente für faserverstärkte Kunststoffteile eingesetzt.

Am häufigsten werden hier ungesättigte Polyesterharze (UP) und Epoxidharze (EP) und in speziellen Fällen Phenolharze (PF) oder Vinylesterharze (VE) verwendet. UP-Harze kommen am häufigsten zum Einsatz, da sie am günstigsten sind, eine geringe Feuchtigkeitsaufnahme und auch noch bei geringen Temperaturen eine hohe Zähigkeit aufweisen. EP-Harze sind um einiges teurer als UP- und VE-Harze, haben aber bessere mechanische Eigenschaften und eine deutlich geringere Schrumpfung als UP-Harze. VE-Harze liegen preislich und bezüglich der mechanischen Kennwerte zwischen den UP- und den EP-Harzen. Sie zeichnen sich jedoch durch eine gute chemische Beständigkeit und Ermüdungsfestigkeit aus. PF-Harze haben geringere Festigkeiten, besitzen jedoch einen höheren Brandwiderstand.

Auch wenn beispielsweise Epoxid- oder Polyurethanharze bereits biobasiert hergestellt werden können, und auch eine Verwendung in faserverstärkten Kunststoffen technisch möglich ist, sind die biobasierten Pendanten für einen großen Markterfolg derzeit noch zu teuer. Knippers et al. [92] sehen auch in den fehlenden Langzeiterfahrungen einen Grund, weshalb ihre Verwendung für tragende Baukonstruktionen noch eine untergeordnete Rolle spielt.

Als Verstärkungsfasern werden derzeit im Bauwesen vor allem Glasfasern und Kohlenstofffasern eingesetzt [96]. Die aus geschmolzenem Glas gesponnenen Glasfasern sind isotrop, nicht brennbar und verhalten sich bis zum Bruch linear-elastisch. Ein hoher Erweichungspunkt von 625°C lässt auch eine Dauerbeanspruchung bei hohen Temperaturen ohne Einbußen bei der Festigkeit zu. Allerdings sind sie sehr kerbempfindlich [92]. Standardglasfasern sind nicht alkaliresistent, es gibt jedoch auch alkaliresistente Fasern für die Verwendung in textilbewehrten Betonen. Für den Einsatz in glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) können die Fasern überwiegend unidirektional in eine Hauptrichtung orientiert werden, in zwei zueinander rechtwinkligen Richtungen verwebt oder als Matten in jede Richtung zeigend angeordnet werden, wobei in Faserrichtung die höchsten Festigkeitswerte erzielt werden [161]. Wie alle anderen faserverstärkten Kunststoffe auch, sind GFK anisotrop, also von der Belastungsrichtung abhängig. Während die Zugfestigkeit in Faserrichtung auf dem Niveau von hochfesten Baustählen liegt, entspricht die Festigkeit quer zur Faserrichtung nur der des matrixbildenden Kunststoffes. Sowohl Glasfasern als auch Kohlenstofffasern werden mit einem Oberflächenschutz, der sogenannten Schlichte, versehen, die zusätzlich die Haftung zwischen Faser und Matrix verbessert [92]. Kohlenstofffasern sind

deutlich steifer als Glasfasern, jedoch sind bereits die Fasern selbst stark anisotrop. Sie sind spröde und knickempfindlich, besitzen allerdings eine gute Dauerschwingfestigkeit. Kohlenstofffasern sind korrosions- und alkalienbeständig und sind gute thermische sowie elektische Leiter. Der Kontakt von kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) und Stahl sollte allerdings vermieden werden, da dieser zu starker Stahlkorrosion führt [92]. Aufgrund ihres hohen Preises werden sie im Bauwesen meist punktuell und nur in kleinen Mengen als benötigte Verstärkung eingesetzt.

Prinzipiell wäre auch die Verwendung von Aramidfasern möglich, allerdings sorgen einige ihrer Eigenschaften dafür, dass diese in der Bauindustrie kaum eingesetzt werden [92]. Dies sind die Neigung zur Feuchtigkeitsaufnahme, eine geringe UV- und Temperaturbeständigkeit sowie eine aufgrund der im Gegensatz zur Zugfestigkeit deutlich geringeren Druckfestigkeit schlechte Eignung für biege- oder druckbeanspruchte Bauteile. Während Metallfasern aufgrund des schlechten Verbundes generell nicht als Verstärkung für Kunststoffe verwendet werden, sehen Knippers et al. [92] ein großes Potential für die Zukunft in Basaltfasern, die in ihren mechanischen Eigenschaften den Glasfasern ähneln, jedoch beständiger gegen Säuren und Laugen sind. Obwohl sie nicht aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen, zählen Basaltfasern dennoch zu Naturfasern, da sie aus einer Gesteinsschmelze hergestellt werden. Als Rohstoff dient vulkanischer Basalt. Dieses Gestein macht etwa 13 % der Erdkruste aus [170]. Es ist also reichlich vorhanden. Zudem halten Basaltfasern recht hohen Temperaturen von bis zu 700°C stand.

Die Eigenschaften von Naturfasern werden in Kapitel 5.4.1.1 *Naturfasern und ihre Eigenschaften* genauer behandelt. Im Bauwesen haben naturfaserverstärkte Kunststoffe bisher kaum eine Bedeutung erlangt. Die Gründe hierfür können in der großen Varietät der mechanischen Eigenschaften und der Neigung zur Feuchtigkeitsaufnahme [92], der schlechten Haftung zwischen Matrix und Fasern [81] oder auch in der noch nicht ausreichenden Normung [71] gesehen werden.

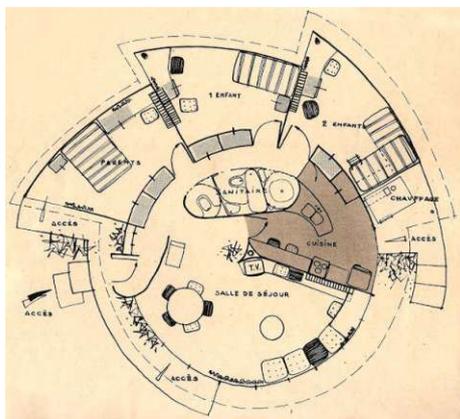
#### 4.3.1.2 Anwendungsbeispiele von faserverstärkten Kunststoffen als tragende Struktur

Die ersten Versuche, tragende Teile oder gesamte Gebäude aus faserverstärkten Kunststoffen herzustellen, gab es bereits Mitte der 1950er Jahre. Kunststoffe erlangten in dieser Zeit immer mehr an Bedeutung und ihnen wurde ein großes Potential für den Wohn- und Hausbau zugeschrieben. Obwohl es einige verschiedene Projekte gab, blieb es meist bei Prototypen [186]. Zum einen gestaltete sich die Herstellung der Teile oft schwieriger als geplant und zum anderen gab es kaum Möglichkeiten, einen ausreichenden Brandschutz zu gewährleisten. Die meisten dieser Projekte wurden mit glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) realisiert. Das Bauen mit Naturfasern wird hingegen erst seit wenigen Jahren erforscht und steht noch ganz am Anfang. Im Folgenden wird ein Überblick über einige wichtige und interessante Bauten aus faserverstärkten Kunststoffen gegeben.

#### **Maison en Plastique - Ionel Schein, Yves Magnant, René Coulon - 1956, Frankreich**

Als erstes Gebäude, bei dem tragende Elemente aus FVK realisiert wurden, gilt die Maison en Plastique von den französischen Architekten Ionel Schein und René-André Coulon sowie dem Bauingenieur Yves Magnant [186]. Der Prototyp wurde 1956 für den Salon des Arts ménagers in Paris gebaut. Bei der Formgebung von einem Schneckenhaus inspiriert, wurde ein modularer Ansatz gewählt, bei dem in einem kreisförmigen Kern die öffentlichen Bereiche wie Küche, Wohn- und Esszimmer sowie Sanitärräume angeordnet waren und rundherum Module mit weiteren Räumen angeschlossen werden konnten. So sollte es beispielsweise möglich sein, ein Modul hinzuzufügen, wenn ein Kind geboren wird [19]. Die Wände, Böden und Decken wurden aus glasfaserverstärkten Sandwichpaneelen gefertigt. Die verklebten Acrylglasfenster fungierten als Teil des tragendes Systems. Auch die Innenausstattung wurde aus Kunststoffen produziert. Das

Gebäude war zerlegbar und wurde im Laufe der Jahre fünfzehnmal auseinandergenommen und wieder zusammengebaut [186] nach [110].



(a) Maison en Plastique - Grundriss (Bildquelle: astudejaoublié.blogspot [19])

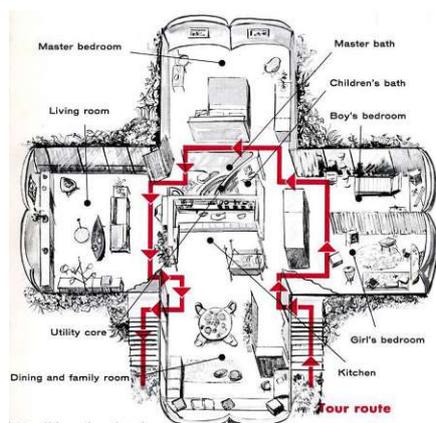


(b) Maison en Plastique - Ansicht (Bildquelle: Alchetron [13])

**Abb. 4.7:** Maison en Plastique - I. Schein, Y. Magnant, R. Coulon - 1956, Frankreich

#### Monsanto House of the Future - Richard Hamilton, Marvin Goody, Albert Dietz - 1957, USA

Zu den bekanntesten frühen Gebäuden aus FVK dürfte auch das Monsanto House of the Future gehören. Es wurde 1957 vom Bauingenieur Albert Dietz vom *Massachusetts Institute of Technology* und den *MIT*-Architekten Richard Hamilton und Marvin Goody in Auftrag des Monsanto Chemieunternehmens errichtet. Das besondere an diesem Projekt war ein erstmals an das Material angepasste Design, bei dem jeweils vier mal zwei große C-förmige GFK-Bauteile freitragend auf einem quadratischen Betonkern befestigt wurden. Ihre Untergurte stützten sich an dem Kern ab, ihre Obergurte wurden durch ein Brettschichtholz-Balkensystem verbunden [186]. Die Bögen bestanden aus einer GFK-Außenhaut und einem Kern aus Papierwaben und PUR-Schaum.



(a) Monsanto House of the Future - Grundriss (Bildquelle: Maneval [109])



(b) Monsanto House of the Future - Ansicht (Bildquelle: Maneval [109])

**Abb. 4.8:** Monsanto House of the Future - R. Hamilton, M. Goody, A. Dietz - 1957, USA

Obwohl das Haus ursprünglich für eine Serienfertigung konzipiert war, mussten die Bauteile arbeitsintensiv von Hand gefertigt werden, sodass es nur bei einem Prototyp blieb, der bis zu seinem Abriss 1967 im Tomorrowland im kalifornischen Disneyland ausgestellt war und ein Haus aus dem Jahr 1986 darstellen sollte. In seinem zehn jährigen Bestehen wurden in dem Haus über 20 Millionen Besuchern zahlreiche futuristische Innovationen vorgestellt, die damals zwar nicht betriebsbereit waren, jedoch teilweise heute tatsächlich in unseren Wohnungen zu finden sind, wie Flachbildschirmfernseher oder Mikrowellenöfen [109]. Tracy beschreibt in seiner Arbeit [186], dass die Brandgefahr scheinbar kaum beachtet wurde, da die verwendeten Lamine zwar als selbstverlöschend betitelt wurden, es jedoch unklar sei, „ob dies auf einem etablierten Standard beruhte“. Die Demontage gestaltete sich außerdem schwieriger als geplant. Es wird behauptet, dass eine Abrissbirne sogar vom Haus abprallte ohne es zu zerstören [109], weswegen die Arbeiter den Kunststoff mit Kettensägen zerlegen mussten.

### Fertighaus Doernach - Rudolf Doernach - 1958, Deutschland

1958 wurde Deutschlands erstes FVK-Gebäude nach den Vorstellungen des Stuttgarter Architekten Rudolf Doernach errichtet. Hierfür wurden vier idente GFK-Sandwichelemente so angeordnet, dass sie einen etwa 50 m<sup>2</sup> großen sechseckigen Raum bildeten. Die sechseckigen Module sollten beliebig anordenbar sein. Mit einem flüssigkeitsgefüllten Rohrsystem durch die Elemente wollte Doernach die Feuerbeständigkeit erhöhen, um eine in der Norm geforderte Beständigkeit von F30 zu erreichen [186]. Später schrieb er dazu: „Das Problem der Brandstabilität von mind. F30 war 1957 nicht lösbar“ [56]



(a) Fertighaus Doernach - Grundriss  
(Bildquelle: Tracy [186])



(b) Fertighaus Doernach - Ansicht (Bildquelle: Tracy [186])

**Abb. 4.9:** Fertighaus Doernach - R. Doernach - 1958, Deutschland

### Dubai International Airport - Brian Broughton, Keith Page - 1971, VAE

Das Gebäude des Internationalen Flughafens in Dubai dürfte zu den bekanntesten, auf jeden Fall aber zu den größten GFK-Bauwerken zählen. Der Hauptteil des 1971 eröffneten Terminal 1 umfasste eine Fläche von 116 x 233 m<sup>2</sup> und bestand aus 56 Säulenpilzen aus glasfaserverstärktem Polyester, die jeweils in ein trichterförmiges, quadratisches Dach mit 19,40 m Seitenlänge übergingen [186]. Außerdem gab es vier Finger, die aus 52 weiteren, vornehmlich kleineren Säulenpilzen mit einem Ausmaß von jeweils 9,70 m bestanden, und zu den Gates führten. Auch die Kuppel für die Prominentenwartehalle und die Außenflächen des Kontrollturmes wurden aus glasfaserverstärkten Kunststoffen gefertigt [199]. Die Bauteile wurden in Großbritannien hergestellt und in Einzelteilen in die Vereinigten Arabischen Emirate transportiert, wo diese

dann vor Ort zusammengeschaubt wurden [41]. Bei einem Vergleich mit aktuellen Luftbildern (siehe Abb. 4.10b) fällt auf, dass die Halle einmal vergrößert wurde und nun siebzehn statt zwölf Säulenreihen lang ist. Die Vergrößerung dürften im Zuge der Umbauarbeiten 2013 [177] stattgefunden haben.



(a) Dubai International Airport 1971 (Bildquelle: The National UAE [181])



(b) Dubai International Airport im Dezember 2013 (Bildquelle: Shaikh [171])

**Abb. 4.10:** Dubai International Airport - B. Broughton, K. Page - 1971, VAE

### Fußgängerbrücke Kolding - Rambøll Group - 1997, Dänemark

Immer öfter werden Brückenfahrbahnen, aber auch ganze Brückentragwerke aus glasfaserverstärkten Kunststoffen errichtet [92]. So wurde 1997 im dänischen Kolding eine Fuß- und Radwegbrücke erbaut, welche nicht nur als die erste Kunststoffbrücke Skandinaviens, sondern auch als die erste GFK-Brücke, die über eine Eisenbahnstrecke verläuft, gilt [35]. Die Schrägseilbrücke hat eine Gesamtlänge von 40 m und erstreckt sich über zwei Felder zu 27 m bzw. 13 m Spannweite.



**Abb. 4.11:** Fußgängerbrücke Kolding - Rambøll Group - 1997, Dänemark (Bildquelle: Fiberline Building Profiles A/S [66])

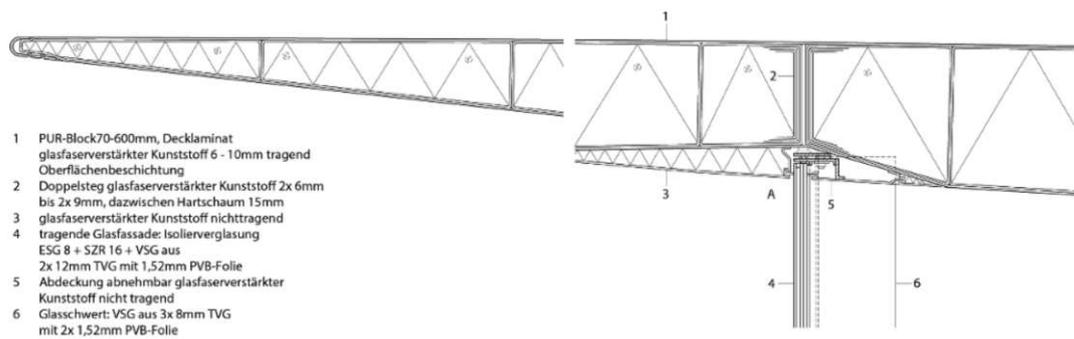
Die Nutzlast wurde mit  $5,0 \text{ kN/m}^2$  angenommen. Sowohl die Profile als auch die Spannkabel sind aus einem glasfaserverstärkten Polyesterharz gefertigt. Die einzigen Stahlbauteile sind die Bolzen, die die Konstruktion in ihrem Betonfundament verankern [35]. Das Gesamtgewicht von 12,5 t entspricht dabei weniger als der Hälfte einer vergleichbaren Stahlkonstruktion. Um den Bahnverkehr nicht zu stark zu beeinträchtigen, war eine kurze Montagezeit besonders wichtig. So wurde die vom dänischen Ingenieurbüro Rambøll Group entworfene Brücke in nur drei Nächten und insgesamt 18 Arbeitsstunden errichtet [35, 66]. Neben dem Vorteil der kurzen Errichtungszeit und dem geringen Gewicht führt der Hersteller der Profile, das dänische Unternehmen Fiberline Building Profiles A/S, eine hohe Festigkeit und Steifigkeit bei guter elektrischer Isolierfähigkeit und die aufgrund hoher Witterungs- und Korrosionsbeständigkeit lange Lebensdauer bei minimalem Instandhaltungsaufwand sowie die Erfüllung höchster Sicherheitsstandards und Toleranzen [66] als Argumente für eine Brücke aus GFK an.

### **Empfangsgebäude Novartis - Marco Serra, Ernst Basler + Partner - 2007, Schweiz**

Auch einzelne tragende FVK-Bauteile in Kombination mit anderen Materialien sind möglich. So wurde das GFK-Dach des Empfangsgebäudes des Novartis Campus in Basel, auf einer lastabtragenden Glasfassade gelagert, um einen leichten, schwebenden Anschein zu erwecken [77]. Das Dach, welches in Sandwichbauweise ausgeführt wurde, besteht aus 460 größtenteils individuell geformten CNC-gefrästen PUR-Schaumblöcken mit bis zu zwölf GFK-Deckschichten, die schlussendlich zu einem  $400 \text{ m}^2$  großen, fugenlosen Bauteil verbunden wurden [92]. Diese Konstruktion mit einem Flächengewicht von nur  $70 \text{ kg/m}^2$  ermöglicht es, das Dach an der Südseite fünf Meter auskragen [152] und gleichzeitig leicht und filigran wirken zu lassen. Ein ausgeklügeltes Beleuchtungssystem unterstreicht die Wirkung bei Nacht besonders deutlich.

### **Fußgängerbrücke aus naturfaserverstärktem Biopolymer - Technische Universität Eindhoven - 2016, Niederlande**

Im Gegensatz zu den oben vorgestellten Projekten, welche allesamt aus glasfaserverstärkten Kunststoffen petrochemischen Ursprungs bestehen, war das Ziel des folgenden Forschungsprojekts „der Nachweis, dass NFRBP [Natural Fiber Reinforced Bio-Polymer - Naturfaserverstärktes Biopolymer, Anm.] als tragende Struktur im Außenbereich eingesetzt werden kann“ [33]. Die Spannweite der Brücke beträgt 14 m, die Verkehrslast wurde mit  $5,0 \text{ kN/m}^2$  angenommen. Beim Entwurfsprozess der Brücke wurde auf ein dem Material angepasstes Design sowie Ästhetik und Wirtschaftlichkeit geachtet. So wurde der Querschnitt nach der Annahme, dass Bioverbundwerkstoffe unter Spannung eine höhere Festigkeit und Steifigkeit besitzen als unter Druck, optimiert und verändert sich von einem rechteckigen Querschnitt am Auflager zu einem dreieckigen Profil in der Mitte (siehe Abb. 4.13a). Als Material wurde ein Epoxidharz mit 56 % Bioanteil mit einer Verstärkung von gewebten Flachfasern und zufällig orientierten Hanffasern gewählt, sowie ein nicht tragender Kern aus PLA-Schaum als verlorene Schalung [33]. Teil der Forschungsarbeit war ein In-situ-Monitoring, um das Langzeitverhalten zu beobachten. Dabei kamen Blok et al. [33] zu dem Ergebnis, dass das tatsächliche Langzeit-Kriechverhalten größer war als aus Laborversuchen erwartet und schlussfolgerten daraus, dass das Materialverhalten bezüglich des Kriechens für zukünftige NFRBP-Brücken verbessert werden muss. Die Brücke stand bis 2019 [132] in Eindhoven, und war Vorbild für das EU Projekt *Smart Circular Bridge for a circular build environment*, im Zuge dessen bis 2023 drei neue Brücken aus naturfaserverstärkten Biopolymeren errichtet werden sollen [68]. Die erste dieser Brücken wurde am 22. April 2022 in Almere, Niederlande eröffnet.



(a) Empfangsgebäude Novartis Campus Konstruktionsschnitt (Bildquelle: Knippers et al. [92])



(b) Empfangsgebäude Novartis Campus (Bildquelle: © Lukas Roth, Licht Kunst Licht [101])

**Abb. 4.12:** Empfangsgebäude Novartis Campus - M. Serra, E. Basler + Partner - 2007, Schweiz

### 4.3.2 Fassadenanwendungen von Kunststoffen

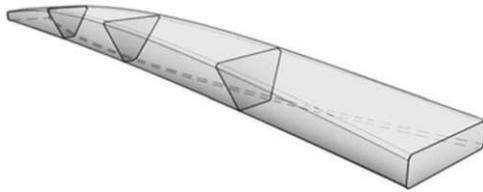
Kunststoffe sind von unseren Fassaden kaum noch wegzudenken. Während sich bei herkömmlichen Wohngebäuden oft Dämmplatten aus EPS (Expandiertem Polystyrol) unter dem Putz verstecken, gibt es immer mehr Gebäude, deren Architektinnen oder Architekten auf deutlich sichtbare Fassadenelemente aus Kunststoffen setzen. Diese werden meist dann realisiert, wenn das Augenmerk der Architektur auf kreativ geformten, transluzenten oder hinterleuchteten Elementen liegt. Auch die Vermeidung von Wärmebrücken kann durch die schlechte Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen ein Grund für die Materialwahl sein. In dem Bereich der Fassadenanwendungen lassen sich außerdem immer mehr Beispiele für biobasierte Kunststoffelemente finden.

#### 4.3.2.1 Anwendungsbeispiele mit erdölbasierten FVK

Aufgrund der im Moment noch größeren Popularität von petrochemischen Kunststoffen, werden hier zuerst Beispiele von Fassadenanwendungen von erdölbasierten Kunststoffen vorgestellt.

#### The Walbrook Building - Foster & Partner - 2010, Großbritannien

Das Büro- und Geschäftsgebäude The Walbrook in London gilt als das erste, bei dem Faser-verbundwerkstoffe in großem Maßstab an der Fassade eingesetzt wurden [72]. Bei den GFK-Fassadenelementen handelt es sich um feststehende geschwungene Verschattungslamellen, die das gesamte Gebäude einhüllen. Aufgrund der komplexen und geschwungenen Geometrie des



(a) Veränderlicher Querschnitt der NFRBP-Brücke der TU Eindhoven (Bildquelle: Blok et al. [33])



(b) NFRBP-Brücke 18 Monate nach Fertigstellung (Bildquelle: Blok et al. [33])

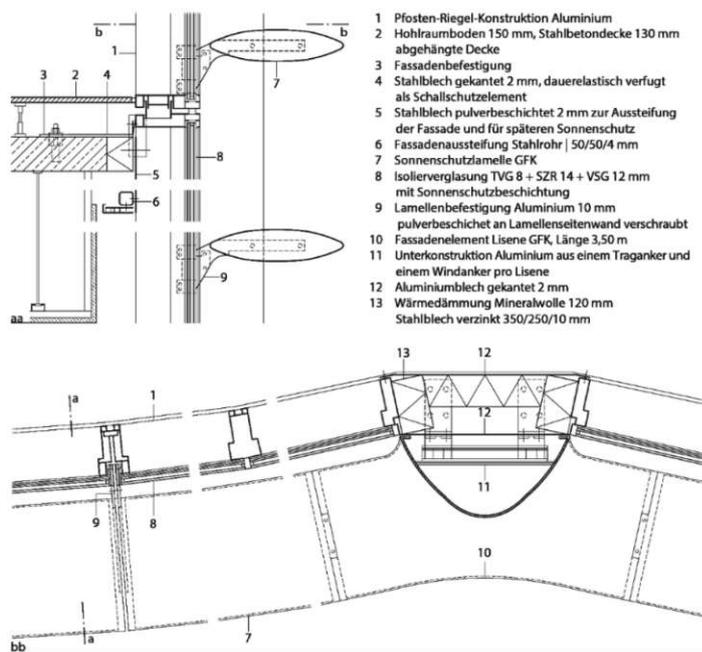
**Abb. 4.13:** Fußgängerbrücke aus naturfaserverstärktem Biopolymer - Technische Universität Eindhoven - 2016, Niederlande

Gebäudes fiel die Materialwahl auf glasfaserverstärkten Kunststoff. Die horizontal verlaufenden Lamellen sind an vertikalen Lisenen (hervortretende Verstärkungen an den Wänden), welche das Gebäude in etwa 9 m breite Abschnitte gliedern, befestigt. Je nach Sonnenstand tragen die Elemente zur Verschattung bei oder leiten Streulicht ins Gebäudeinnere [92]. Für die Fertigung der Lamellen wurden erst Urformen aus PUR-Hartschaum gefräst, aus welchen dann Negativabdrücke aus GFK erzeugt wurden. Zwei solcher GFK-Negativformen bildeten dann eine elliptische Hohlform, in welche das Glasfasergewebe manuell eingelegt und mit Polyesterharz getränkt wurde. Mittels einem eingelegten Folienschlauch wurde das noch nasse GFK von innen in seine Form gepresst. Insgesamt wurden so um die 4000 Sonnenschutzlamellen mit einer Breite zwischen 20 cm und 50 cm und etwa 750 Lisenen erzeugt [72]. Für die Ästhetik wurden die Elemente mit einem Hochglanzlack aus dem Automobilbau veredelt. Durch Brandversuche konnte außerdem bestätigt werden, dass die Lamellen die Brandschutzklasse B nach EN 13501 erfüllen [92].

#### Deichman Bjørvika - Lundhagem, Atelier Oslo - 2020, Norwegen

Bereits 2009 gewannen die Architekturbüros Lundhagem und Atelier Oslo mit ihrem Entwurf den Architekturwettbewerb für die Neugestaltung der Deichman Bibliothek, eine der ältesten öffentlichen Bibliotheken Norwegens. In der Entwicklungsphase des Gesamtkonzeptes des neuen Hauptgebäudes der Deichman Bibliothek im Osloer Stadtteil Bjørvika rückte neben dem außergewöhnliche Design der Wunsch nach einem offenen, lichtdurchfluteten Innenraum und einer dem Passivhausstandard entsprechenden Bauweise immer mehr in den Mittelpunkt. Um dies zu erreichen, wurden die Fassadenflächen der Obergeschoße als Elementfassade durch ein innovatives, eigens hierfür erdachtes Form- und Materialkonzept realisiert [167]. Die Basiselemente bilden vertikale mit Wärmedämmung gefüllte Fassadenpfosten aus brandschutzklassifiziertem, glasfaserverstärkten Kunststoff<sup>3</sup> mit einem Durchmesser von bis zu 50 cm mit einer zentralen Dreifachisolierglasscheibe. Die Pfosten halten innen- und außenseitig die einen Meter breiten Fassadenelemente aus Verbundsicherheitsglas, welche sich für Wartungszwecke öffnen lassen [167] und teils transparent, teils transluzent gestaltet sind, um für ein angenehmes, diffus zerstreutes Tageslicht zu sorgen. Die Fassadenelemente wurden von der deutschen Firma Roschmann hergestellt, für die Tragwerksplanung waren die Firmen Bollinger + Grohmann Ingenieure und Multiconsult [20] verantwortlich.

<sup>3</sup>Eine Anfrage bei der Fa. Roschmann, um welchen Kunststoff es sich genau handelt, wurde leider nicht beantwortet.

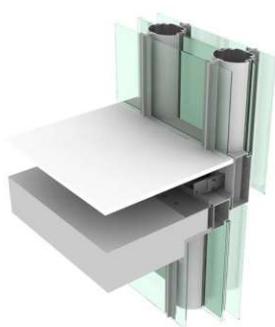


- 1 Pfosten-Riegel-Konstruktion Aluminium
- 2 Hohlraumboden 150 mm, Stahlbetondecke 130 mm abgehängte Decke
- 3 Fassadenbefestigung
- 4 Stahlblech gekantet 2 mm, dauerelastisch verfugt als Schallschutzelement
- 5 Stahlblech pulverbeschichtet 2 mm zur Aussteifung der Fassade und für späteren Sonnenschutz
- 6 Fassadenaussteifung Stahlrohr | 50/50/4 mm
- 7 Sonnenschutzlamelle GFK
- 8 Isolierverglasung TVG 8 + SZR 14 + VSG 12 mm mit Sonnenschutzbeschichtung
- 9 Lamellenbefestigung Aluminium 10 mm pulverbeschichtet an Lamellenseitenwand verschraubt
- 10 Fassadenelement Lisene GFK, Länge 3,50 m
- 11 Unterkonstruktion Aluminium aus einem Traganker und einem Windanker pro Lisene
- 12 Aluminiumblech gekantet 2 mm
- 13 Wärmedämmung Mineralwolle 120 mm Stahlblech verzinkt 350/250/10 mm



(a) Horizontaler und vertikaler Fassadenschnitt (Bildquelle: Knippers et al. [92]) (b) Außenansicht (Bildquelle: Delancey Real Estate Investment [52])

**Abb. 4.14:** The Walbrook Building - Foster & Partner - 2010, Großbritannien



(a) 3D-Fassadendetail (Bildquelle: Baunetz\_Wissen [20])



(b) Innenfassade bei Montage (Bildquelle: Baunetz\_Wissen [20])



(c) Außenansicht der Deichman Bjørvika (Bildquelle: Baunetz\_Wissen [20])

**Abb. 4.15:** Deichman Bjørvika - Lundhagem, Atelier Oslo - 2020, Norwegen

#### 4.3.2.2 Anwendungsbeispiele mit biobasierten Kunststoffen

Es gibt bereits einige Hersteller von Biokunststoffen und Bioverbundwerkstoffen, die unter anderem Fassadenverkleidungen produzieren. Im Folgenden werden einige von ihnen aufgezählt und ihre Produkte kurz vorgestellt.

##### NPSP - verschiedene naturfaserverstärkte Kunststoffe - seit 1998

Die Firma NPSP (Natural Powered Speed Products) wurde 1998 gegründet. Während die anfängliche Produktidee darin bestand, biobasierte Materialien mit dem Design von „coolen Produkten“ [133] zu verbinden, steht seit 2014 die Entwicklung von naturfaserverstärkten

Kunststoffen im Vordergrund. Der Verkaufsname der Produktlinie *Nabasco* steht für Nature Based Composites [133], also naturbasierte Komposite. Die Produktpalette umfasst drei Produkte: *Nabasco 5010*, *Nabasco 8010* und *Nabasco 9010*. *Nabasco 5010* ist ein mit Hanffasern verstärktes, teilbiobasiertes Polyesterharz, welches sich durch eine gute spezifische Steifigkeit sowie eine gute Vibrations- und Geräuschdämpfung auszeichnet, für Innen- und Außenanwendungen geeignet ist und zu 44 - 73 % biobasiert ist. *Nabasco 8010* ist ein recycelbarer, brandbeständiger, innen und außen anwendbarer und über 80 % biobasierter und recycelter Kunststoff aus einem ungesättigten Polyester mit Naturfaserverstärkung und Füllstoffen aus Restströmen. Als Faserverstärkung kann man zwischen Flachs, Schilf, recycelter Baumwolle, Jute und Sisal entscheiden. *Nabasco 9010*, welches schall- und vibrationsdämpfend sowie recycelbar ist, ist bis zu 100 % biobasiert. Es wird allerdings nur für Innenanwendungen empfohlen. Die Matrix wird hier aus PLA hergestellt, als Faserverstärkung kommen recycelte Textilfasern, Hanf oder Jute zum Einsatz. Außerdem ist ein *Nabasco 10010* genanntes Material in Entwicklung, welches 100 % bio- und abfallbasiert sowie recycelbar sein soll, gute Steifigkeitswerte und eine hohe Hitzeverträglichkeit besitzen und für Innen- und Außenanwendungen geeignet sein soll [135]. 2012 wurde in Zusammenarbeit mit dem Architekturbüro Studio Marco Vermeulen die Fassade einer Gasempfangsstation in Dinteloor, Niederlande gestaltet [176]. Für die Gasempfangsstation wurde *Nabasco 5010* gewählt. Die schokoladenbraune Farbe der Fassadenplatten (siehe Abbildung 4.16) entsteht dabei durch das Material selbst.

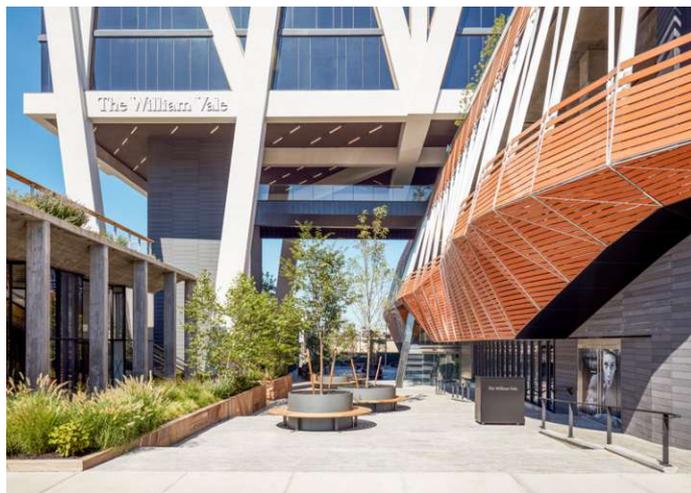


**Abb. 4.16:** Fassadenverkleidung einer Gasempfangsstation, in Dinteloor, Niederlande mit einem *Nabasco*-Material der Firma NPSP (Bildquelle: Studio Marco Vermeulen [176])

### **Resysta® - Bioverbundwerkstoff aus Reishülsen - seit 2004**

Ürsprünglich auf der Suche nach einem dauerhaften, natürlichen Werkstoff für Gartenmöbel, entdeckten die Gründer der deutschen Resysta International GmbH 2004 ein holzähnliches Material aus Reishülsen, einem Abfallprodukt der Lebensmittelindustrie, welches sie zu *Resysta*® weiter entwickelten [166]. *Resysta*® besteht etwa zu 60 % aus Reishülsen, 22 % Steinsalzen und 18 % Mineralöl. Laut Hersteller [165] ist es witterungsbeständig, wasserfest, beständig gegen UV-Strahlung, Pilz- und Schimmelbefall, rutschfest, zu 100 % recycelbar und erfüllt die

Brandschutzklasse B2 und mit Zusätzen B1<sup>4</sup>, wodurch es sich für Terrassenbeläge, Outdoormöbel, Fassaden, den Innenausbau aber auch den Schiffsbau eignet. Die Produktpalette umfasst volle Profile und Platten genauso wie Hohlprofile in diversen Ausführungen [164]. Weltweit wurden bereits über tausend Projekte mit *Resysta*<sup>®</sup> realisiert. Die Fassadenverkleidungen kamen bisher meist bei Apartmentgebäuden, einigen Einfamilienhäusern, aber auch Schulen, Büro- und Restaurantgebäuden sowie Hotels zum Einsatz [163]. Abbildung 4.17 zeigt die Fassadenverkleidung des William Vale Hotels in Brooklyn, welche zum Teil mit *Resysta*<sup>®</sup> gestaltet ist.



**Abb. 4.17:** Fassadenverkleidung des William Vale Hotels in Brooklyn mit *Resysta*<sup>®</sup>  
(Bildquelle: ©Art of Travel [18])

### Accsys - Acetylierte Holzwerkstoffe - seit 2007

Das britisch-niederländische Unternehmen Accsys vertreibt mit *Accoya*<sup>®</sup> und *Tricoya*<sup>®</sup> gleich zwei chemisch veränderte Holzwerkstoffe, die als Fassadenverkleidung verwendet werden können. Bei diesen werden die Eigenschaften von Holz durch Acetylierung mit Essigsäureanhydrid verbessert. In der Holzcellulose ist bereits eine geringen Menge an natürlichen Acetylgruppen vorhanden, die wasserabweisend wirken. Sie stehen jedoch einer viel größeren Anzahl an hydrophilen, also wasseranziehenden, Hydroxylgruppen gegenüber, die Holz witterungsempfindlich und anfällig für Fäulnis machen, sowie für Schwellung, Schrumpfung, Splintern und Verformung sorgen [9]. Durch die Acetylierung bei hohem Druck wird die Menge der Acetylgruppen erhöht, was zu einer deutlich verbesserten Beständigkeit des Holzes führt. Für die Produkte wird laut Hersteller [8] auf die Verwendung von zertifiziertem, nachhaltigen Holz geachtet. Das Essigsäureanhydrid ist fossilbasiert, wird jedoch beim Herstellungsprozess in einem Kreislaufsystem wiederverwendet.

Bei dem seit 2007 erhältlichen *Accoya*<sup>®</sup> handelt es sich um acetyliertes Massivholz, welches in den Niederlanden gefertigt wird und im Vergleich zu normalem Holz einen geringeren Wartungsaufwand bei einer verbesserten Dauerhaftigkeit für mindestens 50 Jahre verspricht [6]. Beschichtungen sollen länger halten, da es durch das verminderte Quellen und die erhöhte Formstabilität zu weniger Abplatzungen von Beschichtungen kommt. Auch für Insektenbefall ist *Accoya*<sup>®</sup>-Holz weniger anfällig. Zudem ist es laut Hersteller zu 100 % ungiftig und wie Holz recycelbar. Ohne Beschichtung vergraut es wie normales Holz. Allerdings kann mit grauer Ölung auch von Anfang an

<sup>4</sup>Die Brandschutzklasse B2 nach DIN 4102-1 entspricht den Klassen D bis E der in Österreich gültigen EN 13501, Klasse B1 (DIN 4201-1) entspricht im Wesentlichen den Klassen C bis B (EN 13501). Eine Erklärung der Brandschutzklassen laut EN 13501 erfolgt auf Seite 91.



(a) *Accoya*<sup>®</sup> Fassade an Bremer Sporthalle (Bildquelle: Accsys Technologies PLC [4])



(b) Detailansicht Fassade (Bildquelle: Accsys Technologies PLC [4])

**Abb. 4.18:** *Accoya*<sup>®</sup> Fassade an Bremer Sporthalle

eine natürliche Gräufärbung erreicht werden, wie bei der Fassade der Sporthalle einer Grundschule in Bremen, welche im Oktober 2017 fertiggestellt wurde [4] und in Abbildung 4.18 zu sehen ist.

Bei dem Schwesternprodukt *Tricoya*<sup>®</sup>, welches seit 2011 auf dem Markt ist, handelt es sich um MDF-Platten, bei deren Herstellung acetylierte Holzfasern verwendet werden. Auch bei diesem Produkt wird durch die Acetylierung das Quellen und Schrumpfen stark reduziert und dabei die Verformungsstabilität sowie die Beständigkeit gegen Pilze, Fäulnis und Witterung deutlich erhöht [5]. Dadurch eignet sich auch *Tricoya*<sup>®</sup> für die Verwendung im Außenbereich. In Zusammenarbeit mit dem chilenischen Hersteller Masisa wurde das Bosch Verkaufszentrum in Alonso de Cordova, in Vitacura, Chile mit Fassadenplatten aus *Tricoya*<sup>®</sup> ausgestattet [7]. Auch das Logo wurde aus *Tricoya*<sup>®</sup> hergestellt, um die Verwendung von Acylschildern zu vermeiden. Das Know-How kam bei dieser Zusammenarbeit von der europäischen Mutterfirma Accsys, die Platten wurden vor Ort in Chile gefertigt.



**Abb. 4.19:** Fassadenverkleidung des Bosch-Hauses Chile mit *Tricoya*<sup>®</sup>-Platten vom chilenischen Hersteller Masisa (Bildquelle: Accsys Technologies PLC [7])

#### 4.4 Kunststoffadditive

Nahezu jeder Kunststoff benötigt Additive, um die gewünschten Eigenschaften sicherzustellen oder um seine Verarbeitung zu vereinfachen. Die Einsatzfelder lassen sich dabei grob in folgende Bereiche unterteilen [126]:

- Erhalt der Polymereigenschaften
- Modifizierung der Polymerstruktur
- Modifizierung der Substanz- oder Oberflächeneigenschaften
- Erweiterung der Anwendungen bzw. der Nutzungsdauer

In Tab. 4.1 werden die Additive den jeweiligen Bereichen zugeordnet.

**Tab. 4.1:** Ein Überblick über Kunststoffadditive nach Neugebauer [126]

Erhalt der Polymereigenschaften	Erweiterung der Anwendung/Nutzungsdauer
- Verarbeitungsstabilisatoren	- UV-Absorber/Lichtstabilisatoren
- Antioxidantien	- Antioxidantien
- Antiozonantien	- Flammschutzmittel
- Wärmestabilisatoren	- Schlagzähigkeitsverbesserer
- Gleitmittel	- Optische Aufheller
- Säurefänger	- Biozide/Antimikrobika
	- Haftvermittler
Modifizierung Polymerstruktur	- Schäumungsmittel/Treibmittel
- Kettenverlängerer	- Entschäumungsmittel
- Vernetzungsmittel/Koppler	- Repellants
- Antivernetzungsmittel	- Markierer
- Kompatibilisatoren	- Pigmente
- Abbau-Additive	- Füllstoffe
- Rheologie-Modifikatoren/Thixotropiemittel	- Füllstoffdeaktivatoren
	- Hydrophilisierungs-/ Hydrophobisierungsmittel
Modifizierung Substanz/Oberflächeneigenschaften	- Verstärkungsstoffe (Glas-, Kohlefasern)
- Antistatika	- Recycling-Additive
- Nukleierungsmittel	- Acetaldehyd/Formaldehyd-Fänger
- Transparenzverbesserer	- Sauerstofffänger
- Weichmacher	- Geruchsverbesserer
- Oberflächenmodifikatoren	- Leitfähige Additive
- Slip/Antiblockmittel	
- Antifoggingmittel	
- Dispergiermittel	
- Glanzverbesserer	
- Mattierungsmittel	

Noch immer werden die meisten Additive mit Hilfe fossiler Rohstoffe hergestellt, aber mit dem steigenden Einsatz von Biokunststoffen steigt auch die Nachfrage nach biobasierten Additiven. Im Folgenden werden daher einige wichtige Additive vorgestellt, welche auch auf Basis von nachwachsende Rohstoffen hergestellt werden können.

#### 4.4.1 Weichmacher

Bereits jetzt werden viele Weichmacher aus biogenen Rohstoffen hergestellt. Einige von ihnen werden bereits seit Jahrzehnten verwendet, beispielsweise epoxidierte Pflanzenöle wie Sojabohnenöl oder Leinöl. Im Prinzip wirken Weichmacher wie schwache Lösungsmittel für Kunststoffe. Sie reduzieren die Schmelz- und Glasübergangstemperatur und wirken sich somit positiv auf die Verarbeitung aus [126]. Sie machen den Kunststoff weicher und elastischer, indem sie den Elastizitätsmodul verringern. Sie werden mit einem Anteil von 10 bis 50 Gewichtsprozent beigemischt.

Ein EU-Verbot zur Verwendung von Phtalaten als Weichmacher (siehe auch 5.3.4 *Biobasiertes Polyvinylchlorid (Bio-PVC)*) hat viel zur Forschung von biobasierten Weichmachern beigetragen. So werden neben den eingangs erwähnten Pflanzenölen auch Rizinusöl, Sonnenblumenöl und Ester der Zitronensäure als Weichmacher eingesetzt [126].

#### 4.4.2 Antioxidantien

Antioxidantien verbessern zum einen die Verarbeitungsstabilität und verlängern das Leben des Kunststoffes, indem sie die Alterung durch Oxidation verzögern. Ohne sie wäre eine Langzeitanwendung von Kunststoffen unvorstellbar. Sie werden dem Polymer in geringen Mengen von 0,05 % bis 1,0 % hinzugefügt. Natürliche Antioxidantien sind beispielsweise in Extrakten aus grünem und schwarzem Tee enthalten. Bei vielen biobasierten Antioxidantien ist jedoch die Verträglichkeit mit Polymeren eingeschränkt und im Vergleich mit synthetischen Antioxidantien ist die thermische Stabilität oft verringert [126].

#### 4.4.3 Lichtstabilisatoren (UV-Absorber)

Auch Photooxidation, also durch Licht ausgelöste Oxidation [45], lässt Kunststoffe altern. Dieser Effekt kann mit UV-Absorbern vermindert werden. Diese wandeln das absorbierte UV-Licht in einem strahlungslosen Prozess in Wärmeenergie um [126], wodurch der Kunststoff geschützt wird. Zu den wenigen bekannten natürlichen Lichtstabilisatoren zählen Zimtsäureester sowie Flavone und Flavonole, welche von alpinen Pflanzen zum Schutz vor UV-Strahlung gebildet werden. Die Wirkung natürlicher Lichtstabilisatoren ist meist geringer als jene von synthetischen. Nachdem UV-Absorber hauptsächlich bei Außenanwendungen notwendig sind und bei biobasierten Kunststoffen oft auch eine biologische Abbaubarkeit bevorzugt wird, zählen biogene Lichtstabilisatoren nicht zu den dominierenden Forschungsbereichen [126].

#### 4.4.4 Flammschutzmittel

Kunststoffe gelten generell als leicht entflammbar, weshalb oft Flammschutzmittel zum Einsatz kommen. Durch sie kann eine Entflammbarkeit oder eine Brandausweitung verzögert oder für eine gewisse Zeit sogar verhindert werden. Üblicherweise werden 15 bis 30 Gewichtsprozent den Kunststoffen beigemischt, ihr Anteil kann aber auch bis zu 80 % betragen [126]. Zur Zeit kommen immer mehr halogenfreie Flammschutzmittel beispielsweise auf Basis von organischen Stickstoff- oder Phosphorverbindungen zum Einsatz. Biobasierte Flammschutzmittel können aus Casein oder Phytinsäure hergestellt werden, wobei letztere hauptsächlich in Kombination mit synthetischen Flammschutzmitteln zum Einsatz kommt.

## 5 Nicht abbaubare, biobasierte Kunststoffe

In Kapitel 4.2.1 *Biologisch abbaubare Kunststoffe* wurde erklärt, dass sich die Eigenschaft der Abbaubarkeit aus dem molekularen Aufbau des Materials ergibt. Das bedeutet, dass biobasierte Kunststoffe, die für eine lange Lebensdauer entwickelt wurden, aufgrund ihrer chemischen Struktur meist nicht abbaubar sind. Das gilt beispielsweise auch für eigentlich abbaubare PLA-Blends, die nicht abbaubare Flammschutzmittel enthalten. Duroplaste lassen sich, unabhängig davon, ob sie petrochemisch- oder biobasiert sind, nicht recyceln oder biologisch abbauen [94]. Ob Abbaubarkeit eine erwünschte Eigenschaft ist, hängt vom jeweiligen Verwendungszweck ab. Während eine Kompostierbarkeit von Kunststoffen bei Einwegprodukten wie Verpackungen und Cateringartikeln Sinn ergibt, ist im Fall der Implementierung in Fassadenbegrünnungssystemen eine lange Lebensdauer und Widerstandsfähigkeit erwünscht, weshalb diese Arbeit den Fokus auf biobasierte, nicht abbaubare Kunststoffe legt.

Dazu werden in Kapitel 5.1 natürlich vorkommende Polymere und biobasierte Rohstoffe genannt, die zur Kunststoffherstellung verwendet werden können. Kapitel 5.2 *Modifizierte, natürliche Polymere* stellt Kunststoffe vor, die bereits durch geringfügige Bearbeitung natürlich vorkommender Polymere kommerziell genutzt werden können. In diesem und den nachfolgenden Kapiteln wird jeweils auf die Herstellung, die Eigenschaften und die typische Verwendung der aufgezählten Biokunststoffe eingegangen. Eine weitere Kategorie von biobasierten Kunststoffen wird in Kapitel 5.3 *Aus biogenen Monomeren synthetisierte Biopolymere* vorgestellt. Diese werden aus biogenen Monomeren durch menschliches Zutun synthetisiert, wobei die chemische Struktur stark verändert wird. Danach werden in Kapitel 5.4 *Bioverbundwerkstoffe* Stoffe aufgezählt, die, vergleichbar mit Stahlbeton, aus einer Matrix und einer Faser-Komponente bestehen und durch ihren Verbund einen neuen Werkstoff kreieren. Dabei können entweder die Matrix, die Fasern oder beides auf biogenen Rohstoffen basieren.

### 5.1 Natürliche Polymere und biogene Rohstoffe

In diesem Kapitel wird eine Übersicht über die wichtigsten natürlichen Polymere geboten, um die Herkunft der in den nachfolgenden Kapiteln genannten Biokunststoffe (modifizierte natürliche Polymere, Biopolymere aus biogenen Monomeren und Bioverbundwerkstoffe) und deren Rohstoffe besser verstehen zu können.

#### 5.1.1 Polysaccharide

Polysaccharide sind natürliche Mehrfach- oder Vielfachzucker, die als die am häufigsten vorkommenden Biopolymere gelten und in vielen unterschiedlichen Formen auftreten können: So wird **Cellulose** als das am öftesten vorkommende Biopolymer angesehen. Sie bildet als reißfeste Strukturfasern den Hauptbestandteil von pflanzlichen Zellen und setzt sich aus langen Molekülketten zusammen [184]. Gewonnen wird sie hauptsächlich aus Baumwolle oder, aufgrund der leichteren Verfügbarkeit, aus Holz, wobei der Celluloseanteil bei Baumwolle bis zu 96 % und bei Holz bis zu 52 % beträgt.

Auch **Chitin** (griech. *chiton* = Panzer) zählt zu den weitverbreitetsten Biopolymeren. Es ist ein nichtpflanzliches Polysaccharid, welches in den Zellwänden von wirbellosen Tieren, Insekten und Pilzen gebildet wird.

**Stärke** ist ebenfalls ein Polysaccharid und dient Pflanzen als Energiespeicher und kommt vor allem in Reis, Getreide, Mais und Kartoffeln vor. Strukturell besteht sie aus der unverzweigten Amylose und dem verzweigten Amylopektin, meist im Verhältnis 1:4 [187].

Polysaccharide für die Herstellung von Biokunststoffen können außerdem aus Algen, Bakterien und Pilzen gewonnen werden.

### 5.1.2 Lignin

Lignin (lat. *lignum* = Holz) ist ein fester farbloser Stoff aus komplexen, dreidimensionalen Makromolekülen und bewirkt durch Einlagerung in pflanzlichen Zellen deren Verholzung (Lignifizierung). Dabei umhüllt es die Cellulose-Fasern und schützt diese durch seine druckfesten Eigenschaften. Der Anteil von Lignin kann in Pflanzen bis zu 40 % betragen. Nach Cellulose gilt es als zweithäufigstes Biopolymer der Erde. In erster Linie fällt Lignin in der Papierindustrie bei der Cellulosegewinnung als Nebenprodukt an. Davon werden jedoch 98 % zur Energieerzeugung verbrannt [187]. Obwohl seit Jahren von einem großen Potential für Lignin-basierte Biokunststoffe gesprochen wird, gibt es auf diesem Gebiet kaum neue, marktreife Entwicklungen.

### 5.1.3 Proteine

Proteine (griech. *proteuein* = der erste sein) bestehen aus Aminosäuren und kommen in allen Lebewesen vor. Je nach Zusammensetzung ihrer Aminosäuren dienen sie unterschiedlichen Aufgaben wie dem Stofftransport oder dem Strukturaufbau.

Zu den wichtigsten Proteinen zählt **Casein**, das Hauptweiß aus der Milch von Säugetieren. Dieses kann nicht nur zu Käse, sondern auch werkstofflich weiterverarbeitet werden. Endprodukte sind Bindemittel, Textilfasern aber auch einer der ersten Kunststoffe, Galalith [187].

**Kollagene** sind Struktur- oder Gerüstproteine und kommen in Haut, Zähnen, Knochen, Bindegewebe, Sehnen und Muskeln höherer Lebewesen vor [184]. Früher als Leim verwendet, ist Kollagen heute eher für die Herstellung von Gelatine bekannt.

Auch **Keratine** sind wichtige Strukturproteine, die in Fingernägeln, Hörnern, Federn und Haaren vorkommen. Sie sind die Hauptbestandteile von tierischen Textilfasern wie Wolle.

Weitere wichtige Proteine sind **Seide, Elastin und Sojaprotein**.

### 5.1.4 Biogene Polyester

Einige Polymere können direkt, so wie sie in der Natur entstehen, verwendet werden, dazu gehört die Gruppe der **Polyhydroxyalkanoate (PHA)** (siehe Kapitel 5.2.2), welche von Bakterien als Energie- und Kohlenstoffspeicher in ihren Zellen eingelagert werden [187].

Auch **Kork**, welches von der Rinde der Korkeiche gebildet wird, benötigt kaum eine Nachbehandlung, um weiter bearbeitet werden zu können [187].

**Schellack**, welches als einziges tierisches Harz bekannt ist, kommt in der Natur hingegen nur in einem gering polymerisierten Zustand vor und muss für eine kommerzielle Nutzung noch weiteren Polymerisationsreaktionen unterzogen werden [187].

### 5.1.5 Sonstige

Neben den Genannten gibt es unter anderem noch weitere Rohstoffquellen für die Herstellung von biobasierenden Kunststoffen. Dazu zählen **Monosaccharide** (Einfachzucker) wie Glukose

und Fructose oder **Disaccharide** (Zweifachzucker) wie Saccharose oder auch **Fettsäuren aus Pflanzenölen** [184].

## 5.2 Modifizierte, natürliche Polymere

Die Vertreter dieser Gruppe haben gemeinsam, dass ihre Rohstoffe schon als Polymere in der Natur vorhanden sind, diese jedoch für eine kommerzielle Nutzung modifiziert werden müssen.

### 5.2.1 Celluloseacetat (CA)

**Herstellung:** Für die Produktion von Celluloseacetat (CA) wird Cellulose mit Essigsäure und Essigsäureanhydrid zu Cellulosetriacetat (CTA), auch Primäracetat genannt, verestert. Dieses ist vollständig acetyliert, das bedeutet, dass alle drei Hydroxylgruppen jedes Glucosebausteins der Cellulose durch Acetylgruppen ausgetauscht wurden. CTA kann dann für die Erzeugung von Fotofilmen und Displayfolien verwendet werden. Für die meisten Anwendungen ist eine vollständige Acetylierung jedoch nicht erwünscht und ein Teil der Veresterung wird durch Hydrolyse wieder rückgängig gemacht, wodurch Celluloseacetat entsteht, welches nur noch zwei bis zweieinhalb Acetylgruppen pro Glucosemolekül besitzt [187]. Essigsäure und Essigsäureanhydrid, welche zur Herstellung benötigt werden, sind petrochemisch basiert und für die Verarbeitbarkeit sind Weichmacher notwendig, welche meist ebenfalls nicht biogenen Ursprungs sind [95], weshalb CA nur teilweise biobasiert ist.

**Eigenschaften:** CA ist transparent und schwer entflammbar. Die Oberfläche ist kratzfest, schlagzäh und hat einen seidenähnlichen Glanz. CA kann gut zu Fasern gesponnen werden, welche nur wenig Feuchtigkeit aufnehmen [43]. Durch die starke chemische Modifikation im Herstellungsprozess ist Celluloseacetat nicht bzw. nur schwer abbaubar, dafür jedoch beständig gegenüber Pilzen, Bakterien und Witterungseinflüssen. Gegen Säuren und Laugen sind Acetatfasern jedoch sehr empfindlich [43].

**Verwendung:** CA kann mit einigen Standardverfahren bearbeitet werden, wodurch sich viele Alltagsgegenstände wie Brillengestelle oder Kugelschreiberhülsen herstellen lassen. In der Textilindustrie werden die knitterarmen und pflegeleichten Fasern zu Blusen-, Hemden- und Krawatten- bis hin zu Schirmstoffen gesponnen [43]. Hauptanwendungsbereich ist jedoch die Herstellung von Zigarettenfiltern.

### 5.2.2 Polyhydroxyalkanoat (PHA)

**Herstellung:** Polyhydroxyalkanoate sind biogene Polyester, die in der Natur gebildet werden. Sie werden von einigen Bakterienarten als Energiereserve eingelagert, wenn Kohlenstoff im Überschuss vorhanden ist und gleichzeitig ein Mangel an Nährstoffen wie Stickstoff oder Phosphor vorliegt. Die so eingelagerten Polyhydroxyalkanoate können bis über 90 % des Trockengewichtes der Bakterien ausmachen [187]. Das PHA kann dann entweder durch Lösungsmittlextraktion physikalisch, durch Natriumhypochlorit-Behandlung chemisch oder enzymatisch isoliert werden. Alternativ ist eine Herstellung mittels Synthese in transgenen Pflanzen möglich, die Ausbeutung ist jedoch sehr gering. Die fermentative Herstellung mit Bakterien ist recht teuer, da pro Tonne PHA etwa 4-5 Tonnen Zucker benötigt werden [95], weshalb an neuen Verfahren und Ausgangsstoffen geforscht wird. Ansätze bieten die Verwertung von tierischen Abfällen [151], Siedlungsabfall oder Klärschlamm [95].

**Eigenschaften:** Es gibt über 100 Polyhydroxyalkanoate, wobei die bekanntesten Polyhydroxybutyrat oder Polyhydroxybutansäure (PHB) und das Copolymer aus Hydroxybutansäure und Hydroxyvaleriansäure (PHBV) sind [187]. Die Eigenschaften werden oft mit Polypropylen verglichen. Sie haben eine gute Wasser-, Wärme- und UV-Beständigkeit sowie eine hohe Steifigkeit und gute Gasbarriere-Eigenschaften. Reines PHB ist spröde, durch Copolymerisation oder Blends aber gut verarbeitbar. Schmelzverhalten, Schlagzähigkeit und Biegesteifigkeit sind von der Zusammensetzung abhängig. Prinzipiell können PHA nicht nur von Bakterien gebildet, sondern auch von ihnen zersetzt werden. Es hat sich allerdings gezeigt, dass in feuchter Luft kein Abbau stattfindet, sehr wohl aber in feuchter Erde, vor allem bei Zugabe von Wasser [187].

**Verwendung:** PHA machte 2014 mit steigender Tendenz bereits 5 % des Biokunststoffmarktes aus [151] und hat ein breit gefächertes Potential. PHBV ist biokompatibel, nicht toxisch und im Blut von Säugetieren ist sein Abbauprodukt, 2-Hydroxybutansäure natürlich vorhanden. Das macht es geradezu prädestiniert für den Einsatz als Medizinprodukt: von chirurgischem Nahtmaterial über Beschichtungen für Gefäßimplantate bis hin zu Fixierungsplatten bei Knochenbrüchen sind Anwendungen, bei denen eine langsame Zersetzung des medizinischen Produkts erwünscht ist, möglich [187]. Auch eine breitere Verwendung im Verpackungssektor ist vorstellbar. Polyhydroxyalkanoate eignen sich als Ersatz für PET-Flaschen und andere Verpackungen wie Shampoo-Flaschen, aber auch als Beschichtung von Milchkartons. Eine besondere Relevanz bieten PHAs für den Agrarsektor, beispielsweise für Produkte, die junge Pflanzen stützen sollen, aber später nicht mehr notwendig sind, um Insektizide nach Bedarf kontrolliert freizusetzen [187] oder schlicht für Pflanztöpfe.

### 5.3 Aus biogenen Monomeren synthetisierte Biopolymere

Die Rohstoffe von den folgenden Kunststoffen kommen in der Natur als Monomere vor. Die natürlichen Monomere müssen modifiziert und polymerisiert werden, um als Kunststoffe genutzt werden zu können.

#### 5.3.1 Biobasierte Polyester

Polyester sind Polymere, in denen Esterbindungen wiederholt miteinander verkettet sind. Im Folgenden werden einige Polyester vorgestellt, die auf nachwachsenden Rohstoffen basieren.

##### 5.3.1.1 Polylactid (PLA)

**Herstellung:** Polymilchsäure (auf Englisch: poly lactid acid, kurz PLA) basiert auf Milchsäure, welche mit Hilfe von Fermentation (Umwandlung durch bestimmte Bakterien- und Pilzarten) aus Zucker oder Stärke hergestellt und anschließend polymerisiert wird [187]. Als Rohstofflieferanten kommen hierfür Zuckerrüben, Zuckerrohr, Getreide, Mais und Kartoffeln in Frage. Milchsäure kann in zwei Varianten auftreten, als D-Lactid und als L-Lactid. Dementsprechend gibt es auch PLA in zwei Varianten: PDLA und PLLA, welche sich in Aussehen und Eigenschaften unterscheiden [98]. Durch Compoundieren mit Additiven, Copolymerisieren oder Blenden (Mischen mit anderen Kunststoffen) lassen sich die Eigenschaften jedoch individuell anpassen.

**Eigenschaften:** Standard-PLA besteht laut Köhler-Hammer [95] überwiegend aus L-Lactiden. Es ist transparent, kristallin und steif mit einem E-Modul bis zu 5000 MPa [98]. Des Weiteren besitzt PLA eine hohe Katzfestigkeit und eine hohe Beständigkeit gegenüber Fetten und Ölen. Allerdings ist Standard-PLA auch hydrophil und stark wasserdampfdurchlässig. Ohne Additive

versprödet PLA bei Einwirkung durch UV-Strahlung zudem recht schnell. Der Erweichungspunkt ist mit etwa 55°C relativ niedrig, kann jedoch durch eine gezielte Kombination von D- und L-Lactiden erhöht werden [187]. PLA eignet sich außerdem hervorragend als Matrix für Bioverbundwerkstoffe und ist recht günstig. Prinzipiell gilt PLA als biologisch abbaubar, jedoch nur unter industriellen Bedingungen. „Bei Raumtemperatur und normalen Umgebungsbedingungen ist PLA unbegrenzt stabil“ [98]. Durch die vielfältigen Variationsmöglichkeiten in der Herstellung mit Zuschlagstoffen und Copolymeren ergibt sich jedoch auch ein großes Potential für dauerhafte Anwendungen. So können nach [94] auch PLA-Blends, die Flammschutzmittel enthalten, nicht mehr kompostiert werden, wodurch sich aber die Dauerhaftigkeit verbessert.

**Verwendung:** PLA lässt sich vielfältig verarbeiten. Zu den Einsatzzwecken zählen Folien für Verpackungsindustrie und Landwirtschaft (Mulchfolien), aber auch Textilfasern und expandiertes Dämmmaterial; Bodenbeläge und Gehäuse von Elektronikartikeln sind ebenso herstellbar wie Armaturenbretter für Autos und Filamente für den 3D-Druck.

**Preis und Ökobilanz:** Ein aus PLA hergestellter Hartschaum kostet etwa doppelt so viel wie ein vergleichbares Produkt aus fossilbasiertem EPS (Expandiertem Polystyrol) [88]. Laut Türk [187] lagen die Preise 2014 bei etwa 2,00 €/kg bis 3,50 €/kg. Eine aktuelle Anfrage bei einem Kunststoffhersteller ergab jedoch eine deutlich höhere Preisklasse von etwa 4,00 €/kg bis 8,00 €/kg [182].

Um ein Produkt oder Material bezüglich seiner ökologischen Auswirkungen beurteilen zu können, wird eine Ökobilanz (auch Lebenszyklusanalyse oder eng. Life Cycle Assessment bzw. LCA) herangezogen. Eine zu PLA vorliegende LCA [118] veranschaulicht die „cradle-to-gate“-Wirkung, also den Umwelteinfluss des Materials vom Anbau der Rohstoffe bis zum Werkstor (dt. *von der Wiege zum Tor*). Dabei wird ein Polylactid untersucht, welches in Thailand aus Zuckerrohr hergestellt wird. Dabei wurden die Zuckerrohrproduktion, die Verarbeitung in der Zuckermühle sowie die Prozessschritte der Herstellung von Milchsäure, Lactid und PLA betrachtet. Die Ergebnisse pro Tonne PLA sind in nachfolgender Tabelle 5.1 zusammengefasst. Folgende Umwelteffekte werden berücksichtigt:

- Treibhauspotential (eng. *Global Warming Potential, GWP*): mit Gegenrechnung des vom Zuckerrohr aufgenommenen CO<sub>2</sub>
- Erschöpfung der Wasserressourcen (eng. *Water Resource Depletion, WS*): Frischwasserbrauch, hauptsächlich für Bewässerung
- Meereseutrophierung (eng. *Marine Eutrophication, EP*): Stickstoffanreicherung von Meer- und Süßwasser
- Terrestrische Eutrophierung (eng. *Terrestrial Eutrophication, EP*): terrestrische Ablagerungen von Luftstickstoffen aus NO<sub>x</sub> und NH<sub>3</sub>
- Versauerung (eng. *Acidification, AP*): Bodenversauerung durch NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> und SO<sub>x</sub>
- Feinstaub (eng. *Particulate Matter, PM*): Entstehung von Feinstaubpartikeln
- Landnutzung (eng. *Land Use, LU*): Bezogen auf Änderungen der organischen Bodensubstanz
- Nutzung erneuerbarer Energien (eng. *Renewable Energy Use, REU*): Erneuerbare Energien durch Energienutzug von Reststoffen in der Zuckermühle

- Nutzung nicht erneuerbarer Energien (eng. *Non-renewable Energy Use, NREU*): aus thailändischem Strommix; inklusive indirektem Energieverbrauch für Rohstofftransport und Herstellung von benötigten Chemikalien

**Tab. 5.1:** Lebenszyklusanalyse eines Polylactids aus in Thailand hergestelltem Zuckerrohr (pro Tonne) nach Morão und Bie [118]

Kategorie	Einheit	Gesamtwert
Treibhauspotential (GWP)	kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	501 (2334 <sup>(1)</sup> )
Erschöpfung der Wasserressource (WS)	m <sup>3</sup> Wasser-Äqv.	36,1
Meereseutrophierung (EP)	kg N-Äqv.	13,3
Terrestrische Eutrophierung (EP)	mol N-Äqv.	33,8
Versauerung (AP)	mol H <sup>+</sup> -Äqv.	18,2
Feinstaub (PM)	kg PM <sub>2,5</sub> -Äqv.	1,74
Landnutzung (LU)	kg C-Defizit	17 441
Nutzung erneuerbarer Energien (REU)	GJ	60,4
Nutzung nicht erneuerbarer Energien (NREU)	GJ	28,8

**Anmerkung:**

<sup>(1)</sup> ohne Gegenrechnung des vom Zuckerrohr aufgenommenen CO<sub>2</sub>

Die Studienautoren kommen zu dem Schluss, dass die maßgeblichen Faktoren der Umweltbelastung aus der Zuckerrohrproduktion resultieren. Diese wirkt sich maßgeblich auf das Treibhauspotential, die Wassernutzung, Eutrophierung, Versauerung, Feinstaubbelastung und die Landnutzung aus. Mit einigen Verbesserungsmöglichkeiten sehen die Studienautoren das Potential, den CO<sub>2</sub>-Abdruck auf -909 kg CO<sub>2</sub>-Äqv. pro Tonne PLA zu reduzieren [118]. Hier werden ein erhöhter Ertrag durch bessere landwirtschaftliche Verfahren, eine optimierte Düngemittelanwendung, gesteigerte Effizienz der Zuckermühle, Verringerung der Chemikaliennutzung und verstärkte Nutzung von erneuerbaren Energien als Maßnahmen genannt.

### 5.3.1.2 Bio-Polyethylenterephthalat (Bio-PET)

**Herstellung:** PET wird durch Veresterung von Terephthalsäure mit Monoethylenglykol erzeugt. Das Monoethylenglykol, welches etwa 30 Gewichts-% ausmacht, wird bereits im großen Stil biobasiert aus Zuckerrohrmelasse hergestellt. Auch Terephthalsäure kann bereits aus biogenen Rohstoffen erzeugt werden, was bisher jedoch als unwirtschaftlich betrachtet wird. Somit ist ein vollständig biobasiertes PET zwar technisch möglich, jedoch, im Gegensatz zu teilweise biobasiertem PET, noch nicht am Markt etabliert [184]. Größere Marktrelevanz hat recyceltes PET, welches rPET oder rePET genannt wird. Einige Getränkehersteller verkaufen bereits nur noch Flaschen aus 100 % rePET [200].

**Eigenschaften:** Bio-PET gilt als klassischer Drop-In-Werkstoff, es ist chemisch mit konventionellem PET ident, besitzt die selben Eigenschaften und kann somit auch mit diesem gemeinsam recycelt werden.

**Verwendung:** Obwohl PET vor allem als Material für Getränkeflaschen bekannt ist, wird ein Großteil der Herstellungsmenge (ca. 85 %) zu Fasern verarbeitet [187].

### 5.3.1.3 Polyethylenfuranoat (PEF)

**Herstellung:** Polyethylenfuranoat gilt als 100 % biobasierte Alternative zu PET. Hierfür wird Furandicarbonsäure (FDCA) aus Biomasse mit biobasiertem Monoethylenglykol zu PEF polymere-

risiert.

**Eigenschaften:** Chemisch ist es ähnlich zu PET, Sauerstoff-, CO<sub>2</sub>- und Wasserdampfbarriere sind jedoch deutlich höher. Ebenso ist die Glasübergangstemperatur mit 86°C um 12°C höher als jene von PET [95] und auch der E-Modul um 60 % höher [184].

**Verwendung:** Durch die Ähnlichkeit zu PET besteht die Möglichkeit, es in vielen Anwendungen zu ersetzen. Aufgrund der besseren mechanischen Eigenschaften kann es darüber hinaus in neuen Funktionen eingesetzt zu werden, bei denen PET nicht den Anforderungen entspräche.

#### 5.3.1.4 Polytrimethylenterephthalat (PTT)

**Herstellung:** Polytrimethylenterephthalat wird durch Veresterung von biobasiertem 1,3-Propandiol mit Terephthalsäure oder Dimethylenterephthalat hergestellt und ist somit als teilbiobasierter Kunststoff auf dem Markt [184].

**Eigenschaften:** PTT ist ebenfalls ein mit PET chemisch eng verwandter Kunststoff, die Glasübergangstemperatur ist jedoch deutlich niedriger und wird mit einem Temperaturbereich von 40-75°C angegeben. Der E-Modul ist etwa 8 % höher [207].

**Verwendung:** PTT findet vor allem in der Textil- und Faserindustrie seine Verwendung.

#### 5.3.1.5 Polycarbonat (PC) mit biobasiertem Weichmacher

**Herstellung:** Durch das in den letzten Jahren größer werdende Umweltbewusstsein konzentriert sich auch die Forschung immer mehr auf (teil-)biobasierte Kunststoffe und kann hier immer wieder Erfolge vermelden. So konnte das Unternehmen Mitsubishi Chemical Cooperation (MCCP) mit *Durabio*<sup>TM</sup> ein Polycarbonat aus Isosorbid, welches aus Sorbitol, dem Zuckeralkohol der Glucose, gewonnen wird, CO<sub>2</sub> und biobasierter Bernsteinsäure herstellen [184].

**Eigenschaften:** *Durabio*<sup>TM</sup> zeichnet sich durch eine gute Hitzebeständigkeit und eine hohe Kratz- und Schlagzähigkeit aus und ähnelt damit den Eigenschaften von konventionellem Polycarbonat (PC). Gleichzeitig verfügt es über eine hohe Oberflächenfestigkeit, UV-Beständigkeit und Transparenz bei gleichzeitig geringer Doppelbrechung einfallenden Lichts, was wiederum Eigenschaften sind, die man sonst von erdölbasiertem Polymethylmethacrylat (PMMA) kennt [116]. Dieser überlappende Einsatzbereich ergibt sich dadurch, dass der bei petrochemischem PC verwendete Weichmacher Bisphenol A durch das biobasierte Isosorbid ersetzt wird [184].

**Verwendung:** Dieser neuartige Biokunststoff konnte bereits als Touchscreen-Oberfläche [28], aber auch bei Fahrzeugaußenteilen verwendet werden. Auch ein Einsatz bei Fahrzeuginnenraumverkleidungen ist möglich. Diese Fahrzeugteile zeichnen sich durch eine hochglänzende, glatte Oberfläche aus. Ihre satte Farbe wird durch Einmischen von Farbpigmenten erreicht, wodurch ein Lackieren hinfällig wird [185].

#### 5.3.1.6 Biobasierte, ungesättigte Polyesterharze (Bio-UP)

**Herstellung:** Ungesättigte Polyesterharze sind duroplastische Kunststoffe, die sich nach dem Aushärten nicht mehr aufschmelzen lassen, und werden aus zwei- oder mehrwertigen Alkoholen und Dicarbonsäure, die aus nachwachsenden Rohstoffen erzeugt werden kann, hergestellt [184]. Während die Herstellung biogener UP bisher als unwirtschaftlich galt [100], konnte 2020 ein über

99 % biobasiertes, ungesättigtes Polyesterharz vorgestellt werden [47], welches zu marktfähigen Preisen angeboten werden kann [100]. Dieses wird unter dem Produktnamen *Polyvertec 3830* vermarktet.

**Eigenschaften:** Die Eigenschaften ungesättigter Polyesterharze lassen sich in einem weiten Bereich einstellen, so lässt sich beispielsweise die Viskosität durch Zugabe von bis zu etwa 40 % Styrol als Reaktivverdünner auf 1/200 verringern [100]. Allerdings basiert Styrol auf petrochemischen Rohstoffen und gilt als gesundheitsschädlich, weshalb auch für dieses nach biobasierten Alternativen gesucht wird. Der Ersatz von Styrol durch Itaconsäuredialkylester ist zwar technisch möglich [75], allerdings noch nicht in breitem Maße realisierbar [100].

**Verwendung:** Ungesättigte Polyesterharze zählen zu den wichtigsten Duromeren und werden vor allem als Matrix für Faserverbundwerkstoffe eingesetzt. Untersuchungen mit dem oben vorgestellten *Polyvertec 3830* zeigten eine gute Eignung als Matrix für Faserverstärkungen mit Glasfasern und Flachfasern. Das mit Naturfasern verstärkte Laminat konnte in einem Vergleich der mechanischen Eigenschaften etwa zwei Drittel der Werte eines äquivalenten Laminats mit Epoxidharz-Matrix erreichen [100].

### 5.3.2 Biobasierte Polyamide (PA)

**Herstellung:** Polyamide können ganz oder teilweise biobasiert aus Dicarbonsäuren und Diaminen hergestellt werden, wobei entweder die Dicarbonsäure, das Diamin oder beides aus biogenen Rohstoffen gewonnen werden kann. Die am häufigsten verwendete Dicarbonsäure ist die Sebazinsäure, welche aus der in Rizinusöl enthaltenen Rizinolsäure gewonnen werden kann [184]. Je nach verwendetem Diamin entsteht dann zum Beispiel PA 4.10, PA 5.10, PA 6.10 oder PA 10.10. Die Zahl vor dem Punkt steht für die Anzahl der Kohlenstoffatome im Diamin, die Zahl nach dem Punkt für die Anzahl der Kohlenstoffatome in der Dicarbonsäure [46]. Weitere biogene Dicarbonsäuren, welche für die Herstellung von Polyamiden genutzt werden, sind Bernsteinsäure (C4 = vier Kohlenstoffatome), Adipinsäure (C6) und Azelainsäure (C9). Biobasierte Diamine können Pentamethyldiamin (C5) und Decamethyldiamin (C10) sein [187].

Weitere Möglichkeiten der Herstellung von Polyamiden „bestehen in der Polymerisation von Aminocarbonsäuren oder von Ringöffnungspolymerisationen mit deren zyklischen Analoga (Lactame, cyclische Amide)“ [187]. Aminocarbonsäure (C11) kann durch Umesterung von Rizinusöl erzeugt werden und dient der Herstellung von vollständig biobasiertem PA 11. Auch PA 6 könnte mit Hilfe von biogenem Caprolactam (C6) und Ringöffnungspolymerisation hergestellt werden [187].

**Eigenschaften:** Bio-Polyamide zählen zu der Gruppe der Drop-Ins, besitzen also die selben mechanischen Kennwerte wie ihre petrochemischen Pendanten. Je nach Zusammensetzung können die Eigenschaften recht unterschiedlich sein. So hat beispielsweise PA 11 einen hohen Anteil an Methylengruppen im Verhältnis zu den Amidgruppen, was an niedrigen Festigkeiten, Schmelzpunkt und Wasseraufnahmevermögen aber guter Dimensionsstabilität und Zähigkeit bei geringeren Temperaturen erkennbar ist. PA 6.6 dagegen zeichnet sich durch den größeren Anteil an Amidgruppen durch eine höhere Temperaturbeständigkeit und Wasseraufnahme sowie gute mechanische Eigenschaften, aber eine geringere Dimensionsstabilität aus [187]. 2014 lag das Preisniveau von biobasierten Polyamiden bei etwa 10,00 €/kg bis 14,00 €/kg, womit diese zu den teuersten biobasierten Kunststoffen zählen und etwa dreimal teurer sind als petrochemisches PA 6.6 [187, S. 85]. Das vollständig biobasierte PA 11 ist von seinen Eigenschaften mit dem fossilbasierten PA 12 vergleichbar, bezogen auf den 3D-Druck sind Bauteile aus PA 11 jedoch

vor allem aufgrund der geringeren Nachfrage um etwa 50 % teurer [2].

**Verwendung:** Schon seit Ende der 1930er Jahre sind Polyamide vor allem in der Faserindustrie bekannt, besonders PA 6.6 und PA 6, welche später unter den Namen *Nylon*<sup>®</sup> und *Perlon*<sup>®</sup> vermarktet wurden [46]. Im Fahrzeugbau werden Polyamide unter anderen für Kraftstoffleitungen eingesetzt. Weitere Einsatzgebiete finden sich in der Elektro- und Elektronikindustrie, aber auch der Verpackungsindustrie und im Bausektor [187].

### 5.3.3 Biobasierte Polyolefine

Die Polyolefine Polyethylen und Polypropylen sind die wichtigsten und am meisten produzierten Massenkunststoffe. Beide lassen sich auch aus biogenen Rohstoffen herstellen, wie in den nachfolgenden Abschnitten erläutert wird.

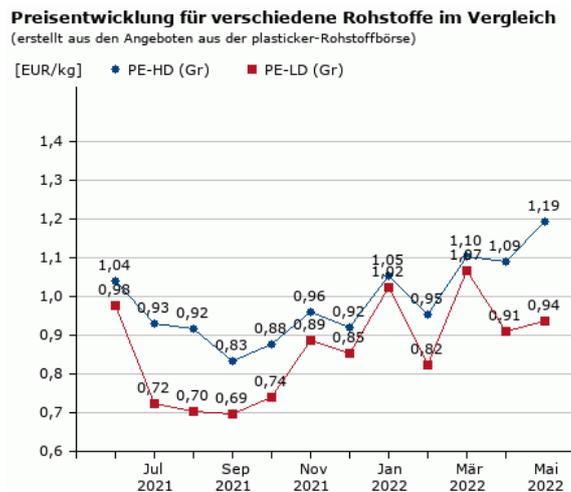
#### 5.3.3.1 Bio-Polyethylen (Bio-PE)

**Herstellung:** Bio-PE gilt als klassischer Drop-In-Werkstoff. Während konventionelles PE durch Polymerisation von petrochemischem Ethylengas hergestellt wird, wird Ethylen für biobasiertes PE durch Dehydratisierung biogenen Ethanols bei hohen Temperaturen erzeugt. Als Rohstoff dient Zuckerrohr. Trotz der großen benötigten Energiemenge für die Herstellung benötigt Bio-PE pro produzierter Tonne Kunststoff bis zu 4,5 t weniger CO<sub>2</sub>, als petrochemisches PE. Derzeit gibt es laut Türk [187] weltweit nur einen Hersteller von Bio-Ethanol für PE, welcher in Brasilien angesiedelt ist. Der Flächenbedarf für Bio-Ethanol aus Zuckerrohr ist derzeit noch gering und beträgt nur etwa 1 % der brasilianischen Landwirtschaftsfläche. Klimatisch bedingt sind die Felder etwa 2500 km vom Amazonas-Regenwald entfernt. Allerdings könnte eine Vergrößerung des Anbaubereichs von Zuckerrohr indirekt zur Rodung von Urwaldflächen führen, indem sie die für Viehzucht benötigten Flächen in Richtung Regenwald verdrängt. Diese Sorge ist durchaus berechtigt, zumal derzeit nur etwa 0,33 % des weltweiten PE-Marktes durch Bio-PE abgedeckt werden [187].

**Eigenschaften:** Durch eine insgesamt geringe Dichte von unter 1 g/cm<sup>3</sup> und einer sehr geringen Wasseraufnahme, schwimmt PE im Wasser. Optisch ist es milchig weiß und teilkristallin. Die Zähigkeit und Bruchdehnung sind hoch und es verträgt Temperaturen von -85°C bis +90°C. Beginnt es allerdings zu brennen, brennt es tropfend und mit heller Flamme [53].

**Verwendung:** Wie auch bei konventionellem PE, gibt es Bio-PE in verschiedenen Varianten: HDPE oder PE-HD mit schwach verzweigten Polymerketten und einer hohen Dichte (high density) von 0,94 bis 0,97 g/cm<sup>3</sup>, LDPE (PE-LD) mit stark verzweigten Polymerketten und einer geringen Dichte (low density) zwischen 0,915 und 0,935 g/cm<sup>3</sup> und lineares Polyethylen LLDPE bzw. PE-LLD (linear low density) mit einer noch geringeren Dichte von 0,87 bis 0,94 g/cm<sup>3</sup> [53]. Durch die verschiedenen Varianten ergibt sich ein breites Anwendungsspektrum von Folien und Geovliesen über blasegeformte Hohlkörper, bis zu Spritzgussartikeln und Extrusionsprodukten.

**Preis und Ökobilanz:** Die Preise für Granulat aus fossilbasiertem PE belaufen sich derzeit auf etwa 0,90 €/kg bis 1,20 €/kg [127]. Die Preisentwicklung der letzten 12 Monate ist in Abb. 5.1 dargestellt. Biobasiertes LDPE war 2014 nach [187] etwa um das eineinhalb- bis zweifache teurer als konventionelles LDPE. Laut aktueller Auskunft eines Kunststoffproduzenten [182], liegen die Preise je nach Compound derzeit bei etwa 4 € bis 8 € pro Kilogramm.



**Abb. 5.1:** Preisentwicklung PE-HD und PE-LD von Juni 2021 bis Mai 2022 (Bildquelle: New media Publisher GmbH [127])

Gerade bei einem Drop-In-Werkstoff lohnt sich eine Lebenszyklusanalyse, vor allem im Vergleich mit dem fossilbasierten Pendant. Im Folgenden wird daher eine LCA vorgestellt, in der die Umweltauswirkungen von Bio-PE auf Basis von Zuckerrüben und Weizen aus Belgien mit jenen von fossilbasiertem PE verglichen werden. Die Analyse gilt pro hergestellter Tonne PE. Als Betrachtungsweise wurde hier die Form „cradle-to-grave“ (dt. *von der Wiege zum Grab*), also der gesamte Lebenszyklus bis zur Entsorgung betrachtet [22]. Die untersuchten Bereiche waren:

- Treibhauspotential: Gegenrechnung des von den Pflanzen aufgenommenen CO<sub>2</sub>
- Ozonabbau: Abbau der Ozonschicht
- Feinstaub: Entstehung von Feinstaubpartikeln
- Photochemische Oxidation
- Versauerung: Bodenversauerung durch stickstoffbasierte Dünger
- Landeutrophierung: Ablagerung von Luftstickstoffen
- Eutrophierung von Süßwasser: durch phosphorhaltige Düngemittel
- Landnutzung: für den Anbau der rohstoffliefernden Pflanzen
- Erschöpfung mineralischer, fossiler und erneuerbarer Ressourcen: hauptsächlich mineralische Ressourcen
- Erschöpfung von Mineralien
- Erschöpfung fossiler Brennstoffe

Die Studie kommt zu dem Schluss, dass die biobasierten Produkte erhebliche Einsparungen beim Treibhauspotential und der Nutzung fossiler Brennstoffe bieten [22]. Betrachtet man jedoch auch die anderen Faktoren, schneidet das fossilbasierte PE zum Teil deutlich besser ab. Es ist demnach weder die biobasierte noch die petrochemischbasierte Variante per se umweltfreundlicher. Eine Entscheidung kann hier nur nach einer Gewichtung der Umweltauswirkungen getroffen

**Tab. 5.2:** LCA zweier biobasierter Polyethylene im Vergleich zu fossibasiertem PE (pro Tonne) nach Belboom und Léonard [22]

Kategorie	Einheit	Zuckerrüben-PE	Weizen-PE	fossiles PE
Treibhauspotential (GWP)	kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	-1081	-1091	1396
Ozonabbau	kg CFC <sub>11</sub> -Äqv.	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-7}$
Feinstaub (PM)	kg PM <sub>2,5</sub> -Äqv.	0,75	1,41	0,52
Photochemische Oxidation	kg NMVOC-Äqv.	5,68	7,14	4,71
Versauerung (AP)	mol H <sup>+</sup> -Äqv.	11,78	17,71	4,63
Landeutrophierung (EP)	mol N-Äqv.	40,12	63,50	9,70
Süßwassereutrophierung (EP)	kg P-Äqv.	2,73	0,88	0,01
Landnutzung (LU)	kg C-Defizit	23 700	82 800	5,82
Erschöpfung mineralischer, fossiler und erneuerbarer Ressourcen	kg Sb-Äqv.	$1,63 \cdot 10^{-2}$	$2,35 \cdot 10^{-2}$	$1,06 \cdot 10^{-3}$
Erschöpfung von Mineralien	kg Fe-Äqv.	60,19	100,11	0,64
Erschöpfung fossiler Brennstoffe	kg Öl-Äqv.	679	615	1454

werden. In diesem Fall gilt also zu überlegen, welche Auswirkung der Umwelt am meisten schadet und demnach vermindert werden soll. Danach könnte man entscheiden, welcher Kunststoff die bessere Wahl ist.

### 5.3.3.2 Bio-Polypropylen (Bio-PP)

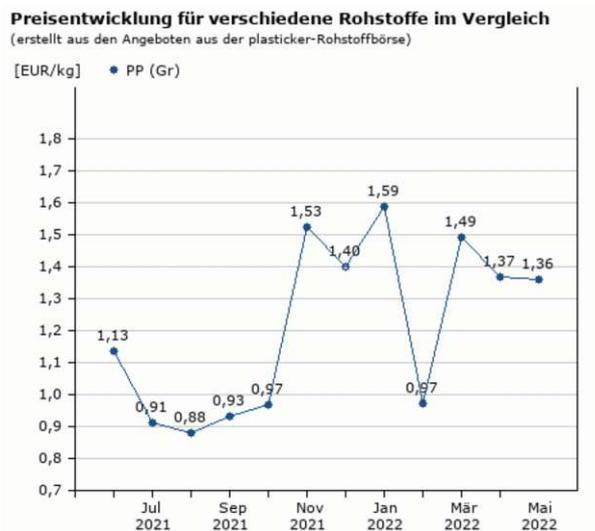
**Herstellung:** Prinzipiell lässt sich auch Polypropylen biobasiert erzeugen. Der Herstellungsprozess ist allerdings komplex und die kommerzielle Vermarktung erst im Aufbau. Die Firmen Neste und Lyondell Basell haben 2019 ihre Zusammenarbeit in diesem Bereich bekannt gegeben, um einen Vertrieb von biobasiertem PE und PP voranzutreiben, für deren Herstellung biobasierte Alt- und Restöle verwendet werden sollen. Der biobasierte Anteil beträgt derzeit etwa 30 % [175]. Die weiterführende Zusammenarbeit der beiden Firmen wurde im Juni 2021 bestätigt [107].

**Eigenschaften:** Auch Bio-PP zählt zu den Drop-In-Werkstoffen und besitzt die gleichen Eigenschaften wie petrochemisch basiertes PP. Es ist härter und wärmebeständiger als PE und beständig gegenüber Säuren, Laugen, Wasser und Alkohol.

**Verwendung:** PP wird häufig bei Lebensmittelverpackungen eingesetzt. Es können unter anderem Folien, Becher, Flaschen, Tuben und Verschlüsse erzeugt werden [26].

**Preis und Ökobilanz:** Die ersten biobasierten Polypropylene sind schon am Markt. Laut Angaben eines Kunststoffproduzenten liegen die Preise bei etwa 4 €/kg bis 8 €/kg. Konventionelles PP ist etwas teurer als PE und kostet derzeit etwa 1,40 €/kg [127]. Eine Preisentwicklung von Juni 2021 bis Mai 2022 wird in Abb. 5.2 dargestellt.

Im folgenden wird eine „cradle-to-gate“-Lebenszyklusanalyse vorgestellt, die die Umwelteinwirkungen von auf Basis von gebrauchtem Küchenöl hergestelltem PP beschreibt [119]. Die Arbeit legt nahe, dass bei aus Altspeiseöl hergestelltem PP im Vergleich zu herkömmlichen PP bis zu 65 % an Treibhauspotential und bis zu 86 % an fossilen Brennstoffen eingespart werden kann. Allerdings wird auch angemerkt, dass die Erstellung von Ökobilanzen auf vielen Unsicherheitsfaktoren und Annahmen beruht und zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Es wurden die gleichen Bereiche untersucht, wie oben aufgezählt. In Tab 5.3 werden die Ergebnisse der Untersuchung pro hergestelltem Kilogramm PP dargestellt.



**Abb. 5.2:** Preisentwicklung PP von Juni 2021 bis Mai 2022 (Bildquelle: New media Publisher GmbH [127])

**Tab. 5.3:** LCA eines aus Altspeseöl hergestelltem PP (pro kg) nach Moretti et al. [119]

Kategorie	Einheit	Gesamtwert
Treibhauspotential (GWP)	kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	-2,51 (0,63 <sup>(1)</sup> )
Ozonabbau	kg CFC <sub>11</sub> -Äqv.	9,0 · 10 <sup>-8</sup>
Feinstaub (PM)	kg PM <sub>2,5</sub> -Äqv.	1,2 · 10 <sup>-4</sup>
Photochemische Oxidation	kg NMVOC-Äqv.	1,9 · 10 <sup>-3</sup>
Versauerung (AP)	mol H <sup>+</sup> -Äqv.	2,1 · 10 <sup>-3</sup>
Landeutrophierung (EP)	mol N-Äqv.	6,0 · 10 <sup>-3</sup>
Süßwassereutrophierung (EP)	kg P-Äqv.	8,7 · 10 <sup>-6</sup>
Meereseutrophierung (EP)	kg N-Äqv.	5,6 · 10 <sup>-4</sup>
Landnutzung (LU)	kg C-Defizit	1,1
Erschöpfung der Wasserressource (WS)	m <sup>3</sup> Wasser-Äqv.	0,74
Erschöpfung mineralischer und metallischer Ressourcen	kg Sb-Äqv.	3,2 · 10 <sup>-7</sup>
Erschöpfung fossiler Brennstoffe	MJ	9,30

**Anmerkung:**

<sup>(1)</sup> ohne Gegenrechnung des von den Pflanzen aufgenommenen CO<sub>2</sub>

Die Analyse zeigt, dass durch den Polymerisationsprozess, die Produktion von Wasserstoff sowie die Produktion und die Verbrennung von LPG die größten Umweltauswirkungen für die Herstellung von aus altem Küchenöl produziertem PP entstehen [119]. Im Vergleich zu petrochemisch erzeugtem PP sehen die Studienautoren deutliche Einsparungen bei der Nutzung fossiler Rohstoffe und beim Treibhauspotential. Diese Vorteile bleiben auch im Fall von global importiertem Altspeseöl und bei Nichtbetrachtung des Altöls als Abfall bestehen. Es wird allerdings auch betont, dass bei einer zukünftigen Produktbilanz der gesamte Lebenszyklus („cradle-to-grave“) berücksichtigt werden sollte [119].

### 5.3.4 Biobasiertes Polyvinylchlorid (Bio-PVC)

**Herstellung:** Vinylchlorid, das Ausgangsmonomer für Polyvinylchlorid (PVC), wird aus Ethylen und Chlor hergestellt [197], wobei sich Ethylen aus biobasiertem Ethanol herstellen lässt. Das

belgische Unternehmen Vynova hat Anfang 2020 ein auf diesem Weg hergestelltes, teilbiobasiertes PVC auf den Markt gebracht [184]. Im Vergleich zu petrochemischem PVC werden hier laut Hersteller bis zu 90 % an CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart [201]. Allerdings wird Vinylchlorid in der EU als kanzerogen eingestuft und auch die Herstellung von Chlor ist ökologisch betrachtet nicht gefahrlos [187]. Konventionelles wie teilbiogenes PVC enthält bis zu 40 % Weichmacher. Früher waren dies meist Phtalate, die eine hormonähnliche Wirkung haben und die Fruchtbarkeit negativ beeinflussen können. Ihr besonderes Eigenschaftsprofil macht sie jedoch in einigen Anwendungsbereichen nur schwer ersetzbar. Seit 2005 sind einige Phtalate in der EU in Produkten für Babys und Kleinkinder verboten. Die Regelungen wurden 2015 weiter verschärfte, so dürfen seitdem keine bleihaltigen Stabilisatoren mehr bei PVC eingesetzt werden. Zudem wurden weitere Phtalate auf die Liste der verbotenen Weichmacher gesetzt. Einige Phtalate sind nur noch mit spezifischer Zulassung erlaubt. [189]. Die Forschung geht daher in Richtung biobasierter Weichmacher [27]. Derzeit werden länger-kettige Phtalate oder Weichmacher anderer Stoffgruppen eingesetzt [189].

**Eigenschaften:** Die Eigenschaften von biobasiertem PVC sind ident mit jenen von konventionellem PVC. Es ist chemisch beständig, elektrisch isolierend, feuchtigkeits- und witterungsbeständig, gesundheitlich unbedenklich und je nach zugefügten Additiven hart und zäh oder weich und flexibel, schwer entflammbar und gut recycelbar [198].

**Verwendung:** PVC ist in Europa der dritt-wichtigste Massenkunststoff und wird im deutschsprachigen Raum vor allem im Bauwesen für Fensterrahmen, Rohre und Kabelummantelungen eingesetzt. Aber auch Platten und Profile, Folien und Dichtungsbahnen sowie Fußböden sind Anwendungen im Bausektor. Neben weiteren vielen Anwendungsmöglichkeiten spielt PVC auch in der Medizin beispielsweise für die Herstellung von Blutbeuteln eine überaus wichtige Rolle [187].

### 5.3.5 Biobasierte Epoxidharze

**Herstellung:** Die Herstellung von Epoxidharzen ist sehr komplex und auf unterschiedliche Arten möglich. Bei der Epoxidierung wird, vereinfacht gesagt, eine C=C-Doppelbindung aufgespalten und ein Sauerstoffatom eingefügt [34]. Für die Herstellung von biobasierten Epoxidharzen hat sich vor allem Leinöl aufgrund seiner hohen Anzahl an C=C-Doppelbindungen bewährt. Als Härter werden zumeist Dicarbonsäuren auf fossiler Basis verwendet [187], allerdings wird an biobasierten Härttern geforscht, um den biogenen Anteil zu erhöhen. So wurde bereits ein Epoxidharz-Klebstoff mit einem biobasierten Anteil von 86 % erzeugt [44].

**Eigenschaften:** Generell sind Epoxidharze Duroplaste mit einer hohen Festigkeit, geringer Schlagempfindlichkeit und Schrumpfung sowie sehr guten elektrischen Isoliereigenschaften. Je nach Zusammensetzung kann die Beständigkeit der steif bis zähen Harze gegen Witterung, UV-Einstrahlung, Säuren und Laugen sowie Alkohol und Benzin mehr oder weniger stark variieren [97].

**Verwendung:** Epoxidharze haben ein breites Anwendungsspektrum, oft werden sie als Matrix für Verbundwerkstoffe eingesetzt. Im Bauwesen dienen sie beispielsweise als Lacke und Beschichtungen, zur Verklebung von Fertigteilelementen [97], Reparatur von Betonbauwerken oder als chemikalienfester Brückenbelag [161].

### 5.3.6 Biobasierte Polyurethane (PU oder PUR)

**Herstellung:** Polyurethane sind eine große Gruppe von Kunststoffen mit einem breiten Spektrum an Eigenschaften. Sie werden durch Polyaddition von Zwei- oder Mehrfachisocyanaten mit Zwei- oder Mehrfachalkoholen hergestellt. Je nach Kombination können so thermoplastische Polyurethane (TPU), Elastomere oder duroplastische Harze erzeugt werden [151]. Durch Wasserzugabe im Herstellungsprozess können, je nach Rezeptur, PUR-Weichschäume oder PUR-Hartschäume entstehen. Biogene Isocyanat-Komponenten sind für ein Aufschäumen nicht reaktiv genug, lassen sich jedoch bei anderen PUR einsetzen [187]. Für die Herstellung von biobasierten PUR-Schäumen muss daher die Alkohol-Komponente aus nachwachsenden Rohstoffen erzeugt werden. Für elastomere Polyurethane kann fermentativ hergestellter Bio-Alkohol verwendet werden, für stärker vernetzte PUR eignen sich Pflanzenöle wie Sonnenblumen-, Soja- oder Rizinusöl besonders gut.

**Eigenschaften:** Je nach Zusammensetzung können die Eigenschaften von Polyurethanen variieren und nicht immer stimmen jene von biobasiertem PUR mit jenen ihrer petrochemischen Pendanten überein, wobei vor allem die chemische Struktur des verwendeten Alkohols (Polyols) eine Rolle spielt. Während laut Türk [187] Polyester-Polyol-basierte Polyurethane eher gegen Öle, Fette, Lösungsmittel und Oxidation beständig sind, sind Polyether-Polyol-basierte PUR eher gegen Hydrolyse und mikrobiellen Abbau beständig.

**Verwendung:** Generell sind Polyurethane durch ihr breites Spektrum an Eigenschaften und ihre Anpassungsfähigkeit in so gut wie allen Bereichen vertreten [187]: von Weichschäumen in Sitzmöbeln und Matratzen über Dämmungen für das Bauwesen, Beschichtungen, Schuhsohlen und Fasern. In der Praxis konnten bereits teilbiobasierte Matratzenschäume auf Basis von Rizinus- und Sonnenblumenöl umgesetzt werden.

## 5.4 Bioverbundwerkstoffe

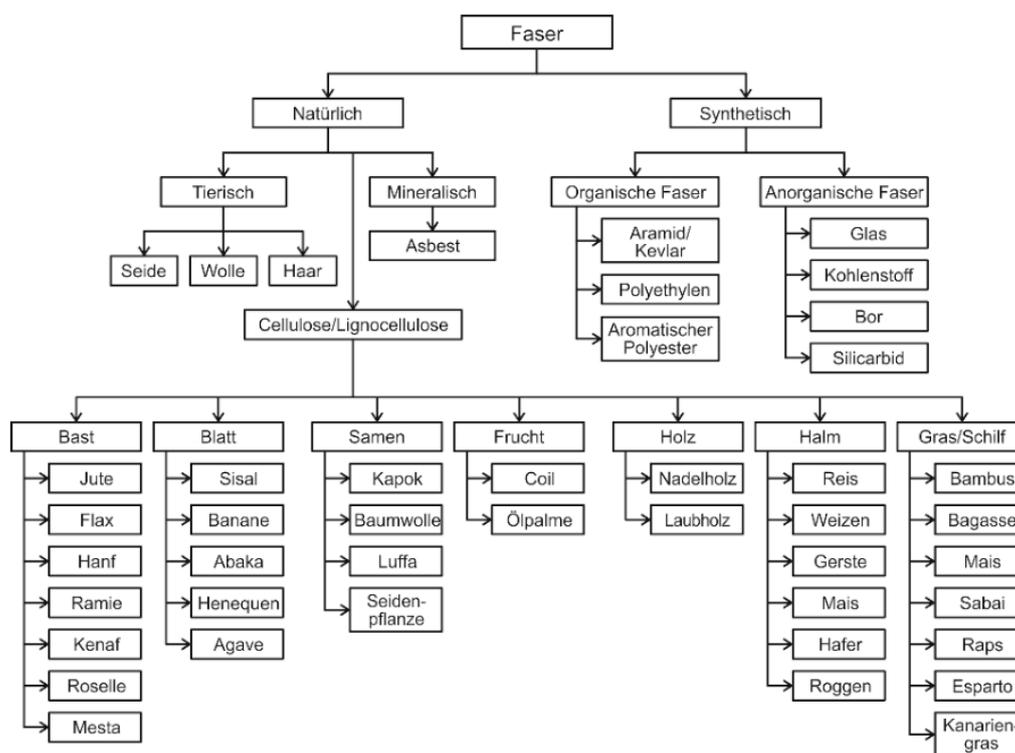
Wie schon in den Kapiteln *4.1 Kunststoffe allgemein* und *4.2.2 Faserverstärkte Kunststoffe (FVK)* beschrieben, bestehen Verbundwerkstoffe aus mindestens zwei Komponenten, die, ohne dass sie ihre ursprüngliche Form verlieren, verbunden werden und zusammen einen neuen Werkstoff bilden, der meist höherwertige mechanische Eigenschaften besitzt als die Einzelkomponenten. Das beste Beispiel hierfür wäre Stahlbeton, also mit Bewehrungsstahl verstärkter Beton, der die positiven Eigenschaften von Beton und Stahl kombiniert und bessere Kennwerte aufweist als ein vergleichbarer Betonquerschnitt alleine oder die gleiche Menge Stahl wie für die Bewehrung verwendet einzeln. In der Regel bestehen Verbundwerkstoffe aus einer Matrix und einer Faser-Komponente. Ist eine der Komponenten biogenen Ursprungs, spricht man von einem Bioverbundwerkstoff. Obwohl Kunststoffe auch als Verstärkungsfasern dienen können, beispielsweise bei Carbonbeton, wird hier das Augenmerk auf Werkstoffe mit einer Kunststoffmatrix, also faserverstärkte Kunststoffe (FVK), gelegt.

### 5.4.1 Naturfaserverbundwerkstoffe

Um näher auf Naturfaserverbundwerkstoffe eingehen zu können, wird in einem ersten Schritt auf Naturfasern und ihr Potential als Verstärkungsfasern eingegangen. Im Anschluss werden naturfaserverstärkte Kunststoffe und biobasierte Kunststoffe mit Faserverstärkung im Detail besprochen.

### 5.4.1.1 Naturfasern und ihre Eigenschaften

Bei naturfaserverstärkten Kunststoffen kommen, wie der Name bereits sagt, natürliche Fasern als Verstärkung zum Einsatz. Der Kunststoff, welcher als Matrix dient, kann sowohl petrochemischen als auch biogenen Ursprungs sein. Obwohl Naturfasern auch von mineralischer oder tierischer Abstammung sein können (siehe Abb. 5.3), sind mit NFK meist pflanzliche Fasern auf Cellulose-Basis gemeint.



**Abb. 5.3:** Klassifikation von natürlichen und synthetischen Fasern  
(Bildquelle: Neugebauer [126] nach Yan et al. [208])

Zur Verstärkung von Kunststoffen eignen sich neben Holzfasern (siehe Kapitel 5.4.2 *Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC)*) vor allem die aus Pflanzenstängeln gewonnenen Bastfasern und die in Blättern enthaltenen Hartfasern [79]. Am öftesten zur technischen Anwendung kommen die Bastfasern von in Mitteleuropa heimischem Hanf und Flachs und die exotischeren Kenaf-, Ramie- und Jutefasern sowie Sisal- und Abacablattfasern und Baumwolle. Aber auch Ananasblattfasern sowie Fasern von Kokos, Bambus, Ölpalmen, Bagasse und Reishülsen sind bereits untersucht worden [65]. Im Gegensatz zu Holz unterscheiden sich diese Pflanzenfasern durch einen höheren Gehalt an Cellulose und einem geringeren Anteil an Lignin [187]. Die größte Bedeutung haben Naturfasern für die Bekleidungsindustrie, aber auch für die Papierindustrie bei der Herstellung von Spezialpapieren, beispielsweise für Geldscheine.

Für die Bauindustrie sind neben Naturfaserverbundwerkstoffen auch Dämmstoffe auf Naturfaserbasis interessant. So ist die Wärmeleitfähigkeit von Naturfasern oft nur geringfügig schlechter wie die von Polystyrol und Steinwolle, während ihre Wärmekapazität, also ihre Wärmespeicherfähigkeit, größer ist. Gleichzeitig ist der Energieaufwand für die Herstellung deutlich geringer [187]. Doch nicht nur bei den Dämmstoffen, sondern auch bei faserverstärkten Kunststoffen weisen naturfaserbasierte Produkte geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen auf [39] als ihre konventionellen Pendanten.

Eine lange Nutzungsphase des Produkts in Gebäuden oder Fahrzeugen stellt außerdem eine langfristige und wirksame Kohlenstoffbindung [187] sowie, wenn kein Recycling möglich ist, eine CO<sub>2</sub>-neutrale Verbrennung sicher.

Aus technischer Sicht liegen die größten Vorteile von Naturfasern in ihrer Hohlstruktur und ihrer geringen Dichte. Hohlfasern sind aufgrund ihrer Querschnittsform besonders biege- und torsionssteif, weshalb sie ein großes Potential als Verstärkungsfasern besitzen. Bei einem Vergleich der spezifischen Biegesteifigkeiten stellt Hanselka [79] fest, dass Naturfasern auf dem selben Niveau wie Vollglasfasern zu finden sind. Die Dichte von Naturfasern ist eher gering, jedoch schwanken die Angaben in der Literatur zum Teil recht stark, was auf ihren natürlichen Ursprung zurückzuführen ist. So können nicht nur die verwendete Sorte, sondern auch weitere Faktoren wie zum Beispiel der Ort des Anbaus, die Nährstoffsituation, eventuelle Trockenperioden sowie Erntezeitpunkt und -verfahren Einfluss auf die Eigenschaften der Fasern haben [187]. So lassen sich beispielsweise für Sisal Dichten zwischen 1,16 g/cm<sup>3</sup> [79] und 1,50 g/cm<sup>3</sup> [126] finden. Für andere Arten sind die gefundenen Schwankungsbreiten geringer, aber dennoch vorhanden. Generell kann man Naturfasern einer Dichte zwischen 0,6 g/cm<sup>3</sup> (Bambus [126]) und 1,6 g/cm<sup>3</sup> (Baumwolle [126] oder Hanf [187]) zuordnen. Die meisten Naturfasern wiegen demnach nur knapp mehr als die Hälfte einer äquivalenten Menge an Glasfasern, welche eine Dichte von 2,50 – 2,60 g/cm<sup>3</sup> [79, 126] besitzen. Nicht nur die Dichte variiert bei Pflanzenfasern, sondern auch die Faserdicken und -längen sowie die mechanischen Eigenschaften. Im Vergleich zu synthetischen Fasern, die endlos gesponnen werden können, haben Naturfasern eine endliche Länge und sind dabei relativ kurz, weswegen sie zu Garnen versponnen werden müssen, um sie zu Geweben verarbeiten zu können. Die mechanischen Eigenschaften der Garne sind jedoch schlechter als jene der Einzelfasern. Beim Verweben der Garne bzw. Zwirne (mindestens zwei miteinander verdrehte Garne) zu Geweben, entstehen weitere Festigkeitsverluste [79], weshalb für die Herstellung von NFK die sogenannten *nonwovens*, also unverwebte Einzelfasern, eine besondere Rolle spielen [187]. Zu der Schwierigkeit, exakte Werte für die mechanischen Eigenschaften anzugeben, kommt hinzu, dass alle Naturfasern hygroskopisch sind [126], also dazu neigen, Wasser in flüssiger oder gasförmiger Form aufzunehmen. Die Fähigkeit zur Feuchtigkeitsaufnahme ist nicht nur von der Art der Faser (siehe Tab. 5.4), sondern auch von der relativen Luftfeuchtigkeit abhängig und führt zu einem Steifigkeitsverlust der Fasern [79]. Auch durch Verunreinigungen und Schimmelbefall [187] lassen sich die großen Schwankungsbreiten der Eigenschaften erklären, weshalb Naturfasern vor der Verarbeitung gereinigt und getrocknet werden müssen.

Zum besseren Überblick sind die Eigenschaften einiger pflanzlicher Faserarten im Vergleich zu Basalt- und Glasfasern in Tabelle 5.4 dargestellt. Die angegebenen Streuungen beziehen sich auf publizierte Wertebereiche, Werte in Klammern sind die laut Türk [187] meist publizierten Werte. Einzelne Werte sind als Mittelwert zu verstehen.

Tabelle 5.4 zeigt, dass der auf die Dichte bezogene E-Modul (Spezifischer E-Modul) von Hanf, Flachs und Ramie durchaus mit dem von Glasfasern zu vergleichen ist oder sogar besser abschneidet. Auch die Bruchdehnung ist ähnlich. Laut Hanselka [79] ist die Bruchdehnung ein „wesentliches Auswahlkriterium für die Eignung einer Naturfaser“ als Verstärkung und sollte einen Wert von etwa 4 % nicht überschreiten.

Ein großer Nachteil von Naturfasern ist die schlechte Haftung zwischen Matrix und Fasern, die dadurch zustande kommt, dass die Fasern hydrophil, also, wasseranziehend, und Kunststoffe meist hydrophob, also wasserabweisend, sind [81], weshalb einige physikalische und chemische Modifikationsverfahren entwickelt worden sind, um die Hafteigenschaften zu verbessern [65]. Ziel der physikalischen Methoden ist eine Veränderung der Struktur- und Oberflächeneigenschaften, wodurch die Verbindung zwischen Fasern und Matrix verbessert werden soll. Zu den physikalischen Methoden zählen neben dem Strecken und Thermobehandeln die sogenannte Corona-Behandlung, welche eine Oberflächenoxidation darstellt, und die Plasmabehandlung,

**Tab. 5.4:** Eigenschaften verschiedener Naturfasern und Glasfasern

Eigenschaft	Hanf	Flachs	Ramie	Sisal	Basalt	E-Glas
Dichte ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,40 - 1,60	1,40 - 1,52	1,00 - 1,56	1,16 - 1,50	2,75	2,50 - 2,60
Dicke ( $\mu\text{m}$ )	3 - 51	1,7 - 76	4,6 - 120	5 - 80	8 - 13	5 - 24
Länge (mm)	10 - 55	5 - 140	40 - 260	1 - 8	„unendlich“	„unendlich“
Zugfestigkeit Faser ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	270 - 1000 (800)	343 - 2000 (700)	290 - 1060 (800)	80 - 700	2800 - 4000	1000 - 3500 (2400)
Zugfestigkeit Garn ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	195	195	393	214	k.A.	2600
E-Modul ( $\text{kN}/\text{mm}^2$ )	3 - 90 (65)	8 - 103 (70)	5 - 128 (65)	9 - 38	75 - 100	70 - 76 (73)
Spez. E-Modul ( $((\text{kN}/\text{mm}^2)/(\text{g}/\text{cm}^3))$ )	40 - 47	26 - 45	29 - 60	17 - 29	27 - 37	29
Bruchdehnung (%)	1 - 6 (3)	1 - 4 (3)	1,2 - 4,6 (3)	2 - 7	2,8 - 3,2	1,8 - 4,8
Feuchtigkeitsaufn. (%)	8,5 - 10	8 - 10	12 - 17	11	0,03	-
Quellen	[187], [79], [126]	[187], [79], [126]	[187], [79], [126]	[79], [126], [31]	[74], [170], [67]	[187], [79], [126]

welche ähnlich funktioniert wie die Corona-Behandlung [65]. Auch chemische Behandlungen zielen auf eine verbesserte Haftung zwischen Faser und Matrix ab, hier allerdings, wie der Name schon sagt, durch eine chemische Modifikation der Naturfasern. Zu den Methoden zählt der Einsatz von Haftvermittlern auf Silan-Basis, welche eine Verringerung der Hydrophilie der Fasern zur Folge haben, oder die Merzerisation (Alkali-Behandlung), welche die Oberflächenrauigkeit und dadurch die Adhäsionseigenschaften verbessert. Durch die Alkali-Behandlung werden die Druckfestigkeit und Wasserbeständigkeit der Komposite erhöht [29]. Auch die Modifizierung mit Maleinsäureanhydrid ist eine beliebte Methode der chemischen Behandlung, da damit sowohl die Fasern als auch die Polymermatrix verändert werden können, um die Haftung zu erhöhen. Eine Veränderung von naturfaserverstärkten Kunststoffen mit Maleinsäureanhydrid führt laut Mishra et al. [115] zu höheren Werten von E-Modul, Zugfestigkeit, Schlagzähigkeit und Härte sowie einer stark reduzierten Feuchtigkeitsaufnahme. Durch die Kombination der Merzerisation und einer Behandlung mit Maleinsäureanhydrid gepropftem PP (MAH-PP) kann sogar eine Steigerung der Biegefestigkeit des Verbundwerkstoffs um bis zu 90 % erzielt werden [30]. Auch die Acetylierung (siehe auch Seiten 49 und 55) wird zur chemischen Modifikation von Naturfasern angewandt. Dabei werden hydrophile Hydroxylgruppen der Fasern mit hydrophoben Molekülen chemisch modifiziert, wodurch die Feuchtigkeitsaufnahmefähigkeit der Fasern abnimmt. Laut der Übersichtsarbeit von Faruk et al. [65], die die wichtigsten Arbeiten zu naturfaserverstärkten Kunststoffen der Jahre 2000 bis 2010 zusammenfasst, zeigten Versuche [81], dass acetylierte Fasern im Vergleich zu silanbehandelten Fasern als Verstärkung in Polyesterkunststoffen bessere mechanische Eigenschaften aufwiesen. Eine weitere Möglichkeit der chemischen Modifikation der Fasern ist die Enzymbehandlung, welche aufgrund ihrer Umweltfreundlichkeit zunehmend an Bedeutung gewinnt [65].

Es sollte auch erwähnt sein, dass die mechanischen Eigenschaften von Naturfasern ebenso wie von synthetische Fasern oder Polymeren unter starker Temperatureinwirkung abnehmen. Da es jedoch herstellungsbedingt bei der Produktion von Faserverbundwerkstoffen, vor allem bei Verwendung von thermoplastischen Kunststoffen als Matrix, zu hohen Temperaturen kommt, ist die Kenntnis über den Degradationsprozess der Fasern in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit von besonderer Bedeutung [79]. Eine große Rolle spielt auch die Überlegung, welche Thermoplaste überhaupt als Matrices in Betracht kommen [121] bzw. bei welchen Thermoplasten die notwendige Verarbeitungstemperatur höher ist, als es die Fasern ohne zu große Festigkeitsverluste zulassen.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass Naturfasern ein großes Potential als Verstärkungsfasern besitzen und durch ihre geringe Dichte vor allem für den Leichtbau interessant sind. Der Umgang mit ihnen ist komplex, man muss sich auf recht große Schwankungsbreiten der Eigenschaften einstellen und sich der Probleme, die eine Feuchtigkeitsaufnahme mit sich

führen kann, bewusst sein. Eine weitere Schwierigkeit im Umgang mit Naturfasern stellen die schlechten Haftungseigenschaften zwischen Faser und Kunststoffmatrix dar, welche jedoch durch physikalische und besonders durch chemische Modifikationen relativ gut in Griff zu bekommen sind und oft auch zu einer gleichzeitigen Verbesserung der Feuchteabsorptionseigenschaften führen [65]. Neben dem Leichtbaupotential liegt ihr größter Vorteil jedoch in einem deutlich geringeren Energieaufwand für die Herstellung und damit einhergehenden niedrigeren CO<sub>2</sub>-Emissionen, vor allem bei Verwendung von heimischen Fasern. Türk [187] zeigt, dass die Produktion von Naturfasermatten mit etwa 20 % der Energie, die für die Herstellung einer Glasfasermatte notwendig ist, auskommt. Ein weiterer Vorteil von Naturfasern ist ihr, im Vergleich zu Verstärkungsfasern aus Glas oder Carbon, niedrigerer [187] und dabei recht stabiler [39] Preis.

#### 5.4.1.2 Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK)

Die für NFK verwendeten Matrixwerkstoffe können abbaubar oder nicht abbaubar, thermoplastisch oder duroplastisch, biobasiert oder fossilbasiert sein, wobei zur Zeit petrochemische Matrices noch deutlich häufiger angetroffen werden als biobasierte. Gerade in der Automobilbranche werden NFKs schon seit einigen Jahren für diverse Innenteile wie Türverkleidungen, Hutablagen oder Armaturenbretter eingesetzt [187], bedingt durch verschiedene gesetzliche Vorgaben wie Maßnahmen zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und des Deponiebedarfs eines Fahrzeuges. Durch die Verwendung von naturfaserverstärkten Kunststoffen konnten Gewichtsreduktionen um bis zu 30 % bei einer Kostenreduktion um bis zu 20 % und einer deutlich verbesserten Umweltbilanz erzielt werden [31]. Für den Bausektor müssten noch Anreize geschaffen und weiter Forschung betrieben werden, um den Einsatz von NFK stärker voranzutreiben. Durch das gestiegene Umweltbewusstsein in den letzten Jahren ist es dennoch zu einem erheblichen Anstieg der Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet gekommen. Während bis zum Jahr 2000 jährlich nur vereinzelte Arbeiten publiziert wurden, kam es danach geradezu zu einem exponentiellem Wachstum [23] an veröffentlichten Studien zu naturfaserverstärkten Kunststoffen.

Als thermoplastische Matrices werden hauptsächlich Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE) sowie teilweise auch Polystyrol (PS) oder Polyvinylchlorid (PVC) auf meist petrochemischer Basis verwendet. Diverse Kombinationen von PP mit unterschiedlichen Naturfasern wie Hanf, Flachs, Kenaf, Sisal, Öl- und Dattelpalme, Kokos, Bambus, Abaca, Reishülsen, Jute und Weizenstroh wurden bereits getestet [65]. Placet [153] berichtet beispielsweise von guter Performance von Hanf-PP-Werkstoffen. Aber nicht nur die Art der Faser hat einen Einfluss auf die Eigenschaften der Verbundwerkstoffe, auch das Mischungsverhältnis von Faser zu Matrix, die Faserlänge und sogar das Alter der Faser können zu Variationen der Ergebnisse führen. So beobachteten Mukhopadhyay und Srikanta [121], dass, obwohl ein Jahr lang getrocknete (gealterte) Sisalfasern im Gegensatz zu frischen Fasern schlechtere Werte für Festigkeit, Dehnung und Bruchfestigkeit lieferten, PP-Komposite mit gealterten Sisalfasern bessere mechanische Eigenschaften aufwiesen als jene mit frischen Sisalfasern. Auch Polyethylen eignet sich gut zur Verwendung mit Naturfasern als Verstärkung, ebenso wie bei PP wurden hier bereits einige interessante Kombinationen mit verschiedensten Naturfasern untersucht, darunter Hanf, Flachs, Sisal, Reishülsen, Sojapulver, Ananas, Reis-, Raps und Weizenstroh, Bagasse und Abaca mit HDPE bzw. LDPE [65]. Während die Verwendung von PP und PE als thermoplastische Matrices bereits häufig untersucht worden ist, sind laut Faruk et al. [65] erst wenige Arbeiten über naturfaserverstärkte Kunststoffe mit Polystyrol bzw. PVC als Matrix veröffentlicht worden. Untersuchte Kombinationen waren mit Sisal- und Agavefasern verstärktes Polystyrol sowie mit Bambus-, Abaca- bzw. Bagassefasern verstärktes PVC.

Wie auch schon in Kapitel 4.3.1.1 *Faserverstärkte Kunststoffe (FVK)* beschrieben, werden im Bauwesen meist duroplastische Kunststoffe als Matrix für Faserverbundwerkstoffe eingesetzt.

Diese eignen sich auch für die Verstärkung mit Naturfasern. Am häufigsten werden Polyester-, Epoxid- und Phenolharze verwendet. Im Gegensatz zu den in Kombination mit Naturfasern relativ gut erforschten Matrices aus PP oder PE sind zu duroplastischen Matrices für Naturfaserverbundwerkstoffe noch recht wenige Forschungsarbeiten veröffentlicht worden. Die Arbeiten umfassen Untersuchungen mit Sisal-, Abaca-, Jute- und Flachsfasern in Kombination mit einer Polyestermatrix, Sisal-, Kenaf-, Hanf-, Flachs- und Ölpalmenfasern mit einer Epoxidharzmatrix sowie Ölpalmen-, Jute- und Bambusfasern mit einem Phenolharz als Matrix [65]. Ein Grund für die seltenere Verwendung von duroplastischen Kunststoffen als Matrix für NFKs könnte in ihrem stark vernetzten molekularen Aufbau und der damit verbundenen schlechten Recyclingfähigkeit liegen, denn naturfaserverstärkte Kunststoffe folgen dem „grünen“ Ansatz, möglichst leistungsfähige aber ressourcenschonende, recyclingfähige und umweltfreundliche Werkstoffe zu kreieren. Wenn man von einer guten Recyclingfähigkeit als Hauptanforderung ausgeht, stellt sich dann die Frage, ob duroplastische Matrices diesen Anforderungen überhaupt gerecht werden können.

#### 5.4.1.3 Biobasierte Kunststoffe mit Faserverstärkung

Eine Weiterentwicklung dieses Gedankens kommt dann zur der Frage, wie hoch der biobasierte Anteil naturfaserverstärkter Kunststoffe sein kann und ob sich auch biogene Matrices für diese Aufgaben eignen. Dafür kommen sowohl biobasierte Varianten der im vorherigen Kapitel aufgezählten petrochemischen Kunststoffe, also Bio-PE, Bio-PP, Bio-UP und biobasierte Epoxidharze, als auch Novels wie PHB und PLA in Frage, wobei letzteres besonders gerne verwendet wird und zu den am besten untersuchten Matrixsystemen zählt [65]. Bledzki et al. [32] machten Versuche mit PLA- und PP-Kompositen, welche mit Abaca- und menschengemachten Cellulosefasern verstärkt wurden, und kamen zu dem Schluss, dass die Faserverstärkung zu einer signifikanten Verbesserung der mechanischen Eigenschaften führte. Im Vergleich der jeweiligen verstärkten Kunststoffe erreichten die PLA-basierten Komposite höhere Werte für Zug- und Biegemodul sowie für Zug- und Biegefestigkeit als die PP-basierten Werkstoffe. Bei der Schlagzähigkeit jedoch erreichte der PP-Cellulose-Kunststoff die höchsten Werte. Oksman et al. [136] kamen bei ihrer Arbeit zu dem Ergebnis, dass bei 30 Gew.-% Faserverstärkung ein PLA-Flachs-Kunststoff um etwa 50 % stärker ist als ein vergleichbarer PP-Flachs-Kunststoff. Diverse weitere Versuche mit Verbundwerkstoffen auf PLA-Basis mit Verstärkungsfasern aus Jute, Kenaf, Kokos, Bambus und Hanf wurden ebenfalls bereits erfolgreich durchgeführt [65, 112]. Auch Polyhydroxyalkanoate wie PHB und PHBV eignen sich als Matrix, allerdings scheint die Haftung an den Fasern nicht ganz so gut zu sein wie jene von PLA [113]. Auch biobasiertes PA11 eignet sich als Matrix für einen naturfaserverstärkten Werkstoff, allerdings gibt es auch auf diesem Gebiet noch wenige Forschungsarbeiten [137] und die hohen Schmelztemperaturen von Polyamiden sprechen eher gegen ihren Einsatz [39].

Neben den genannten Kunststoffen wurden auch andere thermoplastische und duroplastische, biogene Matrixsysteme auf Stärke- oder Pflanzenölbasis untersucht. Zu letzteren gehören beispielsweise Versuche mit duroplastischen Sojaöl-(epoxid-)Harzen mit Verstärkungen aus Flachs- [10] bzw. Bambus- und Hanffasern [106]. Mit Hilfe eines neuen Härtungsverfahrens konnten Noè et al. [129] sogar ein vollständig biobasiertes Epoxidharz auf Basis von Vanillin-Alkohol herstellen, welches sie mit Cellulose- und Flachsfaserverstärkung mit einem herkömmlichen Epoxidharzverbundwerkstoff verglichen, und kamen zu dem Schluss, dass das neue Komposit ähnliche oder so sogar bessere mechanische Eigenschaften aufwies als fossilbasierte, naturfaserverstärkte Epoxidharze. Natürlich ist es auch möglich, biobasierte Matrixsysteme mit synthetischen Fasern zu verstärken, so bewiesen Moslehi et al. [120] die Möglichkeit, recycelte Glasfasern aus Rotorblättern von stillgelegten Windkraftwerken als Verstärkung für eine PLA-Matrix zu verwenden. Der so hergestellte Verbundwerkstoff könnte als Filament für den 3D-Druck dienen.

Dies trifft allerdings nicht den Hauptschwerpunkt dieser Arbeit und wird daher nicht weiter betrachtet.

#### 5.4.2 Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC)

Holz-Polymer-Werkstoffe (eng. *Wood Polymer Composites* oder *Wood Plastic Composites*, WPC) sind den naturfaserverstärkten Kunststoffen ähnelnde Verbundwerkstoffe, bei denen Holzmehl und -fasern als Verstärkung einer meist mineralölbasierten Matrix dienen. Der Unterschied in der Kategorisierung erfolgt durch die Faserlänge. Nach Friedrich [71] sind NFK im Langfaserbereich angesiedelt, während die Holz-Polymer-Werkstoffe oder auch holzfaserverstärkte Kunststoffe im kurzfasrigen Bereich zu finden sind. Je nach späterer Verarbeitungstechnik können bei WPC bis zu 80 % Fasern beigemischt werden. Holzmehl kann aufgrund der Form der Partikel nur als Füllstoff verwendet werden. Zur zusätzlichen Verstärkung können bei WPC auch andere Naturfasern wie Flachs beigemischt werden [187]. Wie auch bei den naturfaserverstärkten Kunststoffen wird durch Haftvermittler ein besserer Verbund zwischen Fasern und Matrix erreicht [71]. Als Matrices werden meist PP, PE oder PVC eingesetzt [39], wobei die höchsten Steifigkeits- und Festigkeitswerte mit PVC und die geringsten tendenziell mit PE erreicht wurden. Auch PLA eignet sich als Matrixsystem [158]. Bezüglich der Art der Fasern lieferten Hartholzfaser höhere mechanische Eigenschaften als Weichholzfaser [71]. Generell liegen die gelieferten Werte weit über jenen von unverstärkten PP- oder PE-Polymeren und befinden sich laut Türk [187] auf dem Niveau von glasfaserverstärkten Polyamiden.

Durch die guten mechanischen Eigenschaften, die große Gestaltungsfreiheit und die leichte Herstellung von Profilen diverser Querschnitte, stellen WPC-Profile in gewissen Bereichen durchaus eine Alternative zu Aluminiumprofilen dar [187]. Als Terrassendielen, welche den Hauptabsatzmarkt von WPC-Produkten darstellen [39], haben sich Holz-Polymer-Werkstoffe schon seit einigen Jahren etabliert, obwohl Forschungsarbeiten zu einer Langzeitnutzung noch kaum vorhanden sind [187], was vor allem an geänderten Rezepturen und der recht späten breiteren Markteinführung in Europa vor erst etwa 15 Jahren liegt [71]. Aufgrund der im Vergleich zu Holzdielen stärkeren Oberflächenerwärmung und der Verwendung von Thermoplasten als Matrices wird häufig von einer geringeren Stabilität bei großer Temperatureinwirkung durch starke Sonneneinstrahlung ausgegangen. Untersuchungen nach Frost-Tau-Zyklen und Biegeprüfungen bei verschiedenen Temperaturen haben jedoch ergeben, dass diese sowohl bei Holz- als auch bei WPC-Dielen nur einen geringen Einfluss auf die Festigkeit haben, eine starke Rissbildung in den Holzdielen eher als optischer Mangel zu bewerten ist und sich auch in WPC, wenn auch nicht mit freiem Auge sichtbar, Risse bilden, welche die mechanischen Eigenschaften jedoch nicht maßgeblich beeinflussen [78]. Im Vergleich zu Holzdielen punkten WPC-Terrassendielen neben einer besseren Dauerhaftigkeit und weniger Pflegeaufwand vor allem durch die Abwesenheit der Verletzungsgefahr durch Holzsplitter. Weitere Vorteile von WPC sieht Türk [187] in der Alternative zu tropischen Hölzern und der Abfallverwertung aus der Holzindustrie. Friedrich [71] sieht durch den hohen Fasergehalt des Werkstoffs zusätzlich „die mineralölbasierten Kunststoffe hinsichtlich deren Ressourcenbasis entlastet“. Nachteilig sind die bereits erwähnte höhere Oberflächentemperatur bei Sonneneinstrahlung, die immer noch künstliche Optik und die meist fossilbasierte Polymermatrix [187]. Allerdings wäre die Verwendung von biobasierten Kunststoffen durchaus realistisch und möglich [158].

Die Forschung und vor allem die Normung sowohl zu NFK als auch zu WPC befinden sich noch relativ am Anfang, was ein Arbeiten mit ihnen nicht einfach macht. Zudem müssen laut Carus und Partanen [39] Biokunststoffe aller Art in ihren mechanischen und verarbeitungsprozessbedingten Eigenschaften mit klassischen Kunststoffen mithalten und für einen breiten Marktzugang zumindest gleich gute oder bessere Eigenschaften und Herstellungskosten vorweisen.

# 6 Komponenten ausgewählter Begrünungssysteme

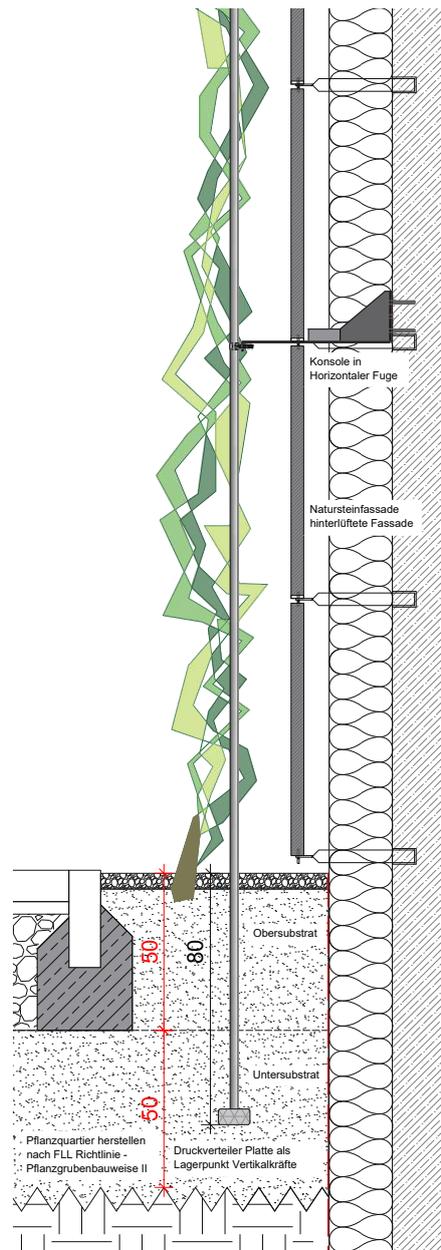
Im folgenden Kapitel wird je Systemtyp ein Begrünungssystem vorgestellt. Dieses wird dann in seine Einzelteile zerlegt, die dann bezüglich ihrer Materialien analysiert werden. Dabei soll aufgezeigt werden, welche Teile schon jetzt aus Kunststoffen bestehen und ob bzw. wie diese durch Biokunststoffe ersetzt werden könnten. Es sei hier jedoch angemerkt, dass biobasierte Kunststoffe zur Zeit (noch) teurer sind als ihre petrochemischen Pendanten. Zudem zeigen die Lebenszyklusanalysen aus den Abschnitten 5.3.1.1 und 5.3.3.2, dass Biokunststoffe zwar das Treibhauspotential und die Verwendung fossiler Brennstoffe deutlich reduzieren, aber auch zur Versauerung der Böden und Eutrophierung von Land und Wasser beitragen. Es ist daher für den Einzelfall bzw. für einzelne Bauteile mittels weiterer Lebenszyklusanalysen zu prüfen, ob sich ein Umstieg auf biobasierte Kunststoffe lohnt.

## 6.1 Bodengebundene Begrünungssysteme

Als Stellvertreter für die Gruppe der bodengebundenen Fassadenbegrünungen wird das System *Polygrün* untersucht, welches von der deutschen Firma Vertiko vertrieben wird.

### 6.1.1 Beschreibung System *Polygrün*

Bei diesem Begrünungssystem handelt es sich um ein Rankgitter aus pultrudierten Profilen aus ungesättigtem Polyesterharz mit Glasfaserverstärkung. Das Rankgitter besteht aus Vollstäben mit einem Durchmesser zwischen 7 mm und 9 mm, welche rechteckige Felder mit Größen zwischen 25 x 25 cm<sup>2</sup> bis zu 40 x 70 cm<sup>2</sup> bilden. Die Feldweiten werden je nach gewünschter Pflanzenart für den Bewuchs gewählt. Zur Übertragung der vertikalen Lasten werden in regelmäßigen Abständen senkrechte Tragrohre mit einem Außendurchmesser von 20 mm und einem Innendurchmesser von 10,5 mm, welche ebenfalls aus glasfaserverstärktem UP-Harz bestehen, in die Struktur integriert [37]. Die Lastabtragung kann entweder in den Boden durch eine angelehnt stehende Konstruktion wie in Abb. 6.1, über eine abgehängte Konstruktion mit fixiertem Kopfpunkt und gleitendem Fußpunkt oder über eine Lastableitung in die Wand mittels Einzelhaltern erfolgen. Für die Befestigung an der Fassade dienen Abstandhalter aus Edelstahl, die entweder direkt an einem tragenden Außenbauteil montiert oder mit Hilfe von speziellen, thermisch trennenden Fassadenankern durch eine bis zu 180 mm starke Wärmedämmung hindurch an dem Tragwerk verankert werden können. Auch eine Abstützung mittels Konsolen ist möglich. Je nach Fassadensystem und gewähltem Bewuchs sind für eine flächige Begrünung zwischen einem und vier Stück Abstandhalter pro Quadratmeter notwendig, wobei der Hersteller ab einer Notwendigkeit von drei Stück pro Quadratmeter eine andere Anbringung durch Vorständigung o.Ä. empfiehlt [195]. Für einen mittelschweren Bewuchs mit bis zu 15 kg/m<sup>2</sup> bei einem Wandabstand zwischen 120 mm und 180 mm werden beispielsweise zwei Stück pro Quadratmeter benötigt.



**Abb. 6.1:** Bodengebundenes Begrünungssystem *Polygrün*: angelehnt stehende Konstruktion bei hinterlüfteter Fassade, Befestigung mittels Konsolen  
(Bildquelle: ©Vertiko GmbH [193])

## 6.1.2 Komponenten

Die einzelnen Bestandteile des Systems *Polygrün* werden in den nachfolgenden Abschnitten im Detail beschrieben und es werden Substitutionsmöglichkeiten für die verwendeten Kunststoffe diskutiert.

### 6.1.2.1 Rankgitter (GF-UP)

Das Rankgitter dient als Stützkonstruktion für die Pflanzen. Das Ziel besteht darin, die schlingenden, rankenden oder spreizklimmenden Pflanzen so zu unterstützen, dass sie aus eigener Kraft und

ohne menschlicher Hilfe Halt finden und an der Stützkonstruktion empor wachsen können [194]. Dazu eignen sich runde Strukturen mit eher kleinen Durchmessern am besten, da eckige Profile die Pflanzen beschädigen können. Im Gegensatz zu Seilen als Rankhilfe verteilen Gitterstrukturen die angreifenden Lasten gleichmäßiger auf die Haltepunkte und haben den Vorteil, dass sie nicht nachjustiert werden müssen [194]. Das Rankgitter des Systems *Polygrün* besteht, wie erwähnt, aus Vollstäben und Tragrohren aus GF-UP, also glasfaserverstärktem, ungesättigtem Polyesterharz. Die technischen Daten lassen sich laut Hersteller [37] wie in nachfolgender Tabelle 6.1 angeben, zusammenfassen.

**Tab. 6.1:** Technische Daten Rankgitter *Polygrün* [37, 70]

Mechanische Eigenschaften der GF-UP-Profile (parallel zur Faser)	
Dichte ( $\text{g/cm}^3$ )	2,1
Zug- und Biegefestigkeit ( $\text{N/mm}^2$ )	900
E-Modul, Zug und Biegung ( $\text{N/mm}^2$ )	40 000
Bruchdehnung (%)	2
linearer Wärmeausdehnungskoeffizient ( $1/\text{K}$ )	$12 \times 10^{-6}$
Thermische Leitfähigkeit ( $\text{W}/(\text{mK})$ )	0,2 – 0,6
Schlagzähigkeit Vollprofile ( $\text{kJ/m}^2$ )	120
Schlagzähigkeit Rohrprofile ( $\text{kJ/m}^2$ )	90 – 120
Feuchtigkeitsaufnahme (%)	< 0,15
Brandschutzklasse (EN 13501)	D
Anwendungsgrenzen bei Langzeitbelastung	
Zug-, Druck-, und Biegespannung ( $\text{N/mm}^2$ )	70
Schubspannung ( $\text{N/mm}^2$ )	8
Dauereinsatztemperatur	-100°C bis +155°C

Um den biogenen Anteil dieser Systemkomponente zu erhöhen, könnten die Glasfasern durch Naturfasern ersetzt werden. Auch nur der teilweise Ersatz, beispielsweise nur für die Vollprofile, wäre denkbar. Ein zweiter Ansatz wäre die Verwendung einer biobasierten Matrix. Die Herstellung von bis zu 100 % biogenen, ungesättigten Polyesterharzen ist technisch bereits möglich, auch eine Verstärkung mit Flachs- und Basaltfasern wurde bereits untersucht [64]. Oft vergehen jedoch einige Jahre bis es zur Marktreife solcher Produkte kommt. Daher wird als Vergleich ein Material herangezogen, welches bereits erhältlich ist. Bei dem auf Seite 47 vorgestellten Material *Nabasco 8010* der Firma NPSP handelt es sich um ein biobasiertes, ungesättigtes Polyesterharz mit Naturfaserverstärkung. Dieses wird mit einer Verstärkung aus Flachs- Schilf-, Sisal-, Jute- oder recycelten Textilfasern (Baumwolle) hergestellt. Auch eine feuerfeste Variante mit Schilffasern ist möglich. Abhängig von den verwendeten Fasern ergeben sich für den Werkstoff geringfügig unterschiedliche Eigenschaften, welche in Tabelle 6.2 zusammengefasst sind.

Beim Betrachten der Tabellen fällt auf, dass der Vergleich vom Großteil der gegebenen Eigenschaften möglich ist. Zusätzlich ist ein Vergleich des biogenen Anteils möglich, der bei den *Nabasco*-Kunststoffen zwischen 66 % und 85 % liegt und beim herkömmlichen GF-UP mit 0 % angenommen werden kann. Ein Vergleich der mechanischen Eigenschaften zeigt, dass die naturfaserverstärkten, ungesättigten Polyesterharze um etwa 10 % und 20 % leichter sind als das glasfaserverstärkte Pendant, jedoch ihre Biegefestigkeiten und E-Moduln deutlich geringer sind. Auch die Werte der Schlagzähigkeit der biobasierten Werkstoffe sind bedeutend geringer, während die Feuchtigkeitsaufnahme etwas stärker ist<sup>5</sup>. Ob es möglich wäre, den glasfaserverstärkten Kunst-

<sup>5</sup>Eine Anfrage bei der Firma NPSP bezüglich lin. Wärmeausdehnungskoeffizient, thermischer Leitfähigkeit und Anwendungsgrenzen bei Langzeitbelastung verlief leider negativ.

**Tab. 6.2:** Eigenschaften *Nabasco 8010*, je nach Verstärkungsfaser [134]

Verstärkungsfaser	Flachs	Schilf	Textil	Sisal	Jute	Schilf (feuerfest)
Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	1,70	1,71	1,70	1,65	1,65	1,85
Biegefestigkeit (N/mm <sup>2</sup> )	40	40	50	40	40	30
E-Modul, Biegung (N/mm <sup>2</sup> )	8 000	8 000	8 000	7 800	7 800	10 000
Schlagzähigkeit (kJ/m <sup>2</sup> )	6	6	6	6	6	6
Feuchtigkeitsaufnahme (%)	1,2	0,9	0,5	1,8	1,3	0,7
biogener Anteil (%)	85	85	85	85	85	66
Brandschutzklasse (EN 13501)	-	-	-	-	-	B-s1, d0

stoff durch einen naturfaserverstärkten Kunststoff zu ersetzen, hängt somit von der Auslastung der GFK-Stäbe ab. Diese ist jedoch nicht bekannt. Zusätzlich stehen zu den *Nabasco*-Materialien keine Daten zu Langzeitbelastungen zur Verfügung, weshalb hier keine exakte Aussage getroffen werden kann. Gegebenenfalls ließen sich die Stabdurchmesser variieren, damit sie aus einem biobasierten Kunststoff ausgeführt werden können, allerdings dürfen diese nicht zu groß sein. Dieser Anspruch hat nicht nur den ästhetischen Grund, dass das System weiterhin leicht und filigran aussehen soll; der Hauptgrund ist, dass sich Schlingpflanzen an zu großen Profilen nicht festhalten können. Auch der Abstand der Stäbe kann nicht beliebig verkleinert werden, da je nach Pflanzenart gewisse Mindestabstände zu beachten sind [194]. Laut Angaben der Firma Vertiko [70] kämen Flachsfasern als Ersatz für die Glasfasern in Betracht, allerdings ist ihre Anwendung bei pultrudierten Profilen noch nicht zufriedenstellend möglich. Zur Optimierung der Ökobilanz wird daher auf Wiederverwendung der Profile und Resteverwertung geachtet.

### 6.1.2.2 Abstandhalter und Konsolen (Edelstahl)

Die Gitter werden gewöhnlicherweise in einem gewissen Abstand zur Wand montiert. Zum einen wird dadurch für eine gute Durchlüftung der Pflanzen gesorgt, das Dickenwachstum der Kletterpflanze wird nicht beeinflusst und es vereinfacht die Pflege. Auf der anderen Seite dient der Abstand auch dem Schutz der Gebäudefassade vor Schäden durch die Pflanzen (insbesondere bei hinterlüfteten Fassaden). Die stabförmigen Abstandhalter stellen den gewünschten Wandabstand her und übertragen die Lasten der Stützkonstruktion auf die Verankerung [194]. Diese sind hauptsächlich vertikal (aus dem Eigengewicht und dem Gewicht der Pflanzen), aber auch horizontal aus Winddruck- und -soglasten sowie gegebenenfalls durch sich anlehrende Personen belastet. Konstruktiv betrachtet stellen sie daher einen überwiegend auf Biegung beanspruchten Kragarm dar. Bei der Dimensionierung ist darauf zu achten, dass die Kraglänge ab der tragenden Wand zu messen ist und dass der Abstandhalter sich auch unter Höchstlast nicht bleibend verformen darf. Dies spielt vor allem bei Wärmedämmungen und hinterlüfteten Fassaden eine Rolle. Bei großen Lasten oder langen Kraglängen empfiehlt der Hersteller daher eine Befestigung mit Konsolen, wie in Abb. 6.1 ersichtlich. Diese müssen mit mehreren Fassadenankern befestigt werden und verteilen so die Lasten auf mehrere Punkte. Zudem sind sie durch ihre Geometrie weniger anfällig für Verformungen als die stabförmigen Abstandhalter.

Die statischen Anforderungen an die Abstandhalter oder Konsolen hängen zum einen von ihrer Form bzw. Geometrie ab, zum anderen von ihrer Kraglänge, also dem gewünschten Abstand zwischen tragender Wand und dem Rankgitter, und zusätzlich von der Größe der Belastung, also der gewählten Pflanzenart und ihrem Gewicht.

Die Zugfestigkeit von normalem Baustahl beträgt 235 N/mm<sup>2</sup>, der Elastizitätsmodul liegt bei 210 000 N/mm<sup>2</sup>. Die Bauteile sind jedoch aus Edelstahl gefertigt, welcher noch höhere Zugfestigkeiten besitzt. Von den in Tabelle 6.2 gegebenen Daten lässt sich daher schließen, dass sich

ein Ersatz der Abstandhalter durch einen Biokunststoff nur mit erheblichen Geometrieänderungen und einer deutlich höheren Anzahl bewerkstelligen ließe. Mehr Abstandhalter würden jedoch auch mehr Befestigungspunkte und somit mehr Fassadendübel bedeuten. Ob eine Substitution in so einem Fall sinnvoll wäre, ist daher fraglich.

Eine mögliche Option wäre jedoch eine Kombination aus Edelstahlkonsolen und Abstandhaltern aus NFK, wenn das System so konzipiert ist, dass die Konsolen den größten Teil der vertikalen Lasten übernehmen. Die Abstandhalter wären dann hauptsächlich für das Übertragen der horizontalen Lasten zuständig. Allerdings ist auch hier zu beachten, dass im Gegensatz zu Abstandhaltern aus Edelstahl wahrscheinlich eine größere Stückzahl notwendig wäre.

### 6.1.2.3 Fassadenanker (Stahl/GFK)

Die Fassadenanker oder Fassadendübel dienen der Befestigung an der tragenden Wand und sorgen dafür, dass die auftretenden Lasten sicher abgetragen werden. Gleichzeitig muss aus bauphysikalischer Sicht darauf geachtet werden, die bei einer Durchdringung der Wärmedämmung entstehenden Wärmebrücken zu minimieren. Dieser Überlegung folgend entwickelte *Polygrün* ihre eigenen *ThoBraTherm-Anker*, welche aus einem mit GFK umwickelten Stahl-Gewindestift bestehen. Dieser Fassadendübel dient der Aufnahme für die Abstandhalter, während die GFK-Umwicklung als thermische Isolierung und als Verstärkung des Widerstandes gegen Querlasten verwendet wird [194]. Um Materialkosten zu sparen und Abfall zu vermeiden, wird die Umwicklung der Anker aus Resten der Rankgitter-Produktion hergestellt.

Bei einer nachträglichen Anbringung an Fassaden mit Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) muss besonders auf die Vermeidung von Wärmebrücken geachtet werden. Hier kommt eine weiterentwickelte Variante des *ThoBraTherm-Ankers* zum Einsatz, welcher zusätzlich zu der Umwicklung mit einer Stützhülse aus hoch druckfestem und schwer entflammbar GFK und einer Dämmschicht ummantelt ist [194]. Die Anker werden mittels eines Injektionsmörtels in die tragende Wand aus Beton oder Mauerwerk eingeklebt [192].

Die Dimension des Gewindestiftes hängt von der Kraglänge des Systems, der Belastung sowie der Geometrie und der Anzahl der Abstandhalter ab. Sind mehr Befestigungspunkte vorhanden, können gegebenenfalls kleinere bzw. schwächere Dübel ausreichend sein. Zusätzlich spielt der Untergrund eine große Rolle, denn grundsätzlich hält die Verankerung in intaktem Beton besser als in gerissenem Beton oder Hochlochziegelmauerwerk.

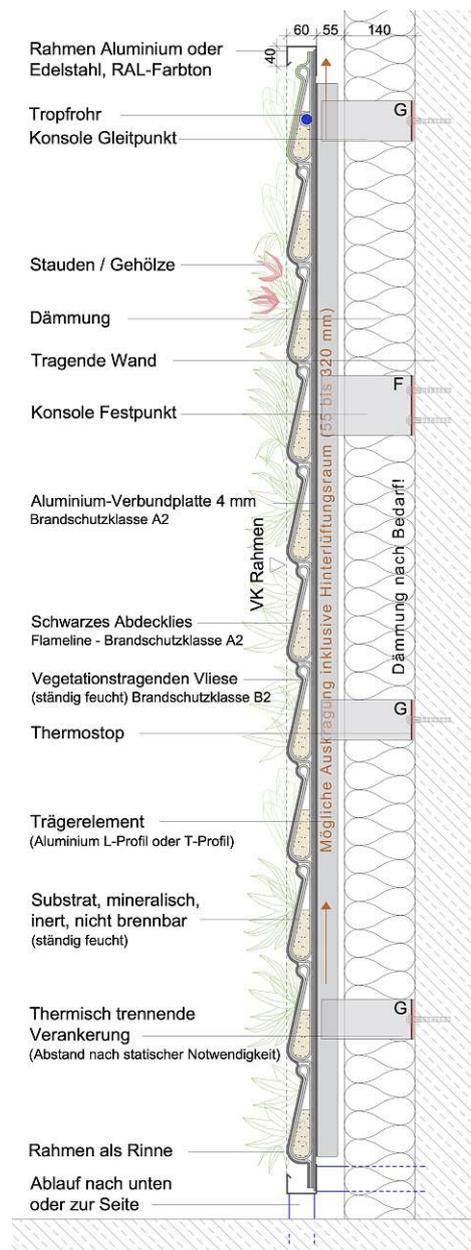
Ein Ersatz der GFK-Komponenten dieses Bauteils durch biobasierte Alternativen ist denkbar. Es müsste jedoch in experimentellen Versuchen überprüft werden, ob der Biokunststoff als Stützhülse geeignet ist und die Querlasten übertragen kann. Die Größe der Lasten hängt, wie zuvor beschrieben, vom Gewicht der Pflanzen, der Kraglänge des Systems, der Anzahl und Geometrie der Abstandhalter sowie dem Untergrund ab.

## 6.2 Geotextilsysteme

Der Aufbau eines Geotextilsystems wird anhand des Systems *Living Wall* der deutschen Firma Vertiko dargestellt.

### 6.2.1 Beschreibung System *Living Wall*

Die *Living Wall* ist ein vollflächiges Gesamtsystem mit einem schlanken Aufbau und wird als vorgehängte hinterlüftete Fassade an das Bauwerk angebracht. Konsolen, welche an der tragenden Wand des Bauwerks befestigt werden, halten die Trägerelemente aus Aluminium L- und T-Profilen. Diese Trägerprofile bilden eine Hinterlüftungsebene von 55 mm und dienen als Unterkonstruktion



**Abb. 6.2:** Geotextilsystem *Living Wall*: Substratgefüllte Vliestaschen auf Aluminiumunterkonstruktion (Bildquelle: ©Vertiko GmbH [193])

für die tragende Aluminium-Verbundplatte, welche den Untergrund des Systems bildet. Ab der Verbundplatte besitzt das System eine Stärke von 60 mm, wodurch sich eine Gesamtstärke von 115 mm ab der Außenhaut des Gebäudes ergibt [193]. Die Pflanzen sitzen in mit Substrat gefüllten, horizontal verlaufenden Vliestaschen, welche an der Aluminium-Verbundplatte befestigt werden.

Die Befestigung der Vliese erfolgt mittels Edelstahl-Tackernadeln. In regelmäßigen Abständen verlaufen Tropfrohre aus PE durch die Taschenreihen. Mit Hilfe einer automatisch gesteuerten, fernüberwachten Bewässerungsanlage wird sichergestellt, dass sich die Vliese und das Substrat in einem dauerfeuchten Zustand befinden. Das Substrat selbst ist mineralisch und nicht brennbar. Den Abschluss zur Seite hin bildet ein Rahmen aus Aluminium oder Edelstahl. Durch den

schlanken Aufbau und die Verwendung leichter Materialien wiegt das Gesamtsystem nur etwa 35 kg/m<sup>2</sup>. Zudem lässt sich das System an fast jede geometrische Form anpassen [193]. Der Aufbau des Systems wird in Abb. 6.2 dargestellt.

## 6.2.2 Komponenten

In den folgenden Abschnitten werden die Bestandteile des Systems einzeln betrachtet. Dabei wird besonders auf die Materialien und ihre Anforderungen geachtet und nach biobasierten Alternativen gesucht.

### 6.2.2.1 Vliese (PES/PP, Glasfaser oder Glas-Basalt-Gestrick)

Wie in Abb. 6.2 ersichtlich, kommen bei der *Living Wall* zwei Arten von Vliesen zum Einsatz: Ein Abdeckvlies für den Abschluss nach außen hin und ein vegetationstragendes Vlies, aus welchem die Taschenreihen geformt werden, die die Substratfüllung beinhalten. Je nach Brandschutzanforderung stehen für das System verschiedene Vlieskombinationen zur Verfügung. Das innenliegende, vegetationstragende Vlies wird dabei entweder aus einem (teil-)recyclten Polyester-Polypropylen-Mischtextil (PES/PP) oder aus einem Glasfaservlies hergestellt. Bei der außenliegenden Schichte kommen entweder ein Glasfaservlies oder ein Glas-Basalt-Gestrick zum Einsatz [193]. Die PES/PP-Vliese sind im trockenen Zustand normal entflammbar, werden jedoch mit Hilfe der Bewässerungsanlage in einem dauerfeuchten Zustand gehalten. So wird einerseits die Entflammbarkeit verzögert, andererseits dient das Vlies so gleichzeitig als Speichervlies. Das Vlies ist jedoch nicht nur durchgehend feucht, sondern auch in ständigem Kontakt mit Substrat und Düngemittel. So wie das herkömmliche Geotextil muss daher auch eine biobasierte Alternative unter den gegebenen Umständen beständig bleiben, ohne dass es zu einer Zersetzung kommt. Es gibt bereits einige Anbieter (z.B. hier [73]), die biobasierte Geovliese auf PLA-Basis anbieten, allerdings sind diese Vliese nur auf temporäre Funktionen ausgelegt und haben laut Hersteller eine Lebensdauer von etwa drei bis fünf Jahren, was sie für den Einsatzbereich in einem Geotextil-Begrünungssystem ungeeignet macht. Eine Suche nach dauerhaften, biobasierten Vliesen verlief erfolglos, allerdings wurde ein Hersteller gefunden, der biobasierte PP-Compounds für die Herstellung von Vliesstoffen anbietet [12]. Zudem gibt es einige Vliesstoffe aus recycelten PE- oder PP-Fasern. Eine Substitution durch Bio-PP sollte daher möglich sein. Auch Bio-PE, Bio-PET oder mit Additiven haltbar gemachtes PLA wären möglich. Diese Produkte können bei Gebäuden der Gebäudeklassen 1 bis 3 (siehe auch Kapitel 7.2 *Brandschutzanforderungen*) angewendet werden.

Bei Gebäuden ab Gebäudeklasse 4 muss die Außenschicht eines Fassadensystems die Brandklasse A2 nach EN 13501 erfüllen. Für solche Gebäude wird ein Glasfaservlies als innenliegendes, vegetationstragendes Vlies und ein Glas-Basalt-Gestrick für die Außenschicht verwendet. Das Glasfaservlies und das Glas-Basalt-Gestrick dienen der Feuerbeständigkeit. Beide Produkte gelten als nicht brennbar [193] und sind somit für eine Verwendung bei Gebäuden ab Gebäudeklasse 4 geeignet. Ein Lösungsansatz, um auch hier mit biobasierten Vliesen zu arbeiten, wäre eine Behandlung der Vliese mit einem Flammschutzmittel. Eine weitere Möglichkeit, den CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks des Gesamtsystems zu verringern, wäre eine Umstellung auf den alleinigen Einsatz von Basaltfasern. Der Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Herstellung von Basaltfasern sind etwa um ein Drittel geringer und es werden weniger Arbeitsschritte benötigt [74], allerdings sind die Fasern etwa doppelt so teuer wie Glasfasern [170].

### 6.2.2.2 Tropfschläuche (PE)

Von dem Bewässerungssystem werden nur die Komponenten betrachtet, die in der Fassadenbegrünung verbaut sind. Dies betrifft nur die Tropfschläuche mit integrierten Tropfern und eventuell vorhandene Winkelstücke. All diese Bauteile bestehen aus PE. In ihnen ist permanent Wasser vorhanden, um die Pflanzen zu versorgen und die Vliese feucht zu halten. Auch Düngemittel wird, in Wasser gelöst, durch sie transportiert. Die meisten Pflanzen fühlen sich bei einem pH-Wert von 4,0 – 8,5 am wohlsten [104]. Auch wenn meist eine pH-neutrale Umgebung vorliegt, sollten die Schläuche also gegen schwache Säuren und Laugen beständig sein. Die trivialste Lösung für ein Ersatzprodukt wäre Bio-PE. Es gibt aber auch andere Alternativen. PA 11 beispielsweise ist bis zu 100% biobasiert und PE in vielen Eigenschaften ähnlich. Es wird unter anderem für Schläuche und Rohre eingesetzt. Zudem ist es laut Hersteller beständig gegen Säuren, Basen und Salze [162], was es als Ersatzmaterial durchaus in Frage kommen lässt.

### 6.2.2.3 Trägerplatte (Aluminium-Verbund)

Die Aluminium-Verbundplatten bilden den wandseitigen, dichten Abschluss des Systems, dienen gleichzeitig als stabiler Untergrund für die Vliestaschen und verteilen die Lasten des Systems auf die dahinter befindlichen vertikalen Trägerprofile. Bei den Verbundplatten handelt es sich um insgesamt 4 mm starke Sandwichplatten aus 0,5 mm dicken Aluminiumblechen und einem Kern aus einem polymeren Bindemittel und mineralischen Füllstoffen [1]. Die Brandklassifizierung gemäß EN 13501 wird laut Hersteller mit der Klasse A2-s1, d0 angegeben. Die Platten gelten somit als nicht brennbar. Eine detailliertere Beschreibung der Brandschutzklassen erfolgt in Abschnitt 7.2. Die einzelnen Verbundplatten werden mit einem speziellen Klebeband verbunden, um einen dichten Abschluss zur dahinter befindlichen Hinterlüftungsebene zu erreichen. Mit Edelstahl-Tackernadeln werden die Vliese an den Platten befestigt. Durch das Feuchthalten der Geotextilien sind auch die Verbundplatten ständig mit Wasser und Düngemittel in Kontakt und müssen in diesem Zustand beständig bleiben. Die Platten selbst haben ein Gewicht von 7,6 kg/m<sup>2</sup> [1], müssen jedoch das Gesamtgewicht des Systems von etwa 35 kg/m<sup>2</sup> auf die Unterkonstruktion ableiten und zählen daher zur tragenden Struktur. Möglicherweise würde sich eine Platte aus dem in Tab. 6.2 beschreibenden *Nabasco*-Material, eventuell mit einer zusätzlich wasserabweisenden Schicht, als Substitut eignen. Allerdings müsste in Versuchen gezeigt werden, dass die Tragfähigkeit ausreichend ist, die Platte durch die Dauerfeuchte nicht beschädigt wird und vor allem dass durch die Anbringung der Vliese mit Tackernadeln kein Wasser in das Material gelangt. Dies wäre zumindest für Gebäude bis Gebäudeklasse 3 möglich, für Gebäude der Gebäudeklassen 4 und 5 nur dann, wenn die Dämmschicht in der Brandschutzklasse A2 gemäß EN 13501 ausgeführt wird. Die Anforderungen an solche tragenden Bauteile eines Fassadenbegrünungssystems werden in Kapitel 7 *Anforderungen an eine tragende Struktur aus Biokunststoffen* detailliert besprochen.

### 6.2.2.4 Rahmen (Aluminium, Edelstahl)

Der Rahmen wird bei diesem System je nach Kundenwunsch aus Aluminium oder Edelstahl hergestellt. Er bildet den äußeren Abschluss des Systems. Im unteren Bereich wird der Rahmen gleichzeitig als Auffang- und Ablaufrinne verwendet. Er erfüllt daher keinen statischen Zweck. Er muss nur sein Eigengewicht tragen und überschüssiges Wasser ableiten. Er ist demnach immer wieder mit Wasser und Düngemittel in Kontakt. Außerdem ist er der Witterung und Sonneneinstrahlung ausgesetzt.

Der Rahmen muss auf jeden Fall die Brandschutzanforderungen der jeweiligen Gebäudeklasse erfüllen und muss mit den Pflanzen und anfallendem Wasser inklusive darin gelöstem Düngemittel verträglich sein. Zudem muss er gegenüber Umwelteinflüssen beständig bleiben und für die

Lebensdauer des Systems oder für eine angemessene Dauer stabil bleiben. Diese Punkte werden ab Abschnitt 7.2 *Brandschutzanforderungen* im Detail beschrieben. Auch die dort beschriebenen ökologischen und ökonomischen Anforderungen sowie die Anforderungen an die Verarbeitbarkeit betreffen den Rahmen ebenso wie die tragenden Elemente. Besondere Ansprüche an den Rahmen werden im Hinblick auf Optik, Haptik und Geruch gestellt, da er den äußeren Abschluss des Systems darstellt und von außen sichtbar ist. Als Ersatz wären ein naturfaserverstärktes duroplastisches Material oder im nicht wasserführenden Bereich ein acetyllierter Holzwerkstoff, wie die in Abschnitt 4.3.2.2 vorgestellten MDF-Platten, denkbar. Wie auch bei der Trägerplatte ist dies für Gebäude der Gebäudeklassen 4 und 5 jedoch nur dann möglich, wenn die Dämmschicht in A2 gemäß EN 13501 ausgeführt ist. Die Anforderungen an den Rahmen werden in Abschnitt 7.9 *Ästhetische und sonstige Ansprüche* noch eingehend beschrieben, da sie unter Umständen auch die tragende Struktur betreffen.

#### 6.2.2.5 Trägerelemente und Konsolen (Aluminium)

Als Trägerelemente dienen L- und T-förmige Aluminiumprofile, welche an ebenfalls aus Aluminium bestehende Konsolen geschraubt werden. Diese Konsolen bilden die Befestigungspunkte an der Wand und können als Fest- oder Gleitlager ausgeführt werden, wodurch ein zwängungsfreies System entsteht. Die Unterkonstruktion aus Trägerprofilen und Konsolen bildet die Hinterlüftungsebene der vorgehängten Fassade. Der minimale Abstand zur tragenden Wand beträgt 55 mm. Durch das Prinzip der hinterlüfteten Fassade ist die Unterkonstruktion im Hinterlüftungsraum vor Witterung geschützt. Anfallende Feuchtigkeit (z. B. Kondensat) wird durch die zirkulierende Luft rasch abtransportiert. Die Hauptanforderungen für die Komponenten der Unterkonstruktion sind die Tragfähigkeit über einen langen Zeitraum und im Brandfall. Hinzu kommen ökologische und ökonomische Anforderungen und Ansprüche an die Verarbeitbarkeit des Materials, während die Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse oder die Verträglichkeit mit Pflanzen, Substrat und Düngemitteln hier nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Auch für Gebäude mit Gebäudeklasse 5 mit sechs oder weniger Stockwerken sind stabförmige Unterkonstruktionen der Brandschutzklasse D nach EN 13501 erlaubt. Dieser Klasse sind Holz und die meisten Holzwerkstoffe zugeordnet. Es wäre daher eine Unterkonstruktion aus Holz oder auch aus WPC-Profilen möglich. Diese befinden sich je nach Kunststoffmatrix in Klasse D bis E gemäß EN 13501, allerdings kann die Feuerbeständigkeit mit Flammenschutzmitteln verbessert werden [71]. In Kapitel 7 werden die Anforderungen im Detail besprochen.

### 6.3 Troggebundene Begrünungssysteme

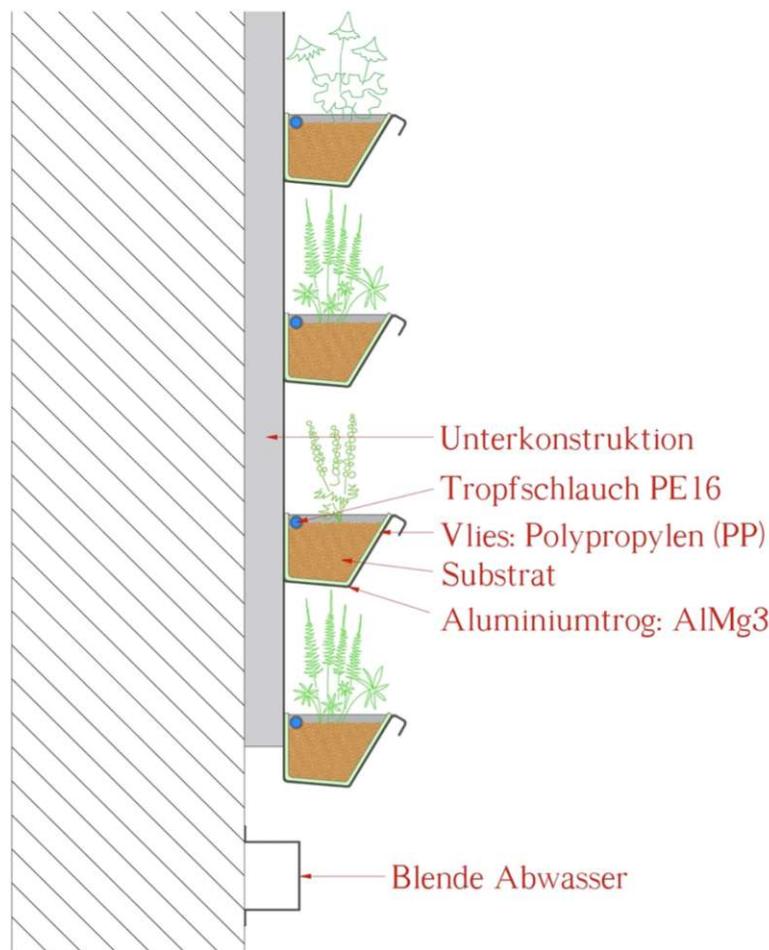
Das troggebundene Begrünungssystem könnte auch als Wiener Klassiker bezeichnet werden, da dieses System nicht nur in Wien entwickelt wurde, sondern auch einige prominente Gebäude der Stadt ziert und durch seine besondere Optik der horizontalen Tröge vor allem kurz nach der Bepflanzung oder einer Wartung auch von Laien gut erkennbar ist. Die bekanntesten Beispiele Wiens sind das MA48-Gebäude, das Haus des Meeres und seit 2020 die U-Bahn Station Spittelau. Die Begrünung des 48er-Hauses gilt mit einer begrünten Fläche von 850 m<sup>2</sup> als größte Fassadenbegrünung Österreichs und zum Zeitpunkt ihrer Erstellung sogar als größte Europas [196]. Im Folgenden wird das System *grünwand* der Firma Techmetall vorgestellt.

#### 6.3.1 Beschreibung System *grünwand*

Bei diesem System werden trogförmige Aluminiumprofile verwendet. Die Tröge haben eine Basislänge von 1,0 m, können aber bis zu einer Länge von 3,0 m hergestellt werden [178]. Die

Tröge können in beliebiger Länge nebeneinander gereiht werden. Für einen Meter Höhe werden vier Trogreihen übereinander montiert. Dadurch ergibt sich ein vollflächiges System mit horizontal verlaufenden Pflanztrögen. Die Tröge werden überlappend an den dahinter befindlichen, vertikal verlaufenden Hutprofilen aus Aluminium montiert, um eine vorgehängte hinterlüftete Fassade zu bilden. Bei einer Begrünung über mehrere Stockwerke hinweg wird die Hinterlüftung durch eine Reihe von Edelstahltrögen mit Brandschutzschürzen durchbrochen, um im Brandfall eine Weiterleitung über die Fassade hinweg zu verhindern.

Die Aluminiumtröge sind nach außen hin geschlitzt ausgeführt und werden mit einem Vlies aus Polypropylen ausgekleidet. Danach werden die Tröge mit einem Substrat aus Tonsplitt befüllt und die Pflanzen eingesetzt. Jeder Trog verfügt außerdem über einen Bewässerungsschlauch [54]. Das System kann sowohl indoor als auch outdoor eingesetzt werden.



**Abb. 6.3:** Trogsystem *grünwand*: Substratgefüllte Aluminiumtröge auf Aluminiumunterkonstruktion (Bildquelle: ©Pamminger [149])

### 6.3.2 Komponenten

Das System *grünwand* besteht, vereinfacht, aus vier Komponenten: den Aluminiumtrögen, den Bewässerungsschläuchen, dem Multifunktionsvlies und der Aluminiumunterkonstruktion. Diese werden nun genauer beschrieben, wobei die Bauteile aus Aluminium unter einem Punkt gesammelt betrachtet werden.

### 6.3.2.1 Tröge und Unterkonstruktion (Aluminium)

Die Tröge werden aus 2 mm starken Blechen einer AlMg<sub>3</sub>-Legierung gefertigt und können bis zu 3,0 m lang sein. Sie fassen etwa 24 l/m an Substrat und können bis zu 8 l/m an Wasser speichern. Als Substrat wird hauptsächlich recycelter Tonsplitt aus gebrochenen Dachziegeln verwendet. So ergibt sich ein Gewicht von etwa 37 kg/m [179]. Inklusive sämtlicher zusätzlicher Belastungen wie Schnee, Wind und das Gewicht der Unterkonstruktion ergibt sich eine Belastung auf die Wand von etwa 100 kg/m<sup>2</sup> [54]. Nach vorne hin verfügen die Tröge über Schlitze, um für eine bessere Wasserverteilung und -ableitung zu sorgen. In regelmäßigen Abständen eingehängte Edelstahlbügel verhindern allzu große Verformungen der Tröge [179]. Auf Kundenwunsch können die Tröge mit RAL Farben pulverbeschichtet werden. Als Brandabschottung werden Edelstahltröge der Güte V4 verwendet, welche nicht geschlitzt sind und eine Brandschutzschürze aufweisen. Diese Tröge besitzen eine Blechstärke von 1,5 mm.

Die Unterkonstruktion besteht aus vertikal verlaufenden Hutprofilen aus Aluminium. Sie leiten die Lasten in die Wand weiter und sorgen für eine Hinterlüftungsebene. Die tragende Struktur des Systems besteht somit nur aus Aluminium und Edelstahl. Daraus ergibt sich eine besonders feuerfeste und langlebige Konstruktion. Allerdings wäre, analog zu Abschnitt 6.2.2.5 *Trägerelemente und Konsolen (Aluminium)*, eine Unterkonstruktion aus Holz oder WPC-Profilen denkbar.

Die Anforderungen an die Tröge und die Unterkonstruktion werden in Kapitel 7 *Anforderungen an eine tragende Struktur aus Biokunststoffen* eingehender besprochen.

### 6.3.2.2 Tropfschläuche (PE)

Auch bei diesem System werden nur jene Komponenten der Bewässerungsanlage betrachtet, welche direkt in der Fassadenbegrünung verbaut sind. Die Bewässerung erfolgt über Tropfschläuche mit integrierten Tropfern, welche alle Trogreihen mit Wasser versorgt. Auch Dachwässer können zur Bewässerung verwendet werden [179]. Die Wassermenge wird über eine automatische Bewässerungsanlage in Abhängigkeit der Bedürfnisse der Pflanzen eingestellt. Da diese Elemente ebenfalls aus PE bestehen, gilt für sie die gleiche Überlegung, wie für die Tropfschläuche vom Geotextilsystem (siehe Kapitel 6.2.2.2). Für diese Bauteile würden sich biobasiertes PE oder PA 11 als Substitutionsmaterial eignen.

### 6.3.2.3 Multifunktionsvlies (PP)

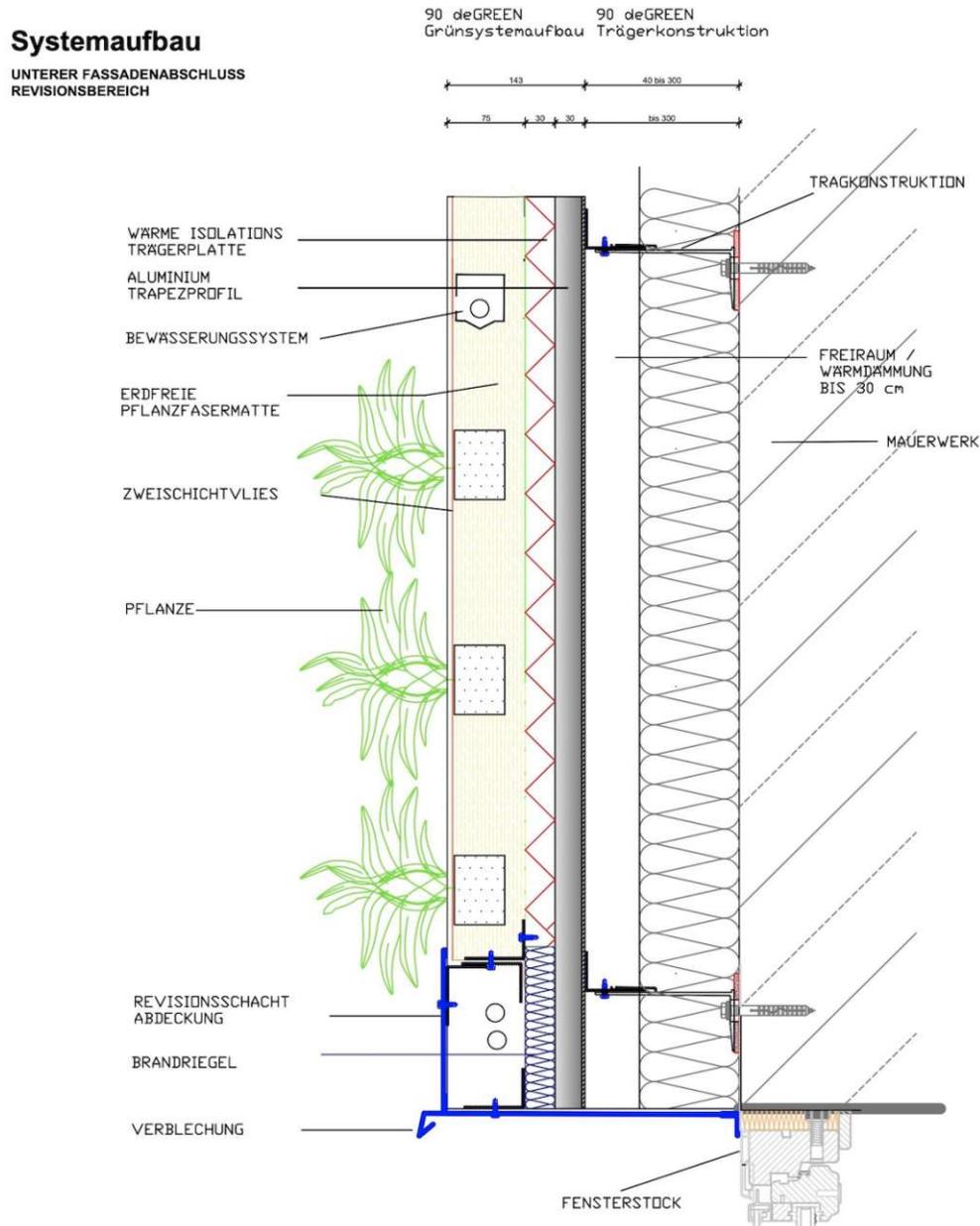
Das Vlies aus PP, mit welchem die Tröge ausgekleidet werden, erfüllt mehrere Aufgaben. Zum einen verhindert es als Filtervlies die Auswaschung von Feinteilen des Substrats durch die Öffnungsschlitze der Tröge, zum anderen dient es als Speichervlies und sorgt für eine gleichmäßige Verteilung des aufgenommenen Wassers. Auch bei dieser Fassadenbegrünung müssen die Vliese dauerhaft beständig bleiben, da ihre intakte Funktion für einen reibungslosen Betrieb des Systems essentiell ist. Als biobasierter Ersatz wären auch hier Bio-PP, Bio-PE, Bio-PET oder mit Zusätzen haltbar gemachtes PLA denkbar.

## 6.4 Mattensysteme

Der Aufbau eines Mattensystems wird anhand des Systems *90deGreen* der gleichnamigen Wiener Firma vorgestellt. Auch bei diesem System handelt es sich um eine vollflächige Begrünung und es kann daher flexibel an die Geometrie der zu begrünenden Wand angepasst werden. Ein ähnlicher Aufbau wird auch gerne bei Modul-Systemen verwendet [80], wo die einzelnen Schichten in meist

quadratischen Kassetten aus Aluminium oder Kunststoff sitzen und die vorkultivierten Module an der Wand befestigt werden.

### 6.4.1 Beschreibung System *90deGreen*



**Abb. 6.4:** Mattensystem *90deGreen*: mit Pflanzfasermatte aus Steinwolle (Bildquelle: ©90deGreen GmbH [3])

Bei diesem System, welches ohne Substrat auskommt, sitzen die Pflanzen in einem 90°-Winkel zur Vertikalen in einer speziellen Fasermatte aus Steinwolle. Nach vorne hin werden die Pflanzen mit Hilfe eines Zweischiechtvlieses aus PP am Herausfallen gehindert. Auf der Rückseite der Fasermatte ist eine Trennschicht aus einem PP-Bodengewebe angeordnet. Dahinter liegt eine Wärmedämmplatte aus EPS (expandiertem Polystyrol) [103]. Als Aufnahme für die Unterkon-

struktions- und wandseitiger Abschluss wird ein Trapezblech aus Aluminium verwendet. Die Unterkonstruktion besteht aus speziellen Aluminiumprofilen. Bei Bedarf kann eine Wärmedämmung von bis zu 30 cm Stärke in den Freiraum der Unterkonstruktion integriert werden. Die Tropfschläuche aus PE verlaufen in einem eigens angefertigten Aluminium-Lochblech. Dieses dient als Halterung für die Tropfschläuche und ermöglicht im Falle einer Fehlfunktion einen leichten Austausch.

Das System selbst besitzt eine Dicke von etwa 14 cm. Inklusive der Hinterlüftungsebene ergibt sich eine Gesamtstärke von etwa 19 cm ab der tragenden Wand. Inklusive aller auftretenden Lasten ist die dahinterliegende Wand auf eine Traglast von  $110 \text{ kg/m}^2$  zu bemessen.

Für die Gebäudeklassen 4 und 5 (siehe Abschnitt 7.2) ist auch eine Ausführung mit Brandriegel, wie in Abb. 6.4 ersichtlich, möglich.

## 6.4.2 Komponenten

In den folgenden Abschnitten werden die Einzelteile des Regelquerschnitts getrennt von einander betrachtet und Substitutionsmöglichkeiten erläutert.

### 6.4.2.1 Zweischichtvlies und Trennschicht (PP)

Das Zweischichtvlies aus UV-stabilisierten Polypropylen [180] bildet den außenseitigen Abschluss des Systems und verhindert einen Wasseraustritt nach außen.

Ein Bodengewebe aus PP funktioniert als Trennschicht zwischen der Steinwollematte und der dahinterliegenden EPS-Platte. Es verteilt nicht nur das Wasser im Bereich der Wurzeln, sondern sorgt dafür, dass sich die Pflanzen an der Trägerplatte anwurzeln können.

Analog zu den Vliesen der anderen Begrünungssysteme würden sich als biobasierter Ersatz für diese beiden Geotextilien Drop-In-Werkstoffe wie Bio-PP, Bio-PE und Bio-PET eignen. Auch ein bezüglich der Dauerhaftigkeit verbessertes PLA würde als Ersatzstoff in Frage kommen.

### 6.4.2.2 Pflanzfasermatte (Steinwolle)

Beim System *90deGreen* sitzen die Pflanzen ohne Erde in einer festen Matte aus Steinwolle. Sie sorgt nicht nur für eine Verteilung von Wasser und des darin gelösten Düngemittels, sondern speichert es auch. Zudem gibt es den Pflanzen genug Raum für ihre Wurzeln und hält sie an ihrem Platz. Im Laufe der Jahre verwächst sie mit den Wurzeln. Durch ihre Struktur ist jedoch ein kleinflächiger Austausch möglich, falls dies, beispielsweise im Fall von abgestorbenen Pflanzen, erforderlich sein sollte.

Die Fasermatte muss den Wurzeln Raum geben, aber auch formstabil bleiben und darf nicht in sich zusammensacken. Durch ihren ständigen Kontakt mit Wasser, Düngemittel und den Pflanzen darf sie diese nicht schädigen und darf auch selbst nicht vom Düngemittel angegriffen werden. Zudem muss sie beständig gegenüber Schimmel sowie Insekten- und Pilzbefall sein. Mit den eben besprochenen Anforderungen ist ein Ersatz durch eine Fasermatte aus nachwachsenden Rohstoffen praktisch ausgeschlossen. Schon den den 1970er Jahren forschte Patrick Blanc, der als Erfinder der vertikalen Gärten gilt, mit Systemen aus Kokosfasern oder Baumwolle-Putzlappen, die sich jedoch nicht als dauerhaft genug erwiesen [15]. Auch neuere Versuche mit Hanffasermatten bestätigten die unzureichende Dauerhaftigkeit [59].

Ein großer Vorteil von Steinwolle ist, dass sie mit einem Schmelzpunkt von über  $1000^\circ\text{C}$  zu den nicht brennbaren Baustoffen (Brandschutzklasse A1 gemäß EN 13501) zählt [87]. Sie ist daher bei allen Gebäudeklassen anwendbar. Sie zählt zu den natürlichen, mineralischen Fasern. Ein Ersatz durch einen Biokunststoff ergibt daher, zumindest für Gebäude ab Gebäudeklasse 4, wenig Sinn. Für Gebäude der Gebäudeklassen 1 bis 3 könnte die Steinwolle jedoch durch einen

biobasierten Schaumstoff ersetzen. Wie bereits in Abschnitt 3.3.4 *Kunststoffe* beschrieben, wendet die Firma Vertical Green bereits erfolgreich einen Schaumstoff in einem Mattenbegrünungssystem an. Tatsächlich gibt es schon biobasierte PUR-Weichschaummatten zu kaufen. Bei diesen wird der Polyol-Anteil des Polyurethans aus Rizinusöl hergestellt, allerdings liegt der erreichbare biogene Anteil derzeit noch bei etwa 26 % [147]. Auch CO<sub>2</sub> kann zur Polyol-Herstellung für Schaumstoffe verwendet werden. Dabei wird CO<sub>2</sub>, welches als Nebenprodukt bei chemischen Prozessen entsteht, abgesondert und anstelle fossiler Rohstoffe für die Polyol-Produktion genutzt. Jedoch liegt hier der nachhaltige Anteil nur bei 13 % [148]. Ob diese Schaumstoffe tatsächlich die Anforderungen erfüllen, müsste jedoch empirisch festgestellt werden.

### 6.4.2.3 Wärmedämmplatte (EPS)

Die Platte aus expandiertem Polystyrol dient einerseits als Trägerplatte und Aufnahme für das den Abschluss bildende Trapezblech und andererseits als Wärmedämmung für die Pflanzen sowie Haftgrund für die Wurzeln. Durch diesen besonderen Aufbau eignet sich das System besonders für Aufstellungsorte in kälteren Regionen, da die Pflanzenwurzeln auch bei langen, frostigen Wintern gut geschützt sind. Gleichzeitig erhöht sich durch den Aufbau die schalldämmende Wirkung des Systems [102]. Eine mögliche biobasierte Alternative wäre *BioFoam*<sup>®</sup>, ein auf PLA basierender, mit EPS vergleichbarer Hartschaum [25]. Dieser ist unempfindlich gegenüber Feuchtigkeit, beständig gegen Schimmel und nur „bei hohen Temperaturen unter der Einwirkung von Feuchtigkeit und Bakterien industriell kompostierbar“ [105].

Die vorhandene Komponente soll nun mit dem möglichen Substitut verglichen werden, um eine Eignung aus ökologischer Sicht betrachten zu können. Dazu sollen die Werte aus den jeweiligen Lebenszyklusanalysen auf eine drei Zentimeter starke Platte mit einer Fläche von einem Quadratmeter umgerechnet werden. Die Daten für die PLA-Platte stammen von der LCA aus Abschnitt 5.3.1.1, während die Daten für die EPS-Platte vom *baubook-Rechner* [160] stammen.

**Tab. 6.3:** Produktvergleich einer EPS-Platte [160] und einer PLA-Hartschaumplatte [118]

Kategorie	Einheit	Wert PLA	Wert EPS
Raumgewicht	kg/m <sup>3</sup>	35	15,8
Gewicht 3 cm Platte	kg/m <sup>2</sup>	1,05	0,474
Treibhauspotential (GWP)	kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	0,526 (2,451 <sup>(a)</sup> )	1,996
Erschöpfung der Wasserressource (WS)	m <sup>3</sup> Wasser-Äqv.	3,79·10 <sup>-2</sup>	k.A. <sup>(b)</sup>
Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)	kg CFC <sub>11</sub> -Äqv.	k.A. <sup>(b)</sup>	6,257·10 <sup>-8</sup>
Bildungspotential für troposphärisches Ozon (POCP)	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äqv.	k.A. <sup>(b)</sup>	4,332 <sup>(3)</sup>
Meereseutrophierung (EP)	kg N-Äqv.	1,397·10 <sup>-2</sup>	k.A. <sup>(b)</sup>
Terrestrische Eutrophierung (EP)	mol N-Äqv.	3,549·10 <sup>-2</sup>	k.A. <sup>(b)</sup>
Eutrophierungspotential (EP)	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -Äqv.	k.A. <sup>(b)</sup>	1,237·10 <sup>-3</sup>
Versauerung (AP)	mol H <sup>+</sup> -Äqv.	1,911·10 <sup>-2</sup>	8,695·10 <sup>-3</sup> <sup>(c)</sup>
Versauerung (AP)	kg SO <sub>2</sub> -Äqv.	1,552·10 <sup>-2</sup> <sup>(c)</sup>	7,063·10 <sup>-3</sup>
Feinstaub (PM)	kg PM <sub>2,5</sub> -Äqv.	1,827·10 <sup>-3</sup>	k.A. <sup>(b)</sup>
Landnutzung (LU)	kg C-Defizit	18,31	k.A. <sup>(b)</sup>
Nutzung erneuerbarer Energien (REU)	MJ	63,42	0,46
Nutzung nicht erneuerbarer Energien (NREU)	MJ	30,24	46,88

**Anmerkung:**

<sup>(a)</sup> ohne Gegenrechnung des von den Pflanzen aufgenommenen CO<sub>2</sub>

<sup>(b)</sup> keine Angabe für den jeweiligen Baustoff

<sup>(c)</sup> berechnet mit Umrechnungsfaktoren nach Dong et al. [57]

Das ernüchternde Ergebnis des Vergleichs zeigt, dass sich die beiden Produkte ökologisch betrachtet nur schlecht vergleichen lassen. Bis auf Treibhauspotential und Energienutzung lassen die Daten keinen Vergleich zu, da zum einen Teil unterschiedliche Umweltauswirkungen untersucht wurden und zum anderen Teil ökologische Effekte in verschiedenen Einheiten angegeben wurden. So enthalten die gegebenen Daten für EPS keine Angaben zu der Erschöpfung der Wasserressource (WS), der Feinstaubbildung (PM) und der Landnutzung (LU), wohingegen in der verwendeten LCA zu PLA die Auswirkungen auf Ozonbildungs- und -abbaupotential in Stratosphäre und Troposphäre nicht untersucht wurden. Zudem wurden Versauerungs- und Eutrophierungspotential in verschiedenen Einheiten angegeben, was einen einfachen und schnellen Vergleich verhindert. Während sich die Werte der Versauerung mittels Umrechnungsfaktoren nach Dong et al. [57] in die jeweils andere Einheit konvertieren lassen, ist eine Umrechnung bei der Eutrophierung nicht so einfach möglich. Dies hat mehrere Gründe: die Ökobilanz zu PLA wurde nach der Methode des EF (Environmental Footprint, dt. ökologischer Fußabdruck) erstellt. Diese Methode gliedert die Eutrophierung in ihre Auswirkungen auf Süßwasser, Meer und Land und verwendet dafür jeweils unterschiedliche Einheiten (Süßwasser: kg P-Äqv.; Meer: kg N-Äqv.; Land: mol N-Äqv.) [57]. Währenddessen wurde die Lebenszyklusanalyse zu EPS nach den Richtlinien der EPD (Environmental Product Declarations, dt. Ökologische Produktdeklarationen) erstellt [83]. Diese gibt das Eutrophierungspotential für Wasser und Boden gesammelt in kg  $\text{PO}_4^{3-}$ -Äqv. an. Es ist hier zum einen keine Rückaufspaltung in Auswirkungen auf Süß- und Meereswasser sowie Boden möglich, zum anderen betrifft der von Dong et al. [57] entwickelte Umrechnungsfaktor für die Eutrophierung nur die Süßwasser-Eutrophierung.

Ohne Berücksichtigung des von den Pflanzen aufgenommenen  $\text{CO}_2$  verfügt die EPS-Platte aufgrund ihrer geringeren Dichte über ein niedrigeres Treibhauspotential als die PLA-Platte. Allerdings benötigt die EPS-Platte eine größere Menge an nicht erneuerbaren Energien, was zu etwa 40 % auf den fossilen Rohstoff zurückzuführen ist [160]. Außerdem lässt sich feststellen, dass die PLA-Platte eine mehr als zwei mal so starke Versauerung mit sich bringt, als die EPS-Platte.

Die Lücken in der Vergleichbarkeit zeigen die Schwächen der Ökobilanzierungen auf. Derzeit gibt es (noch) keine normativen Standards, die vorgeben, welche Wirkungskategorien zu berücksichtigen sind oder wie und in welchem Umfang diese zu bewerten sind [202]. Eine Vergleichbarkeit ist daher nur dann gegeben, wenn die gleichen Berechnungsmethoden angewendet und die selben Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Es muss daher zuerst die Erstellung von Lebenszyklusanalysen geregelt werden, bevor ein solcher Produktvergleich tatsächlich sinnvoll möglich ist.

#### 6.4.2.4 Lochblechprofil (Aluminium)

Die Bewässerungsschläuche sitzen in einem speziellen Bauteil aus einem Aluminium-Lochblech, welches in regelmäßigen, vertikalen Abständen durch die Pflanzfaserplatte führt. Es sorgt dafür, dass die Tropfschläuche an ihrem Platz bleiben und dass ein Austausch jederzeit möglich ist. Das Bauteil muss keine statischen Funktionen erfüllen. Es muss allerdings so druckfest sein, dass es dem Gewicht der darüber liegenden Reihen des Systems widerstehen kann. Mögliche biobasierte Alternativen wären Rohre aus Bio-PE und Bio-PP, welche dann allerdings im Nachhinein recht aufwändig mit Löchern oder Schlitzen versehen werden müssten.

#### 6.4.2.5 Tropfschläuche (PE)

Das Bewässerungssystem mitsamt allen Zuleitungen wird in von außen nicht sichtbaren Revisionschächten untergebracht. Die Bewässerung und Düngemittelzufuhr wird automatisch temperatur- und bedarfsabhängig gesteuert. Eine Fernüberwachung und Fernsteuerung ist möglich.

Auch bei diesem System bestehen die Tropfschläuche samt Tropfern aus PE, welches am häufigsten für solche Bauteile eingesetzt wird. Da die Tropfschläuche in den oben beschriebenen Lochprofilen sitzen und unproblematisch ausgetauscht werden können, wären hier neben Bio-PE und Bio-PP theoretisch auch weniger dauerhafte Materialien wie PLA oder PHA möglich. Allerdings ist es zweifelhaft, ob sich ein regelmäßiger Austausch ökologisch und ökonomisch rechnen würde.

#### 6.4.2.6 Rahmen (Aluminium)

Den außenseitigen Abschluss dieses Systems bildet ein Rahmen aus Aluminiumprofilen. Er erfüllt keine statische Funktion, ist aber der Witterung ausgesetzt und sollte daher gegenüber UV-Strahlung, Regen, Schnee und Temperaturschwankungen beständig bleiben. Ähnlich zum Geotextilsystem muss der Rahmen mitunter die selben Anforderungen erfüllen wie die tragenden Bauteile, weshalb diese hier kurz aufgezählt und in Kapitel 7 genauer betrachtet werden. Analog wären auch hier, zumindest für die Gebäudeklassen 1 bis 3, ein naturfaserverstärkter Duroplast, wie das in Tab. 6.2 vorgestellte *Nabasco*-Material, oder eine acetylierte MDF-Platte gemäß Abschnitt 4.3.2.2 denkbar. Für Gebäude der Gebäudeklassen 4 und 5 müsste bei dieser Ausführung die dahinterliegende Dämmung aus einem mit Brandschutzklasse A2 (gemäß EN 13501) klassifizierten Dämmstoff hergestellt werden. Die tatsächliche Eignung der vorgeschlagenen Materialien müsste separat geprüft werden.

Der Rahmen muss also die Brandschutzanforderungen der jeweiligen Gebäudeklasse erfüllen, eine Verträglichkeit mit Pflanzen und in Wasser gelöstem Düngemittel vorweisen und gegen Umwelteinflüsse während der Lebensdauer des Systems oder für eine angemessene Dauer beständig bleiben. Zudem ist es unerlässlich, dass ein biobasiertes Substitutionsmaterial auch wirklich ökologisch sinnvoller als der zu ersetzende Werkstoff ist. Ein guter Preis ist zudem wünschenswert, da sonst die Verkaufschancen für das Produkt sinken. Auch die optischen Ansprüche sind hier besonders wichtig. Der Werkstoff sollte hochwertig wirken, sich gut anfühlen und keinen strengen Plastikgeruch emittieren.

#### 6.4.2.7 Trapezblech und Unterkonstruktion (Aluminium)

Das Trapezblech dient als Aufnahme der Konstruktion und leitet die Lasten an die Unterkonstruktion ab. Als wandseitiger Abschluss sorgt es zudem für eine dichte Hinterlüftungsebene und schützt die Unterkonstruktion vor Wasserzutritt. Das Trapezblech ließe sich ebenfalls durch die oben genannten Materialien ersetzen, wobei auch hier bei höheren Gebäudeklassen eine entsprechende Dämmung ausgewählt werden müsste. Zudem könnte die Unterkonstruktion in Analogie zu Abschnitt 6.2.2.5 *Trägerelemente und Konsolen (Aluminium)* aus Holz oder WPC-Profilen hergestellt werden.

Bei diesen Bauteilen stehen die Anforderungen an die Tragfähigkeit, den Brandschutz und die Dauerhaftigkeit sowie an die Ökologie, Ökonomie und Verarbeitbarkeit im Vordergrund. Diese werden in den nachfolgenden Abschnitten genauer betrachtet.

# 7 Anforderungen an eine tragende Struktur aus Biokunststoffen

Soll die Tragstruktur eines vertikalen Begrünungssystems aus einem biobasierten Kunststoff hergestellt werden, so hat dieser einige Anforderungen zu erfüllen, welche in den nächsten Kapiteln besprochen werden. Zusätzlich wird bei den Anforderungen darauf eingegangen, ob diese obligatorisch oder wichtig sind oder wünschenswerte Zusatzeigenschaften darstellen. Am Ende des Kapitels erfolgt eine tabellarische Zusammenfassung der Anforderungen (siehe Tab. 7.3).

## 7.1 Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit

Die diversen Begrünungssysteme bestehen aus verschiedenartigen Aufbauten und sind somit unterschiedlich schwer. Während ein Rankgitter für ein bodengebundenes System neben seinem Eigengewicht nur das Gewicht der Kletterpflanze tragen muss, können auf fassadengebundene Systeme durch Wassersättigung, Schnee, Wind und Eis Lasten von bis zu  $110 \text{ kg/m}^2$  wirken, weshalb die Dimensionierung der Bauteile überprüft werden muss. Das kann dazu führen, dass einige Komponenten in ihrer Form verändert werden müssten, um die Vorteile des Materialverhaltens von faserverstärkten Kunststoffen besser auszunutzen und die Nachteile zu minimieren. Denn wie bereits auf Seite 44 beschrieben, besitzen Bioverbundwerkstoffe unter Zug- und Biegespannung höhere Steifigkeits- und Festigkeitswerte als unter Druck und das Kriechverhalten muss noch verbessert werden. Die Bauteile sollten dahin gehend optimiert werden, dass der Materialverbrauch und das Gewicht minimiert werden, während die Tragfähigkeit maximiert wird. Zusätzlich muss im Sinne der Gebrauchstauglichkeit darauf geachtet werden, dass die Verformungen des Systems, vor allem unter Langzeitbelastung, nicht zu groß werden. Denn zum einen werden mit freiem Auge sichtbare Durchbiegungen als „nicht schön“ empfunden, zum anderen können zu große Verformungen auch die Nutzung beeinträchtigen, beispielsweise wenn sie in einen Fenster- oder Türdurchbruch hineinhängen. Ein anderes Problem, welches sich durch unregelmäßige oder zu große Durchbiegungen ergeben könnte, ist, dass sich an einigen Stellen Wasser ansammeln und der Abfluss gehindert werden könnte, was wiederum zu wachsenden Verformungen führen würde. Zudem ist sicherzustellen, dass die Konstruktion und auch das Material so konzipiert werden, dass Schraubverbindungen nicht ausbrechen können. Denn dies könnte beispielsweise dazu führen, dass die Konstruktion im Wind flattert und unangenehme Geräusche produziert. Auch Risse, die die Tragfähigkeit nicht beeinträchtigen, könnten die Gebrauchstauglichkeit insofern beeinflussen, dass Wasser ins Material eindringen könnte, was zu Eisabsprengungen bei einem Frost-Tau-Wechsel führen könnte. Für diese Anforderungen der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit ist es wichtig, den verwendeten Werkstoff gut zu kennen. Es sind also viele experimentelle Versuche notwendig, um das Materialverhalten zu verstehen und zu optimieren. Für tragende Bauteile kommen nur faserverstärkte Kunststoffe in Betracht. Nach Auswahl einer geeigneten Verstärkungsfasers (siehe auch Kapitel 7.6 *Ökologische Anforderungen*) müssen die Chargen auf gleichbleibende Qualität überwacht werden.

Die Anforderungen an die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit sind in jedem Fall einzuhalten.

## 7.2 Brandschutzanforderungen

Im Großen und Ganzen kann man Fassadenbrände nach drei Ursachen kategorisieren. Zum einen kann ein Brand eines benachbarten Gebäudes durch Funkenflug oder Wärmestrahlung auf die Fassade eines Gebäudes übergehen, zum anderen kann ein Brand vor der Fassade einen Fassadenbrand herbei führen und zuletzt kann ein Brand innerhalb des Gebäudes durch Fensteröffnungen die Fassade in Brand stecken, wobei das zuletzt aufgezählte Szenario das kritischste ist [204].

Die *OIB-Richtlinie 2* [144] besagt bezüglich der Brandschutzanforderungen Folgendes:

„Bei Gebäuden der Gebäudeklasse 4 und 5 sind vorgehängte hinterlüftete, belüftete oder nicht hinterlüftete Fassaden so auszuführen, dass bezogen auf das zweite über dem Brandherd liegende Geschöß

- a) eine Brandweiterleitung über die Fassade und
  - b) das Herabfallen großer Fassadenteile
- wirksam eingeschränkt wird.“

Wie soeben zitiert und in der nachfolgenden Tabelle Tab. 7.2 ersichtlich, sind die Brandschutzanforderungen von der Gebäudeklasse (GK) abhängig. In Österreich werden Gebäude mit einem Fluchtniveau von weniger als 22 m in fünf Gebäudeklassen unterteilt. Der Begriff Fluchtniveau beschreibt die „Höhendifferenz zwischen der Fußbodenoberkante des höchstgelegenen oberirdischen Geschößes und der an das Gebäude angrenzenden Geländeoberkante nach Fertigstellung im Mittel“ [146]. Die Brandschutzanforderungen an Gebäude der Gebäudeklassen 1 bis 5 werden in der *OIB-Richtlinie 2* [144] geregelt. Für Gebäude mit einem Fluchtniveau von mehr als 22 m werden die Bestimmungen gesondert in der *OIB-Richtlinie 2.3* [145] festgelegt. Fassadenbegrünungssysteme werden in den OIB-Richtlinien nicht explizit erwähnt, sind jedoch aufgrund ihres Aufbaus den vorgehängten hinterlüfteten Fassaden zuzuordnen.

Die Einteilung in die Gebäudeklassen erfolgt nach Tabelle 7.1. Die maximale Bruttogrundfläche (BGF) bezieht sich nur auf die oberirdischen Geschöße.

**Tab. 7.1:** Einteilung Gebäudeklassen [146]

GK	Eigenschaft	Obergeschoße	Fluchtniveau	BGF	Einheiten
GK1	freistehend, an mind. drei Seiten auf eigenem Grund oder von Verkehrsflächen zur Brandbekämpfung von außen zugänglich	≤ 3	≤ 7 m	≤ 400 m <sup>2</sup>	≤ 2
GK2					
a)	-	≤ 3	≤ 7 m	≤ 400 m <sup>2</sup>	-
b)	Reihenhäuser	≤ 3	≤ 7 m	≤ 400 m <sup>2</sup> je Einheit	-
c)	freistehend, an mind. drei Seiten auf eigenem Grund oder von Verkehrsflächen zur Brandbekämpfung von außen zugänglich	≤ 3	≤ 7 m	≤ 800 m <sup>2</sup>	-
GK3	nicht GK1 oder GK2	≤ 3	≤ 7 m	-	-
GK4					
a)	-	≤ 4	≤ 11 m	≤ 400m <sup>2</sup> je Einheit	> 1
b)	-	≤ 4	≤ 11 m	ohne Begrenzung	1
GK 5	nicht GK1, GK2, GK3 oder GK4	-	≤ 22 m	-	-

Gemäß den zugehörigen Erläuterungen [143] werden die Anforderungen „jedenfalls erfüllt, wenn ein positiver Prüfbericht einer hierfür akkreditierten Prüfstelle gemäß *ÖNORM B 3800-5*

„Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 5: Brandverhalten von Fassaden - Anforderungen, Prüfungen und Beurteilungen“ vorliegt. Für Gebäude der Gebäudeklassen 1 bis 3 müssen für Fassaden somit nur die Anforderungen an das Brandverhalten gemäß Tabelle 1a der *OIB-Richtlinie 2* [in dieser Arbeit Tab. 7.2, Anm.] eingehalten werden.“

Zudem gelten die Anforderungen für die Gebäudeklassen 4 und 5 als erfüllt, wenn die Dämmschicht bzw. Wärmedämmung sowie sonstige Schichten inklusive der Außenschicht in A2 gefertigt werden, die Befestigungsmittel einen Schmelzpunkt von mindestens 1000°C aufweisen und eine eventuell vorhandene Hinterlüftungsebene nicht stärker als 6 cm ist. Bei freistehenden Gebäuden der Gebäudeklasse 4, welche „an mindestens drei Seiten auf eigenem Grund oder von Verkehrsflächen für die Brandbekämpfung von außen“ [144] erreichbar sind, darf die Außenschicht zudem auch in B oder aus Holz bzw. Holzwerkstoffen der Klasse D gefertigt werden.

Um eine Brandweiterleitung auf das zweite über dem Brandherd liegende Geschoß zu verhindern, kann auch eine „Brandschutzabschottung aus einem durchgehenden Profil aus Stahlblech (Mindestdicke 1 mm) oder brandschutztechnisch Gleichwertigem, das mindestens 20 cm auskragt“ [143], zwischen den Geschoßen ausgeführt werden.

Die Bestimmungen laut [144] und [145] sind in Tabelle 7.2 zusammengefasst.

**Tab. 7.2:** Allgemeine Anforderungen an das Brandverhalten für vorgehängte hinterlüftete, belüftete oder nicht hinterlüftete Fassadensysteme

Gebäudeklassen	GK1	GK2	GK3	GK4	GK5	Fluchtniveau > 22 m
Gesamtsystem <i>oder</i>	E	D-d1	D-d1	B-d1 <sup>(1)</sup>	B-d1 <sup>(1)</sup>	A2-d1
Einzelkomponenten:						
- Außenschicht	E	D	D	A2-d1 <sup>(2)</sup>	A2-d1 <sup>(2)</sup>	A2-d1
- Unterkonstruktion stab- / punktförmig	E / E	D / D	D / A2	D / A2	D(C) <sup>(3)</sup> / A2	A2 / A2
- Dämmschicht	E	D	D	B <sup>(2)</sup>	B <sup>(2)</sup>	A2

**Anmerkungen:**

<sup>(1)</sup> Bei GK4 und GK5 mit sechs oder weniger oberirdischen Geschoßen sind auch Holz und Holzwerkstoffe in D zulässig, wenn das Gesamtsystem die Klasse D-d0 erfüllt;

<sup>(2)</sup> Bei GK4 und GK5 mit sechs oder weniger oberirdischen Geschoßen ist bei einer Dämmschicht in A2 eine Außenschicht in B-d1 oder aus Holz und Holzwerkstoffen in D zulässig; bei GK5 mit mehr als sechs oberirdischen Geschoßen ist bei einer Dämmschicht in A2 eine Außenschicht in B-d1 zulässig;

<sup>(3)</sup> Bei GK5 mit sechs oder weniger Geschoßen ist eine stabförmige Unterkonstruktion in D zulässig; bei GK5 mit mehr als sechs Geschoßen ist eine stabförmige Unterkonstruktion in C zulässig.

Die in Tab. 7.2 angegebenen Klassenwerte entsprechen Mindestwerten. Die Baustoffe werden nach *ÖNORM EN 13501-1:2020-01-15* [139] in Brennbarkeitsklassen, auch Brandschutzklassen oder Euroklassen genannt, nach folgender Klassifizierung eingeteilt [36].

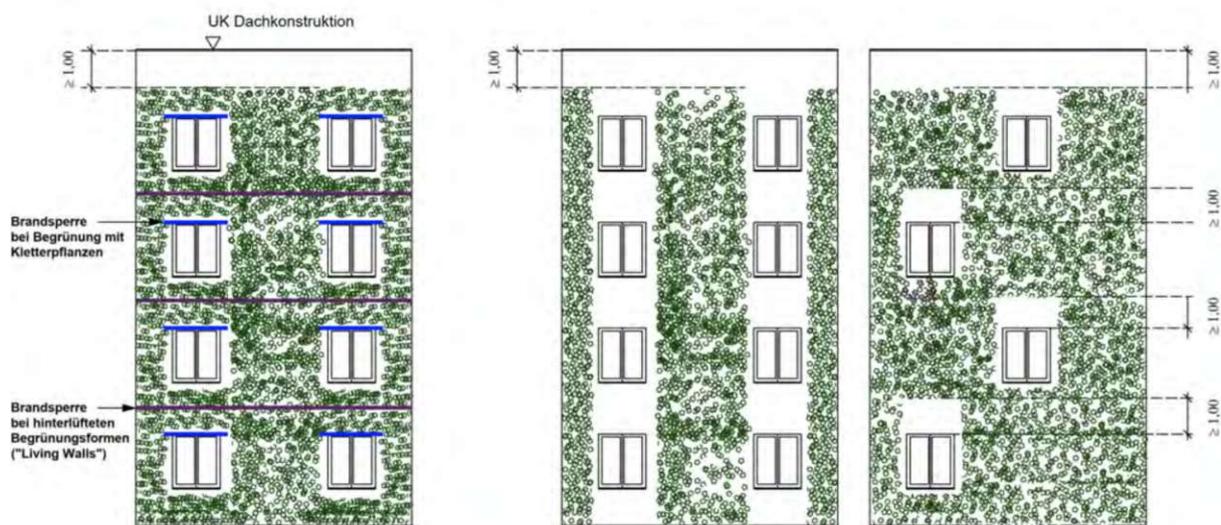
- **A1** kein Beitrag zum Brand (ohne brennbare Bestandteile)
- **A2** kein Beitrag zum Brand (geringe Anteile von brennbaren Stoffen)
- **B** sehr begrenzter Beitrag zum Brand
- **C** begrenzter Beitrag zum Brand
- **D** hinnehmbarer Beitrag zum Brand
- **E** hinnehmbares Brandverhalten
- **F** keine Leistung (im Hinblick auf Flammwidrigkeit) feststellbar

Bezüglich der Qualm- und Tropfenbildung sind folgende Einteilungen möglich [139], wobei die Abkürzungen von den englischen Begriffen *smoke* (= Qualm, Rauch) und *droplets* (= Tropfen) abgeleitet sind.

- **s1** schwach qualmend
- **s2** normal qualmend
- **s3** stark qualmend
- **d0** kein brennendes Abtropfen oder Abfallen
- **d1** kein brennendes Abtropfen/Abfallen während max. 10 s bei einer Testdauer von 10 min
- **d2** brennendes Abtropfen/Abfallen länger als 10 s bei einer Testdauer von 10 min

Die Anforderungen laut Tabelle 7.2 sind auf jeden Fall einzuhalten. Bei der Entwicklung eines Biokunststoffes für tragende Teile von Fassadenbegrünungssystemen ist daher besonders zu bedenken, wie diese Bestimmungen erfüllt werden können. Je nachdem, für welche Gebäudeklasse das Begrünungssystem geplant wird, können unter Umständen verschiedene Maßnahmen notwendig sein. In einer Studie stellte die Wiener Magistratsabteilung 39 [204] im Jahr 2018 fest, dass es in Europa bisher kaum großflächige Branduntersuchungen zu Fassadenbegrünungssystemen gibt. Aufgrund der großen Varietät fassadengebundener Begrünungssysteme wurden in den daraufhin durchgeführten großmaßstäblichen Versuchen hauptsächlich bodengebundene Systeme (selbstklimmende Pflanzen und Gerüstkletterpflanzen) betrachtet. Diese und eine weitere Studie im Rahmen einer Masterarbeit an der Technischen Universität München aus dem Jahr 2019 [62] kommen zu dem Schluss, dass eine Begrünung den Brand zwar horizontal nicht weiterleitet, aber sehr wohl eine Brandweiterleitung nach oben hin möglich ist. Erst ab einem Abstand der Begrünung von 1,0 m über dem Fenstersturz konnte keine vertikale Brandweiterleitung mehr festgestellt werden [204]. 2020 wurde eine weitere Studie von der MA 39 durchgeführt, bei der die Funktion eines 20 cm über den äußersten Punkt der Begrünung auskragenden Stahlblechs mit mindestens 1,0 mm Dicke zur Brandabschottung bestätigt wurde [205]. Dies gilt Sowohl für Kletterpflanzen als auch für fassadengebundene Systeme. Erstmals wurde im Zuge dieser Studie auch ein metallisches Trogsystem als rein fassadengebundene Begrünung brandschutztechnisch untersucht. Die feuerfeste Konstruktion ist demnach nicht ausreichend, um eine Brandweiterleitung über die Fassade zu verhindern, allerdings reicht bei diesem System eine Auskrägung der Brandabschottung von 10 cm, wobei die Dicke des Stahlblechs dann 2 mm betragen muss [205]. Die Ergebnisse wurden laufend in den *Leitfaden Fassadenbegrünung* der Stadt Wien [154] integriert. Demnach sind für Gebäude der Gebäudeklassen 4 und 5 folgende nachweisfreie Ausführungen definiert:

- Fassadenbegrünung maximal über drei Geschoße *oder*
- Ausführung einer Brandabschottung aus einem durchgehenden Stahlblech (mind. 1,0 mm Dicke), welches zumindest 20 cm auskragt *oder*
- Schutzabstand zu Fensteröffnungen: vertikal mind. 1,0 m über der Öffnung und horizontal mind. 20 cm *oder*
- horizontaler Abstand zu Fensteröffnungen von mind. 20 cm bei vertikal durchgehenden Fassadenbegrünungen über mehrere Geschoße



**Abb. 7.1:** Mögliche Anordnungen für nachweisfreie Fassadenbegrünungen  
(Bildquelle: *Leitfaden Fassadenbegrünungen* der Stadt Wien [154])

Anderenfalls ist eine Einzelfallprüfung z.B. gemäß *ÖNORM B 3800-5* zu führen. In Abb. 7.1 sind die eben genannten Anforderungen bildlich dargestellt.

Bei Gebäuden mit einem Fluchtniveau von mehr als 22 m sind Fassadenbegrünungen grundsätzlich unzulässig. Ausgenommen davon sind Gebäude mit einem Fluchtniveau von nicht mehr als 32 m, wenn die Fassadenbegrünung an öffnungslosen Wänden angeordnet ist und im Brandfall nicht mit einer Brandübertragung auf Gebäudeteile, Dachkonstruktionen oder Innenräume zu rechnen ist und die Materialien der zumindest Brandklasse A2 entsprechen.

Unter der Annahme, dass die Fassadenbegrünung bezüglich der Brandschutzanforderungen korrekt montiert ist, sind nur noch die Anforderungen laut Tab. 7.2 zu erfüllen. Das Material selbst muss dementsprechend bestimmte Eigenschaften aufweisen, um die vorgegebene Brandschutzklasse zu erfüllen. Mit der Beimischung von halogenfreien Flammschutzmitteln konnten bereits gute Erfolge bei verschiedenen biobasierten Kunststoffen erzielt werden, sodass dies durchaus eine gute Möglichkeit zu sein scheint. Zum Teil konnten hier in Versuchen sogar selbstverlöschende Kunststoffe hergestellt werden [159], sodass hier auch eine Rauch- und Tropfenbildung verhindert wird. Bezüglich der Rauchentwicklung sieht die *OIB-Richtlinie 2* keine Regelungen vor. Die Regelungen zur Tropfenbildung sind ebenfalls in Tab. 7.2 geregelt. Ab Gebäudeklasse 2 gilt für das Gesamtsystem d1, ein brennendes Abtropfen über mehr als 10 Sekunden darf bei dem gewählten Werkstoff demnach nicht auftreten. Wo möglich, könnten Brandschutzanstriche oder eine Beplankung bzw. Einkapselung mit nicht brennbaren Materialien zum Erreichen der notwendigen Brandschutzklasse hilfreich sein. Zusätzlich könnten die Bewässerungsleitungen mit einem Sprinklersystem kombiniert werden. Solche Maßnahmen müssten jedoch durch Einzelprüfungen oder im Zuge einer Studie belegt werden.

Die Anforderungen laut *OIB-Richtlinie 2* und dem *Leitfaden Fassadenbegrünung* der Stadt Wien sind in jedem Fall einzuhalten.

### 7.3 Verträglichkeit mit Pflanzen, Substrat und Düngemitteln

Wie die Betrachtung verschiedener Begrünungssysteme in Kapitel 6 gezeigt hat, kommen auch tragende Komponenten mit Wasser, Substrat und Düngemittel, teilweise auch mit den Pflanzen

direkt in Kontakt. Für ein langlebiges und lange funktionierendes Begrünungssystem müssen die Pflanzen gesund bleiben und sich in ihrer Umgebung wohl fühlen. Gleichzeitig müssen die Systemkomponenten beständig sein und über ihre Lebensdauer hinweg eine gleichbleibende Materialqualität behalten, um die oben genannten Anforderungen an Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Brandschutz dauerhaft zu gewährleisten.

Es ist daher unerlässlich, dass der gewählte Kunststoff zum einen nicht schädlich für die Pflanzen ist, beispielsweise durch toxische Verflüchtigungen, andererseits aber auch selbst bei Kontakt mit Wasser, Substrat und Düngemitteln beständig bleibt. Dies gilt aber nicht nur für den Kunststoff selbst, sondern auch für all seine Zusatzstoffe wie Flammschutzmittel, Weichmacher, Antioxidationsmittel, Stabilisatoren etc. sowie für etwaige Anstriche oder Beschichtungen.

## 7.4 Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen, Insekten- und Pilzbefall

Die Bauteile sollen jedoch nicht nur gegenüber Düngemitteln chemisch beständig bleiben, sie müssen auch den Einfluss von Witterung gut überstehen. Die Systeme sind Regen, Schnee, Wind, Hagel, Trockenheit und Sonneneinstrahlung sowie Temperaturschwankungen durch Hitze und Kälte ausgesetzt. Dabei ist der Temperaturbereich, den die Systeme aushalten müssen, durchaus beträchtlich. Eine Pflanzenwand des Systems *90deGreen*, welche in Hochstraß, Niederösterreich, steht, war im Jahr 2012 eisigen Temperaturen von  $-24^{\circ}\text{C}$  ausgesetzt [102]. Dies ist zwar noch deutlich entfernt vom österreichischen Rekordwert an einem bewohnten Ort, der mit  $-36,6^{\circ}\text{C}$  im Februar 1929 in Zwettl, Niederösterreich, gemessen wurde, aber durchaus kein Einzelfall: Im Februar 2018 hatte es in der Nacht in Ischgl, Tirol,  $-27^{\circ}\text{C}$  [206]. Im Gegensatz dazu wurde der österreichische Hitzerekord mit  $40,5^{\circ}\text{C}$  am 8. August 2013 in Bad Deutsch-Altenburg, Niederösterreich, aufgestellt [209]. Auch wenn dies Extremwerte sind, die noch dazu an verschiedenen Orten gemessen wurden, zeigen sie dennoch recht gut den Temperaturbereich, in welchem Fassadenbegrünungssysteme und ihre Konstruktion funktionstüchtig bleiben müssen. Zudem ist darauf zu achten, dass sich dunkle Bauteile bei direkter Sonneneinstrahlung deutlich stärker erwärmen als helle. Versuche mit unterschiedlichen Terrassendielen haben gezeigt, dass sich schwarze WPC-Dielen mit einer PP-Matrix an einem durchschnittlichen Sommertag auf bis zu  $65^{\circ}\text{C}$  erwärmen können, während weiße Dielen nur  $53^{\circ}\text{C}$  erreichten [78]. Allerdings sollte hierzu erwähnt sein, dass es sich um Hohladielen handelte, die sich um bis zu  $15^{\circ}\text{C}$  stärker erwärmten als Massivdielen. Untersuchungen der begrünten Fassade des MA48-Gebäudes in Wien und jener eines Nachbargebäudes zeigten einen Temperaturunterschied von etwa  $15^{\circ}\text{C}$  direkt an der Fassade [154]. Auch wenn durch die Verdunstungskälte, welche die Pflanzen durch den Prozess der Evapotranspiration abgeben, ein Aufheizen des Systems abgemindert wird, sollte dennoch von einem leeren System ausgegangen werden. Zusammengefasst könnte man hier den Dauereinsatztemperaturbereich auf  $-30^{\circ}\text{C}$  bis  $+80^{\circ}\text{C}$  eingrenzen. Zudem sollte in Anlehnung an den Entwurf zur *ÖNORM EN 15534-5:2019-02-01* [140] der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient einen Wert kleiner als  $50 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  besitzen.

Abhängig von Aufstellungsort und Expositionsrichtung, sind die Systeme von unterschiedlichen Wetterbedingungen betroffen. So sind sie etwa im Burgenland jährlich durchschnittlich 2081 Stunden im Jahr dem direkten Sonnenlicht ausgesetzt, davon etwa 9,2 Stunden pro Tag im Juli. Die mittlere relative Luftfeuchtigkeit in Österreich liegt zwischen 64 % im Burgenland und in Wien im Juli und 90 % in der Steiermark und in Kärnten im Dezember [99]. Die relative Luftfeuchtigkeit gibt dabei an, zu wie viel Prozent die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist. Dies ist je nach Luftdruck und Temperatur unterschiedlich. Bei einer Sättigung von 100 % kondensiert der Wasserdampf und setzt sich in der Luft in Form von Nebel ab [58].

Das verwendete Material muss diesen Witterungsprozessen widerstehen, ohne an Leistung bezüglich Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Brandschutz einzubüßen. Es soll weder bei den Kunststoffbauteilen selbst, noch bei angrenzenden Bauteilen aus anderen Materialien Korrosion auftreten, welche zu einer Schädigung der Tragstruktur führen könnte. Wind, Regen und Hagel sollten keine Mikropartikel lösen und in der Umwelt verteilen können. Der Werkstoff sollte zudem feuchtebeständig sein und die Quellung und Wasseraufnahme sollten gemäß den im Entwurf zur *ÖNORM EN 15534-5:2019-02-01* [140] beschriebenen Werten beschränkt sein. Zudem sollte das Material unempfindlich gegenüber Schimmel und anderen Pilzen sein sowie unattraktiv auf Insekten wirken, um einen Insektenbefall zu vermeiden.

Diese Anforderungen sind obligatorisch. Eine wünschenswerte Zusatzanforderung wäre jedoch, dass der Biokunststoff durch Witterung oder sonstige Einflüsse dermaßen beständig bleibt, dass auch keine oder nur ein Minimum an optischen Mängeln auftreten.

## 7.5 Dauerhaftigkeit

Unerlässlich für die Langlebigkeit eines Begrünungssystems ist die Dauerhaftigkeit der verwendeten Materialien. Ein Biokunststoff, welcher für die tragende Struktur verwendet werden soll, darf daher nicht biologisch abbaubar sein. Aus diesem Grund liegt auch der Fokus dieser Arbeit auf nicht abbaubaren, biobasierten Kunststoffen. Zur Schonung der Umwelt ist aber auf jeden Fall über ein End-of-Life-Szenario nachzudenken. Darin wird überlegt, was mit dem System am Ende seiner Lebenszeit geschehen soll. Im Wesentlichen gibt es für Kunststoffe drei Szenarien: (industrielle) Kompostierbarkeit, Recycling oder thermische Verwertung. Auch wenn die Dauerhaftigkeit das primäre Ziel ist, kommt für den hier gesuchten Werkstoff eine industrielle Kompostierung dann in Frage, wenn die Abbaubarkeit quasi auf Befehl gestartet werden kann, unter normalen Umwelteinflüssen jedoch nicht eintritt. Was nach einer Utopie klingt, könnte in näherer Zukunft zur Realität werden. Es gibt bereits Forschungsteams, die sich mit diesem Ziel befassen und Enzyme so in Kunststoffe eingebettet haben, dass sie bei Zugabe von heißem Wasser dabei helfen, den Kunststoff in kürzester Zeit vollständig zu zersetzen, während es unter Alltagsbedingungen zu keinem Zerfall kommt [114].

Die Dauerhaftigkeit der eingesetzten Materialien über die Zeit der Nutzungsdauer des Begrünungssystems ist unerlässlich. Es sei denn, das entsprechende Bauteil kann nach adäquater Dauer (z.B. 30 Jahren) mit angemessenem Aufwand ausgebaut und durch einen neuen ersetzt werden. Die Möglichkeit eines industriellen Abbaus durch die Hinzugabe von Enzymen oder Bakterien wäre jedoch eine positive Zusatzeigenschaft, falls ein Recycling nicht möglich sein sollte.

## 7.6 Ökologische Anforderungen

Neben der soeben besprochenen Möglichkeit des industriellen Abbaus gibt es auch weitere Möglichkeiten für ein End-of-Life-Szenario. Diese sind Recycling und thermische Verwertung, wobei ein Recycling zu bevorzugen ist. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich die Anforderungen an die Tragfähigkeit nur mit einer duroplastischen Matrix erfüllen lassen. Durch ihren stark vernetzten Aufbau lassen sich Duroplaste nach der Aushärtung jedoch nicht wieder einschmelzen und somit nicht so einfach stofflich wiederverwerten. Hier bleibt normalerweise nur das Produktrecycling, sodass ein Bauteil wiederverwendet wird und sein Aussehen behalten bleibt, beispielsweise in einem modernen Möbelstück. Die Anwendungsmöglichkeiten sind hier jedoch beschränkt. Allerdings haben Forscher am *MIT* ein Verfahren entwickelt, mit dem sich auch Duroplaste stofflich wiederverwerten lassen. Dabei müssen bei der Herstellung des Duroplasts Silylether-Monomere in das Material eingebracht werden. Bei der Zugabe von Säuren, Basen

oder Fluorid zerfällt der Kunststoff und es kann ein neuer Duroplast hergestellt werden [190]. Es ist allerdings noch nicht gesichert, dass dieses Verfahren mit allen Duroplasten funktioniert. Zudem muss sichergestellt werden, dass dies die oben besprochene Verträglichkeit mit Pflanzen und Düngemitteln nicht beeinträchtigt.

Eine thermische Verwertung hingegen würde bei einem vollständig biobasierten Produkt zumindest eine CO<sub>2</sub>-neutrale Verbrennung bedeuten. Damit ist gemeint, dass während der Verbrennung nur so viel CO<sub>2</sub> freigesetzt wird, wie zuvor durch die verwendeten nachwachsenden Rohstoffe aufgenommen wurde. Die dabei freigesetzte Energie kann dann beispielsweise zur Stromerzeugung genutzt werden.

Bei der Auswahl der Rohstoffe spielt ihre Herkunft eine entscheidende Rolle. Wenn möglich, sollte ihr Anbau ökologisch sinnvoll erfolgen und ihre Anbauflächen in keiner Konkurrenz zu Flächen für den Nahrungsmittelanbau stehen. Da hier jedoch ein grundsätzliches Problem besteht, sollten laut Türk [187] vorrangig Flächen, welche für den Anbau von Nahrungsmitteln ungeeignet sind, genutzt werden. Optimal wäre die Verwertung von Reststoffen oder Abfallprodukten.

In Bezug auf die verwendeten Verstärkungsfasern sind Fasern von heimischen Pflanzen auf jeden Fall exotischen Fasern vorzuziehen, um eine nicht notwendige Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Abdruckes durch den Transport zu verhindern.

Um Herstellerfirmen und Verbraucher von der Verwendung meist teurerer biobasierter Produkte zu überzeugen, ist zum einen ein möglichst hoher biogener Anteil und zum anderen eine gute Ökobilanz erforderlich. Das bezieht einen niedrigen Wasserverbrauch beim Anbau und einen geringen Energiebedarf bei der Herstellung mit ein. Zudem sollten beim Herstellungsprozess des Kunststoffes keine toxischen Stoffe benötigt werden, aber auch keine giftigen Nebenprodukte entstehen.

Der Grundgedanke besteht darin, Fassadenbegrünungen noch umweltfreundlicher zu gestalten und so für eine Maximierung der positiven Effekte auf die Umwelt zu sorgen. Das Ziel ist daher, einen möglichst ökologischen Werkstoff zu finden. Die genannten Anforderungen sind wichtig und wünschenswert, eine bessere Ökobilanz als das zu ersetzende Material ist zwingend notwendig.

## 7.7 Ökonomische Anforderungen

Ein Fassadenbegrünungssystem mit wesentlichen Bauteilen aus Biokunststoffen sollte konkurrenzfähig sein und darf demnach nicht gravierend teurer sein als andere etablierte Systeme. Auch wenn immer mehr Menschen für eine umweltfreundlichere Variante gerne etwas mehr bezahlen, darf der Unterschied dennoch nicht zu groß sein. Denn auch das ökologischste System kann keinen Nutzen erzielen, wenn es nicht gekauft wird. Daher sollten die verwendeten Rohstoffe möglichst günstig sein, was meist auch mit der nächsten Anforderung, nämlich guter Verfügbarkeit, einhergeht. Dies soll einen reibungslosen Ablauf in der Herstellung ohne allzu lange Wartezeiten für den Kunden ermöglichen.

Die Relevanz dieser Anforderungen lässt sich relativ schwer kategorisieren, da die Forderungen nach günstigen und gut verfügbaren Rohstoffen selbst nicht eindeutig definiert werden können. Bis zu welchem Preis lässt sich ein Begrünungssystem gut verkaufen? Ab wann ist es „zu teuer“? Bis zu welchem Rohstoffpreis ist das System auch für die Herstellerfirma noch rentabel? Wie lange kann eine schlechte Verfügbarkeit mit rechtzeitiger Bestellung oder einem Aufpreis relativiert werden? Diese Fragen können nicht pauschal beantwortet werden, weshalb die ökonomischen Anforderungen als „wünschenswerte“ Eigenschaften betitelt werden.

## 7.8 Verarbeitbarkeit

Für einen reibungslosen Herstellungsprozess ist auch auf eine einfache, rasche und günstige Verarbeitung zu achten. Damit ist sowohl die Herstellung der Bauteile gemeint, als auch die Bearbeitbarkeit der fertigen Komponenten. Die Möglichkeit einer Vorfertigung von Platten oder Profilen kann den Montageprozess vor Ort verkürzen und eine einfache Installation der Begrünungssysteme ermöglichen. Solche Profile sollten zudem mit haushaltsüblichen Werkzeugen bearbeitbar sein und Steck- oder Schraubverbindungen ermöglichen. Dadurch könnte auch der Markt für Hobbygärtner und Do-It-Yourself-Handwerker geöffnet werden.

Diese Anforderung einer einfachen, raschen und günstigen Verarbeitbarkeit ist nicht zwingend erforderlich, aber dennoch relativ wichtig, um konkurrenzfähig zu bleiben.

## 7.9 Ästhetische und sonstige Ansprüche

Die folgenden Anforderungen betreffen Systeme, deren tragende Teile sichtbar sind, beispielsweise Rankgerüste oder Pflanztröge von troggebundenen Systemen, aber auch statisch nicht relevante Bauteile wie den Rahmen von Matten- oder Geotextilsystemen. Der naturfaserverstärkte Kunststoff sollte stabil und hochwertig aussehen und sich qualitativ anfühlen. Er sollte zudem möglichst geruchsarm sein und keinen strengen Plastikgeruch emittieren, der die natürlichen Gerüche der Pflanzen überdeckt. Da es sich jedoch um fassadengebundene Outdoor-Systeme handelt, sollten hiermit keine Probleme auftreten.

Da diese Anforderungen zum einen nicht alle Systeme betreffen und zum anderen in der Materialauswahl eher eine untergeordnete Rolle spielen werden, werden diese Anforderungen als wünschenswerte Zusatzanforderungen kategorisiert.

## 7.10 Anforderungskatalog in tabellarischer Form

Zum besseren Überblick werden hier die Anforderungen an einen naturfaserverstärkten Kunststoff, welcher für tragende Bauteile eingesetzt werden soll, noch in tabellarischer Form zusammen gefasst. Dieser Anforderungskatalog wird auf der nächsten Seite dargestellt.

Tab. 7.3: Anforderungen an tragende Struktur aus Biokunststoffen

Anforderung	obligat	wichtig	wünschenswert	Beschreibung
Tragfähigkeit	✓			möglichst hohe Festigkeitswerte; Optimum aus minimalem Gewicht und maximaler Tragfähigkeit
Gebrauchstauglichkeit:				
- Verhalten	✓			Begrenzung von Verformung und Kriechverhalten; keine Nutzungseinschränkungen, Haltevermögen von Nägeln und Schrauben
- Optik			✓	geringe Neigung zu optischen Mängeln wie Rissen
Brandschutz	✓			abhängig von GK; Anforderungen lt. OIB-RL 2 und 2.3 sowie Leitfaden Fassadenbegrünung
Verträglichkeit mit Pflanzen, Substrat und Düngemitteln	✓			beständig bei Kontakt mit Pflanzen, Substrat und Düngemitteln; verträglich für Pflanzen; keine Freisetzung gefährlicher Stoffe
Beständigkeit ggü. Umwelteinflüssen				
- Witterung	✓			beständig gegenüber Witterung und UV-Strahlung; Einsatztemperaturbereich $-30^{\circ}\text{C}$ bis $+80^{\circ}\text{C}$ , lin. thermischer Ausdehnungskoeffizient $\leq 50 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ; Feuchtebeständigkeit; Quellen und Wasseraufnahme gemäß EN 15534-5
- Mikropartikel		✓		keine Lösung von Partikeln durch Wind, Hagel oder andere Einflüsse
- Pilze und Insekten	✓			beständig gegenüber Schimmel und anderen Pilzen sowie Insektenbefall
Dauerhaftigkeit	✓			für die gesamte Nutzungsdauer oder (bei nachträglicher Austauschbarkeit) einen angemessenen Zeitraum
Ökologie:				
- End-of-Life Szenario		✓		Recycling, industrieller Abbau oder $\text{CO}_2$ -neutrale Verbrennung
- minimale Nahrungsmittelkonkurrenz		✓		Nutzung von für Nahrungsmittel nicht geeignete Anbauflächen
- Verwertung von Reststoffen			✓	Reststoffe und Abfallprodukte als Rohstoffe
- heimische Rohstoffe			✓	Heimische Pflanzen für Faserherstellung, z.B. Flachs; geringe Transportwege der Rohstoffe
- biogener Anteil		✓		möglichst hoch
- gute Ökobilanz	✓			besser als jene des zu ersetzenden Werkstoffes
Ökonomie			✓	möglichst günstig; gut verfügbare Rohstoffe
Verarbeitbarkeit		✓		einfache und schnelle Herstellung und Bearbeitung der Bauteile
Ästhetische und sonstige Ansprüche			✓	gute Optik und Haptik; kein Geruch

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Die in der Arbeit behandelten Themen und Ergebnisse lassen sich mit folgenden Punkten zusammenfassen:

- Die Vorteile von Fassadenbegrünungen für eine Stadt wie Wien sind unumstritten und, um eine rasche großflächige Begrünung herzustellen, sind fassadengebundene Systeme ideal. Allerdings wird hier im Gegensatz zu bodengebundenen Begrünungen, welche bei selbstklimmenden Pflanzen sogar gänzlich ohne bauliche Maßnahmen funktionieren, ein zusätzlicher Aufbau benötigt, um die Pflanzen an ihrem Platz zu halten. Zudem ist eine regelmäßige und sorgfältige Pflege der Pflanzen unerlässlich, um diese vital zu halten und für einen dauerhaften Erhalt der Vorteile von Begrünungen zu sorgen. Ebenfalls muss dies aus brandschutztechnischen Gründen durchgeführt werden, um eine zu große potentielle Brandlast durch Totholz auszuschließen [204]. Im Hinblick auf den Klimawandel und das Ziel, einen Beitrag zu dessen Milderung zu leisten, sollten aber auch die regionalen und globalen Auswirkungen aufgrund der Erzeugung der Systemkomponenten betrachtet werden.
- Das vor allem für die Unterkonstruktion oft verwendete Aluminium lässt sich in der Praxis leider nicht so einfach recyceln wie in der Theorie, da hier auf eine möglichst sortenreine Trennung geachtet werden muss, um eine gleichbleibende Materialqualität beizubehalten. Zudem erfordert die Herstellung von Primäraluminium ein hohes Maß an Energie und lässt pro hergestellter Einheit Aluminium die eineinhalbfache Menge an giftigem Rotschlamm als Abfallprodukt entstehen, der deponiert werden muss. Durch eine weiter steigende Nachfrage an Aluminium und das oft lange Produktleben wären zudem selbst bei einer angenommenen Recyclingquote von 100 % im Bauwesen bis zu 76 % Primäraluminium notwendig [17], um den Bedarf zu decken.
- Für Begrünungssysteme sind Kunststoffe unersetzlich, sei es in Form von Geotextilien und Vliesen oder Bewässerungsschläuchen. Auch in tragenden Funktionen werden Kunststoffe bereits eingesetzt. Die Überlegung, eine Evaluierung von Biokunststoffen durchzuführen, ist daher naheliegend. Für nahezu alle Kunststoffanwendungen ist das Beimischen von Additiven notwendig, um die Verarbeitbarkeit oder Eigenschaften des fertigen Produkts wie die Dauerhaftigkeit zu verbessern.
- Für tragende Strukturen von höherwertigen Systemen werden aufgrund ihrer Materialeigenschaften hauptsächlich duroplastische Harze mit Faserverstärkung in Betracht gezogen. Allerdings gibt es derzeit aufgrund ihrer chemischen Struktur noch kaum Recyclingmöglichkeiten für Duroplaste. Diese lassen sich jedoch auch biobasiert herstellen. Eine Kombination mit Naturfasern als Verstärkung ist möglich. Diese wird bereits bei einigen Anwendungen eingesetzt und in den letzten Jahren immer intensiver erforscht. Im Vergleich zu Glasfasern zeigen sich jedoch Einbußen bei den mechanischen Eigenschaften (vgl. Tab. 6.1 und Tab. 6.2).
- Es gibt bereits eine Vielzahl an biobasierten Kunststoffen, allerdings sind diese teurer als ihre petrochemischen Pendanten und werden, bis auf Anwendungen im Automobilbau, eher für

Nischenprodukte eingesetzt. Für Komponenten, die in so gut wie allen Fassadengebundenen Systemen benötigt werden, dauerhafte Vliese und Bewässerungsschläuche, konnten auch nach intensiver Suche in Internet keine biobasierten Produkte gefunden werden. Um solche bei Fassadenbegrünungen einsetzen zu können, müssten kunststoffverarbeitende Firmen direkt kontaktiert werden. Allerdings würden die Produkte dann vermutlich speziell für diese Verwendung produziert werden, was den Preis zusätzlich erhöhen würde. Zudem sollte festgehalten werden, dass Biokunststoffe zwar ein geringeres Treibhauspotential und einen verminderten Verbrauch von fossilen Rohstoffen bedeuten, aber auch zur Versauerung der Böden und der Erschöpfung von mineralischen Ressourcen beitragen (siehe Tabellen 5.1, 5.2, 5.2 und 6.3). Zudem werden große landwirtschaftliche Flächen für den Anbau der Rohstoffe benötigt, was zu einer Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion führen kann [187].

- Anforderungen an die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit sind für jedes Bauteil einzeln festzulegen. Zudem sind weitere Anforderungen an den Brandschutz, die Dauerhaftigkeit, die Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen und die Verträglichkeit mit Pflanzen, Substrat und Düngemittel in jedem Fall einzuhalten. Nachdem ein passendes Material als Ersatz gefunden wird (dies kann für verschiedene Bauteile unterschiedlich sein), sollte eine Ökobilanzierung über den gesamten Lebenszyklus durchgeführt werden, um festzustellen, ob das Substitut tatsächlich ökologisch besser ist als das zu ersetzende Material. Die Ökobilanz zählt zu den entscheidenden Anforderungen, ob ein Werkstoff durch einen Biokunststoff ersetzt werden sollte. Zudem wurden in der Arbeit weitere wichtige und wünschenswerte Zusatzeigenschaften definiert.

Die Evaluierung ergibt daher, dass durchaus ein Potential für den Einsatz von Biokunststoffen in Fassadenbegrünungssystemen vorhanden ist. Allerdings sind Biokunststoffe im Moment noch recht teuer und es müssten bauteil- und gesamtsystembezogene Ökobilanzen mit einer „cradle-to-grave“-Betrachtung durchgeführt werden, um eine Auskunft darüber geben zu können, ob diese die Herstellung von Fassadenbegrünungssystemen tatsächlich ökologischer machen. Ein zusätzliches Problem ist, dass auch Lebenszyklusanalysen die Umwelteinwirkungen nur abschätzen und nicht eindeutig quantifizieren können, da sie die komplexen, realen Prozesse nicht vollständig abbilden können. Eine Studie aus dem Jahr 2020, welche die Ergebnisse verschiedenster Ökobilanzen von biobasierten und fossilbasierten Kunststoffen vergleicht, verweist auf stark streuende Ergebnisse [202]. So konnte weder festgestellt werden, ob eine Gruppe generell besser oder schlechter für die Umwelt sei, noch konnte innerhalb der Gruppen ein Polymertyp bestimmt werden, welcher die geringsten Umweltauswirkungen zeigt. Die Studienautoren führen dies darauf zurück, dass Normen für Ökobilanzen „weder Umfang, Datenqualität, Bewertungsverfahren noch Wirkungskategorien vorschreiben“ [202] und plädieren daher für ein obligatorisches Verwenden der Methode des „European Union Product Environmental Footprint“ als Standard. Die Studienautoren weisen darauf hin, dass nicht mit Sicherheit gesagt werden kann, ob Biokunststoffe tatsächlich besser für die Umwelt sind als konventionelle Kunststoffe. Sogar die Werte für Treibhauspotential und Energieverbrauch liegen demnach, im Gegensatz zur landläufigen Meinung, für biobasierte und fossilbasierte Polymere in einer ähnlichen Größenordnung, allerdings mit enormen Schwankungsbreiten. Ohne eine normative Regulierung, wie Ökobilanzen durchzuführen sind, können Lebenszyklusanalysen daher nicht für einen aussagekräftigen Vergleich von Kunststoffen herangezogen werden; vor allem da auch die Ergebnisse zu einzelnen Kunststoffen sehr starke Schwankungen der Werte aufweisen [202]. Um biogene und petrochemischbasierte Kunststoffe in Zukunft miteinander vergleichen zu können, müssen daher in einem ersten Schritt die Rahmenbedingungen, Berechnungsmethoden und Wirkungskategorien für Lebenszyklusanalysen eindeutig normativ geregelt werden. Danach müssten die bisher durchgeführten Bilanzierungen

neu durchgeführt und bewertet werden. Bei einer geringen Streuung der Werte innerhalb eines Polymertyps (z.B. PLA) können die Ergebnisse als durchaus realistisch bewertet werden, woraufhin diese dann für Vergleiche der unterschiedlichen Kunststofftypen und -arten (bio- bzw. fossilbasiert) herangezogen werden können. Da die realen Prozesse sehr komplex sind, wird auch die detaillierteste Lebenszyklusanalyse nie alle Auswirkungen mit exakt abbilden können. Jedoch kann man davon ausgehen, dass bei gleichen Rahmenbedingungen, Berechnungsmethoden und Annahmen der Ungenauigkeitsfaktor in etwa gleich ist und die Ergebnisse daher vergleichbar sind.

Erst wenn ein Vergleich unter den eben genannten Umständen möglich ist, lassen sich Schlüsse ziehen, ob Biokunststoffe tatsächlich umweltfreundlicher sind. Dann kann auch mit höherer Sicherheit evaluiert werden, welche der in dieser Arbeit vorgeschlagenen Alternativen die ökologischsten sind und ob uns Biokunststoffe dabei helfen können, Fassadenbegrünungen nachhaltiger zu gestalten, um deren Vorteile zu maximieren.

# Literatur

- [1] 3A Composites GmbH. *Alucobond® A2*. URL: <https://alucobond.com/products/alucobond-a2> (Zugriff am 23. 04. 2022).
- [2] 3DBavaria GmbH & Co.KG. *Der Unterschied zwischen PA12 und PA11*. o.D. URL: <https://www.3dbavaria.com/wissenswertes/der-unterschied-zwischen-pa11-und-pa12/> (Zugriff am 11. 05. 2022).
- [3] 90deGreen GmbH. *Systemaufbau*. Detailskizze. Persönliche E-Mail. 29. Apr. 2022.
- [4] Accsys Technologies PLC. *Accoya Fassade an Bremer Sporthalle*. URL: <https://www.accoya.com/de/projekte/accoya-fassade-an-bremer-sporthalle/#project-gallery-2> (Zugriff am 17. 02. 2022).
- [5] Accsys Technologies PLC. *Benefits*. URL: <https://tricoya.com/benefits/> (Zugriff am 17. 02. 2022).
- [6] Accsys Technologies PLC. *Holzfassade*. URL: <https://www.accoya.com/de/produkte/holzfassade/> (Zugriff am 17. 02. 2022).
- [7] Accsys Technologies PLC. *Masisa Tricoya XB chosen as the ideal decorative façade for this Bosch House*. URL: <https://tricoya.com/benefits/> (Zugriff am 17. 02. 2022).
- [8] Accsys Technologies PLC. *Neudefinition der Welt des Holzes*. URL: <https://www.accoya.com/de/warum-accoya/> (Zugriff am 17. 02. 2022).
- [9] Accsys Technologies PLC. *What is Acetylation?* URL: <https://www.accsysplc.com/products/what-is-acetylation/> (Zugriff am 17. 02. 2022).
- [10] K. Adekunle, D. Åkesson und M. Skrifvars. „Biobased composites prepared by compression molding with a novel thermoset resin from soybean oil and a natural-fiber reinforcement“. eng. In: *Journal of applied polymer science* 116.3 (2010), S. 1759–1765. ISSN: 0021-8995. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.31634>.
- [11] B. Adler. *Biolit Vertical Green® - Das vertikale Begrünungssystem*. URL: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjPhZGhiNn0AhUP7rsIHWI4AKEQFnoECAUQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.unika-kalksandstein.de%2Fdownloads-unika%2Fcategory%2F17-bausysteme-produkte.html%3Fdownload%3D85%3Abiolit-vertical-green&usg=AOvVaw3-J0JZ3uch\\_UunMvAyjl6n](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjPhZGhiNn0AhUP7rsIHWI4AKEQFnoECAUQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.unika-kalksandstein.de%2Fdownloads-unika%2Fcategory%2F17-bausysteme-produkte.html%3Fdownload%3D85%3Abiolit-vertical-green&usg=AOvVaw3-J0JZ3uch_UunMvAyjl6n) (Zugriff am 11. 12. 2021).
- [12] AKRO-PLASTIC GmbH. *M-VERA®-Produktübersicht*. Produktblatt. Feb. 2022. URL: [https://bio-fed.com/fileadmin/bio-fed/PDFs/BIO-FED\\_Product\\_Portfolio\\_Bio-PP\\_2022-02-08\\_deutsch.pdf](https://bio-fed.com/fileadmin/bio-fed/PDFs/BIO-FED_Product_Portfolio_Bio-PP_2022-02-08_deutsch.pdf) (Zugriff am 06. 05. 2022).
- [13] Alchetron. *Ionel Schein*. 6. Feb. 2018. URL: <https://alchetron.com/Ionel-Schein> (Zugriff am 24. 01. 2022).
- [14] Alles über Alu. *Bauxitabbau*. URL: <https://www.allesueberalu.de/Bauxitabbau.html> (Zugriff am 04. 09. 2021).

- [15] P. Almqvist. *Natur für die Wand!* 27. Sep. 2011. URL: <https://www.geo.de/natur/oekologie/4105-rtkl-gartenkunst-natur-die-wand> (Zugriff am 16.05.2022).
- [16] alu.ch. *Recycling von Aluminium*. 2021. URL: <https://alu.ch/werkstoff/recycling/> (Zugriff am 30.07.2021).
- [17] *An die Zukunft denken - mit Aluminium bauen*. GDA - Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. Okt. 2012.
- [18] Art of Travel. *Art of Travel: New York für Insider: Das William Vale Brooklyn Hotel*. 9. Jan. 2019. URL: <https://segara.de/art-of-travel-new-york-fuer-insider-das-william-vale-brooklyn-hotel/> (Zugriff am 17.02.2022).
- [19] astudejaoublie.blogspot. *Maison en plastique - 1955 - Schein, Magnant, Coulon*. 23. Sep. 2011. URL: <http://astudejaoublie.blogspot.com/2011/09/maison-en-plastique-ionel-schein-1956.html> (Zugriff am 24.01.2022).
- [20] Baunetz\_Wissen. *Deichmanske Bibliotek in Oslo*. URL: <https://www.baunetzwissen.de/bim/objekte/kultur-bildung/deichmanske-bibliotek-in-oslo-7179289> (Zugriff am 05.02.2022).
- [21] W. Beier. *Biologisch Abbaubare Kunststoffe*. Deutsches Umweltbundesamt, 2009. 11 S.
- [22] S. Belboom und A. Léonard. „Does biobased polymer achieve better environmental impacts than fossil polymer? Comparison of fossil HDPE and biobased HDPE produced from sugar beet and wheat“. In: *Biomass and Bioenergy* 85 (2016), S. 159–167. ISSN: 0961-9534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.12.014>.
- [23] F. Berzin und B. Vergnes. „5 - Thermoplastic natural fiber based composites“. In: *Fiber Reinforced Composites*. Hrsg. von K. Joseph, K. Oksman, G. George, R. Wilson und S. Appukuttan. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. Woodhead Publishing, 2021, S. 113–139. ISBN: 978-0-12-821090-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821090-1.00015-6>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128210901000156>.
- [24] Beta Analytic. *OK Biobased Prüfsiegel*. Feb. 2020. URL: <https://www.betalabservices.com/deutsch/biobasierend/ok-biobased.html> (Zugriff am 26.04.2021).
- [25] BEWI. *Circulum®*. Techisches Datenblatt. 3. Jan. 2021. URL: <https://www.bewi.com/wp-content/uploads/2021/01/Technical-data-sheet-BioFoam.pdf> (Zugriff am 06.05.2022).
- [26] BIOkunststofftool. *Bio-PP*. URL: <https://biokunststofftool.de/werkstoffe/bio-pp/#1549294500145-9456c301-9844> (Zugriff am 20.11.2021).
- [27] bioökonomie.de. *Biobasierte Weichmacher für PVC*. 7. Dez. 2018. URL: <https://biooekonomie.de/nachrichten/neues-aus-der-biooekonomie/biobasierte-weichmacher-fuer-pvc>.
- [28] Bioplastics Magazine. *In a world first, Sharp selects bio-based engineering plastic for smartphone front panel*. 10. Juli 2015. URL: <https://www.bioplasticsmagazine.com/en/news/meldungen/20150710Sharp-selects-Durabio-for-fron-panel.php> (Zugriff am 13.11.2021).
- [29] E. T. N. Bisanda. „The Effect of Alkali Treatment on the Adhesion Characteristics of Sisal Fibres“. eng. In: *Applied composite materials* 7.5 (2000), S. 331–339. ISSN: 0929-189X. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1026586023129>.

- [30] A. K. Bledzki, H.-P. Fink und K. Specht. „Unidirectional hemp and flax EP- and PP-composites: Influence of defined fiber treatments“. eng. In: *Journal of applied polymer science* 93.5 (2004), S. 2150–2156. ISSN: 0021-8995. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.20712>.
- [31] A. K. Bledzki, O. Faruk und V. E. Sperber. „Cars from Bio-Fibers“. In: *Macromolecular Materials and Engineering* Vol. 295 (5 5. Apr. 2006), S. 449–457. DOI: <https://doi.org/10.1002/mame.200600113>.
- [32] A. K. Bledzki, A. Jaszkiwicz und D. Scherzer. „Mechanical properties of PLA composites with man-made cellulose and abaca fibres“. eng. In: *Composites. Part A, Applied science and manufacturing* 40.4 (2009), S. 404–412. ISSN: 1359-835X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.01.002>.
- [33] R. Blok, J. Smits, R. Gkaidatzis und P. Teuffel. „Bio-Based Composite Footbridge: Design, Production and In Situ Monitoring“. In: *Structural Engineering International* Vol. 29.Issue 3 (11. Juni 2019), S. 453–465. DOI: <https://doi.org/10.1080/10168664.2019.1608137>.
- [34] A. Boccolari und I. Fresen. *Epoxidierung und deren 3D-Visualisierung*. URL: [http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/16/oc/cavoc/epoxidierung/epoxidierung\\_vis.vlu/Page/vsc/de/ch/16/oc/cavoc/epoxidierung/mechanismus.vscml.html](http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/16/oc/cavoc/epoxidierung/epoxidierung_vis.vlu/Page/vsc/de/ch/16/oc/cavoc/epoxidierung/mechanismus.vscml.html) (Zugriff am 18.02.2022).
- [35] M. W. Braestrup. „Footbridge Constructed from Glass-Fibre-Reinforced Profiles, Denmark“. In: *Structural Engineering International* Vol. 9.Issue 4 (Nov. 1999), S. 256–258. DOI: <https://doi.org/10.2749/101686699780481709>.
- [36] Brandschutzforum Austria. „Bauprodukte im Feuer Teil 2: Brandverhalten & Klassifizierung“. In: *Blaulicht* 51 (15. Juni 2017). URL: [http://www.brandschutz-info.at/wbinfo/media/download\\_gallery/BRANDSCHUTZ-Info\\_Nr.\\_51\\_Bauprodukte\\_2.pdf](http://www.brandschutz-info.at/wbinfo/media/download_gallery/BRANDSCHUTZ-Info_Nr._51_Bauprodukte_2.pdf) (Zugriff am 30.04.2022).
- [37] T. Brandwein. *Polygrün Klettergerüste und Rankhilfen - Kurzinfo*. 2018. URL: <https://www.xn--fassadenbegrueung-polygrn-6scl.de/rankhilfen> (Zugriff am 03.11.2021).
- [38] J. Breiholz. *Interview 'Das Thema Rotschlamm verfolgt mich seit 30 Jahren', Magazin Mitbestimmung, Ausgabe 12/2010*. URL: <https://www.boeckler.de/de/magazin-mitbestimmung-2744-interview-aposdas-thema-rotschlamm-verfolgt-mich-seit-30-jahrenapos-10801.htm> (Zugriff am 04.09.2021).
- [39] M. Carus und A. Partanen. *Bioverbundwerkstoffe - Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK) und Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC)*. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2019. 56 S.
- [40] A. Caterbow und O. Speranskaya. „Nutzung - Fluch und Segen“. In: *Plastikatlas 2019*. Hrsg. von L. Fuhr. 4. Auflage. Heinrich-Böll Stiftung & Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND), Feb. 2020. ISBN: 978-3-86928-200-8.
- [41] L. Chapman. *Brian Broughton (Architect): Dubai International Airport 1971*. URL: <https://www.dubaiasitusedtobe.net/BrianBroughtonDubaiAirport.shtml> (Zugriff am 29.01.2022).
- [42] Chemie.de. *Aluminium*. URL: <https://www.chemie.de/lexikon/Aluminium.html> (Zugriff am 30.07.2021).

- [43] Chemie.de. *Celluloseacetat*. URL: <https://www.chemie.de/lexikon/Celluloseacetat.html> (Zugriff am 22. 11. 2021).
- [44] Chemie.de. *Ökologische Klebstoffe aus Pflanzenöl*. 10. Mai 2019. URL: <https://www.chemie.de/news/1160948/oekologische-klebstoffe-aus-pflanzenoel.html> (Zugriff am 18.02.2022).
- [45] Chemie.de. *Photooxidation*. o.D. URL: <https://www.chemie.de/lexikon/Photooxidation.html>.
- [46] Chemie.de. *Polyamide*. URL: <https://www.chemie.de/lexikon/Polyamide.html> (Zugriff am 19. 11. 2021).
- [47] Composites United e.V. *Das erste 100% biobasierte Polyesterharz steht zu Testzwecken zur Verfügung!* 24. Juni 2020. URL: <https://composites-united.com/das-erste-100-biobasierte-polyesterharz-steht-zu-testzwecken-zur-verfuegung/> (Zugriff am 26.03.2022).
- [48] Creabeton Matériaux AG. *Außenfassaden*. URL: <http://www.skyflor.ch/referenzen/aussenfassaden/> (Zugriff am 06.01.2022).
- [49] Creabeton Matériaux AG. *Das Funktionsprinzip*. URL: <http://www.skyflor.ch/produkt/das-prinzip/> (Zugriff am 09.12.2021).
- [50] Creabeton Matériaux AG. *Technische Details*. URL: <http://www.skyflor.ch/produkt/technische-details/> (Zugriff am 09.12.2021).
- [51] J. R. Davis. „Metals Handbook Desk Edition“. In: ASM International, 1998. Kap. Chemical Compositions and International Designations for Aluminium Alloys.
- [52] Delancey Real Estate Investment. *The Walbrook Building*. URL: <https://www.delancey.com/the-wallbrook-building.html> (Zugriff am 05.02.2022).
- [53] Die Chemie-Schule. *Polyethylen*. URL: <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Bio-PE> (Zugriff am 19.11.2021).
- [54] Die Stadtbegrüner. *Vertikalbegrünung außen*.
- [55] *DIN CERTCO – Zertifizierungsprogramm Biobasierte Produkte*. Berlin: DIN CERTCO, Mai 2020.
- [56] R. Doernach und B. Burkhardt. *Bausysteme mit Kunststoffen*. ger. Architektur - Forschung und Entwicklung. Stuttgart: Dt. Verl.-Anst., 1974. ISBN: 3421023778.
- [57] Y. Dong, M. U. Hossain, H. Li und P. Liu. „Developing Conversion Factors of LCIA Methods for Comparison of LCA Results in the Construction Sector“. In: *Sustainability* 13.16 (2021). ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su13169016. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/16/9016>.
- [58] A. Dreistler Therese an d Leyser. *Voll vernebelt - Nebelbildung im Winter*. 5. Feb. 2020. URL: [https://www.dwd.de/DE/wetter/thema\\_des\\_tages/2020/2/5.html](https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2020/2/5.html) (Zugriff am 09.05.2022).
- [59] H. Eichhorn. *Aw: Diplomarbeit „Biokunststoffe in Fassadenbegrünungssystemen“*. Persönliche E-Mail. Veertical Green GmbH, 7. Apr. 2022.
- [60] H.-J. Endres, M. Mudersbach, H. Behnsen und S. Spierling. *Biokunststoffe unter dem Blickwinkel der Nachhaltigkeit und Kommunikation - Status quo, Möglichkeiten und Herausforderungen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020. ISBN: 978-3-658-27794-9. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-27795-6>.

- [61] H.-J. Endres und A. Siebert-Raths. *Technische Biopolymere - Rahmenbedingungen, Marktsituation, Herstellung, Aufbau und Eigenschaften*. München: Hanser, 2009.
- [62] T. Engel und J. Noder. „Begrünte Fassaden aus brandschutztechnischer Sicht“. In: *Bautechnik* Vol. 97.8 (23. Apr. 2020), S. 549–557. DOI: 10.1002/bate.202000041.
- [63] V. Enzi und B. Scharf. *Das Haus im „Grünen Pelz“. Bürogebäude der MA 48, Einsiedlergasse 2, 1050 Wien*. Wien: Universität für Bodenkultur Wien, 2012.
- [64] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. *Schlussbericht: Wärmeformbeständige, ungesättigte Polyesterharze und Harzwerkstoffe mit hoher Flammwidrigkeit auf Basis nachwachsender Rohstoffe*. Abschlussbericht. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 9. Dez. 2015.
- [65] O. Faruk, A. K. Bledzki, H.-P. Fink und M. Sain. „Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010“. In: *Progress in Polymer Science* Vol. 37 (11 Nov. 2012), S. 1552–1596. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>.
- [66] Fiberline Building Profiles A/S. *Die Fiberline GFK Brücke über eine Bahnstrecke*. URL: <https://fiberline.com/de/projekte/bruecken/die-fiberline-gfk-bruecke-ueber-eine-bahnstrecke> (Zugriff am 04.02.2022).
- [67] Final Advanced Materials GmbH. *Basaltfaser*. URL: <https://www.final-materials.com/de/297-basaltfaser> (Zugriff am 28.04.2022).
- [68] B. Fitzgerald. *TU/e leads project for world’s first ‘Smart Circular Bridge’ in a city*. 7. Apr. 2022. URL: <https://www.tue.nl/en/news-and-events/news-overview/07-04-2022-tue-leads-project-for-worlds-first-smart-circular-bridge-in-a-city/> (Zugriff am 28.04.2022).
- [69] Forum | Nachhaltiges Bauen. *Aluminium - Ökobilanz*. 2021. URL: <https://nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/Aluminium> (Zugriff am 30.07.2021).
- [70] F. Freutel. *Aw: Diplomarbeit „Biokunststoffe in Fassadenbegrünungssystemen“*. Persönliche E-Mail. Vertiko GmbH, 11. Mai 2022.
- [71] D. Friedrich. *Angewandte Bauphysik und Werkstoffkunde naturfaserverstärkter Kunststoffe: Eine Anleitung für Studium und Praxis*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021. ISBN: 978-3-658-30937-4. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-30938-1>.
- [72] M. Gabler. „The Walbrook London – Fassade aus glasfaserverstärktem Kunststoff“. In: *Detail Inspiration* (Mai 2010). URL: <https://inspiration.detail.de/technik-the-walbrook-london-fassade-aus-glasfaserverstaerktem-kunststoff-108721.html> (Zugriff am 05.02.2022).
- [73] GEOMET s.r.o. *Bio-Mulchvlies (Ökotextilien)*. URL: <https://www.geomall.at/garten/unkrautvlies-und-bodengewebe/bio-mulchvlies-oekotextilien> (Zugriff am 02.04.2022).
- [74] GMW, MP. *Basaltfasern*. 2015. URL: [https://materialarchiv.ch/en/ma:material\\_1754/?maapi:f\\_all\\_procedures=ma:procedure\\_dd0f21f0-0fbc-4c49-8462-aed73fafc65f](https://materialarchiv.ch/en/ma:material_1754/?maapi:f_all_procedures=ma:procedure_dd0f21f0-0fbc-4c49-8462-aed73fafc65f) (Zugriff am 02.04.2022).
- [75] M. Grau. „Entwicklung von biobasierten, ungesättigten Polyesterharzen auf Basis von Itaconsäure“. Dissertation. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 1. Juni 2016.
- [76] Greenbop. *Mobilane LivePanel Pack*. URL: <https://www.greenbop.de/Wandbegruenung/Mobilane-LivePanel-PACK.html> (Zugriff am 06.05.2022).

- [77] C. Haas. *Projekt: Empfangsgebäude Novartis Campus, Basel*. URL: <https://www.ebp.ch/de/projekte/empfangsgebaeude-novartis-campus-basel> (Zugriff am 29.01.2022).
- [78] A. Haider, M. Reitberger, J. Leßlhumer, B. Plank und U. Müller. „Dauerhaftigkeit und mechanische Stabilität von Terrassendielen bei erhöhter Temperatur - Ein Werkstoffvergleich: WPC, thermisch modifiziertes Holz und Massivholz“. ger. In: *European Journal of Wood and Wood Products* (2014). ISSN: 0018-3768. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0827-3>.
- [79] H. Hanselka. „Faserverbundwerkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen für den ökologischen Leichtbau“. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 29.6 (1998), S. 300–311.
- [80] Helix Pflanzensysteme GmbH. *Lebendige, nachhaltige Fassaden: Helix® Biomura*. o.D. URL: [https://www.helix-pflanzen.de/sites/default/files/products/downloads/broschuere\\_biomura\\_1.pdf](https://www.helix-pflanzen.de/sites/default/files/products/downloads/broschuere_biomura_1.pdf) (Zugriff am 07.05.2022).
- [81] C. A. S. Hill und H. P. S. Abdul Khalil. „Effect of fiber treatments on mechanical properties of coir or oil palm fiber reinforced polyester composites“. eng. In: *Journal of applied polymer science* 78.9 (2000), S. 1685–1697. ISSN: 0021-8995. DOI: [https://doi.org/10.1002/1097-4628\(20001128\)78:9<1685::AID-APP150>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/1097-4628(20001128)78:9<1685::AID-APP150>3.0.CO;2-U).
- [82] G. Hüfing, S. Jäger-Katzmann, M. Pendl und I. Tributsch. *Ein Pflanzenmantel für ein ausgeglichenes Klima : ein Leitfaden für die Fassadenbegrünung*. ger. Wien: Die Umweltberatung, 2009.
- [83] IBO -Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH. *IBO-Richtwerte für Baumaterialien: Wesentliche methodische Annahmen für die IBO-Richtwerte 2017*. 28. Dez. 2020. URL: [https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/IBO-Richtwerte-2017\\_Methode\\_v32\\_2020-12-28.pdf](https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/IBO-Richtwerte-2017_Methode_v32_2020-12-28.pdf) (Zugriff am 19.05.2022).
- [84] Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH. *Biofassade - Klimaschutz im Kleinen*. URL: <https://www.iab-weimar.de/betonfertigteil-zur-fassadenbegruenung/> (Zugriff am 09.12.2021).
- [85] ITKE Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, Universität Stuttgart. *Biokunststoff-Moos-Modul, Messestand, Hannover Messe 2013*. URL: [https://www.itke.uni-stuttgart.de/de/forschung/realisierte\\_projekte/moss-module/](https://www.itke.uni-stuttgart.de/de/forschung/realisierte_projekte/moss-module/) (Zugriff am 11.02.2022).
- [86] T. Iwata. „Biologisch abbaubare und biobasierte Polymere: die Perspektiven umweltfreundlicher Kunststoffe“. In: *Angewandte Chemie* 127 (Nov. 2014), S. 3254–3260. ISSN: 0044-8249. DOI: <https://doi.org/10.1002/ange.201410770>.
- [87] K. Janßen. *Liste der nicht brennbaren Dämmung (feuerfeste Dämmstoffe A1)*. 20. Feb. 2022. URL: <https://gruenes.haus/nicht-brennbare-daemmung-daemmstoffe/> (Zugriff am 07.05.2022).
- [88] M. S. Jespersen, M. Dalsgaard, A. Maratou, L. C. Wähler, L. A. Bossard, R. Narkeviciute, A. R. Iliescu, S. D. Jaganjacová und L. Upton. *Bio-based products – from idea to market*. Berlin, Juni 2018. URL: <https://www.ecologic.eu/sites/default/files/publication/2018/3513-bio-based-products-15-success-stories.pdf>.

- [89] Klima- und Energiefonds. *MehrGrüneSchulen - Finanzierungsmodelle für grüne Infrastruktur an Schulen*. 9. März 2021. URL: <https://smartcities.at/projects/mehrgrueneschulen/> (Zugriff am 03. 11. 2021).
- [90] J. Knippers, J. Cremers, M. Gabler und L. Julian. *Atlas Kunststoffe + Membranen: Werkstoffe und Halbzeuge, Formfindung und Konstruktion*. München: Edition Detail, Institut für internationale Architekturdokumentation GmbH & Co. KG, 2010. ISBN: 978-3-920034-41-6.
- [91] J. Knippers, C. Köhler, K. Fischer, E. Kappler, L. Ziegler, M. Schweizer, F. Braun und H.-P. Braun. *Frei formbare Halbzeuge aus vorwiegend nachwachsenden Rohstoffen für die Anwendung in Innen- und Außenräumen*. Abschlussbericht zum Förderprogramm "ÉFRE Umwelttechnik". Universität Stuttgart, Apr. 2014.
- [92] J. Knippers, V. Koslowski und M. Oppe. *Faserverbundwerkstoffe im Bauwesen*. In: *Stahlbau Kalender 2020*. Hrsg. von U. Kuhlmann. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 30. März 2020. Kap. 9, S. 611–670. ISBN: 978-3-433-03290-9.
- [93] F. Kobermaier. *Fassaden- und Vertikalbegrünung - Internationale & nationale Best-Practice-Beispiele*. Wien: Magistrat der Stadt Wien MA19 - Architektur und Stadtgestaltung, Jan. 2019. URL: <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/studien/pdf/e000037.pdf> (Zugriff am 11. 12. 2021).
- [94] C. Köhler-Hammer, J. Knippers und M. Hammer. „13 - Bio-based plastics for building facades“. In: *Start-Up Creation*. Woodhead Publishing, 2016, S. 329–346. ISBN: 978-0-08-100546-0. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100546-0.00013-3>.
- [95] C. Köhler-Hammer. „Anwendungsmöglichkeiten biobasierter Kunststoffe im Innen- und Außenraum von Gebäuden - Beispielhafte Entwicklung“. Dissertation. Universität Stuttgart, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.18419/opus-116>.
- [96] M. Krahwinkel und C. Gehmert. „Bemessung von tragendes Bauweilen aus Kunststoffen im Bauwesen - die neue BÜV-Empfehlung TKB (2010-08)“. In: *Bautechnik* 88.6 (Juni 2011). DOI: <https://doi.org/10.1002/bate.201101468>.
- [97] Kunststoffe.de. *Epoxidharze (EP)*. URL: <https://www.kunststoffe.de/a/grundlagenartikel/epoxidharze-ep-285573> (Zugriff am 18. 02. 2022).
- [98] Kunststoffe.de. *Polylactid (PLA)*. URL: <https://www.kunststoffe.de/a/grundlagenartikel/polylactid-pla-264462> (Zugriff am 01. 11. 2021).
- [99] Länderdaten.info. *Klimavergleich*. o.D. URL: <https://www.laenderdaten.info/klimavergleich.php?r1=at-burgenland&r2=oesterreich> (Zugriff am 09. 05. 2022).
- [100] H. Lengsfeld, J.-P. Schneider und F. Gortner. „Biobasierte Alternative zu petrochemischen Polyesterharzen“. In: *Kunststoffe* (1. Juni 2021).
- [101] Licht Kunst Licht. *Novartis Campus - Empfangsgebäude und Parking*. URL: <https://www.swiss-architects.com/de/licht-kunst-licht-bonn/project/novartis-campus-reception-building-and-parking> (Zugriff am 29. 01. 2022).
- [102] A. Lichtblau. *90deGreen, der Garten für die Wand*. Feb. 2018.

- [103] A. Lichtblau. *Aw: Diplomarbeit „Biokunststoffe in Fassadenbegrünungssystemen“*. Persönliche E-Mail. 90deGreen GmbH, 29. Apr. 2022.
- [104] Liebe zum Garten. *pH-Wert Pflanzen-Tabelle: Der richtige Boden für deine Pflanze*. 30. Dez. 2020. URL: <https://liebe-zum-garten.de/ph-wert-pflanzen-tabelle/> (Zugriff am 09.04.2022).
- [105] Lisopack b.v. *Biofoam®*. URL: <https://www.lisopack.com/products-de-biofoam> (Zugriff am 06.05.2022).
- [106] W. Liu, T. Chen, M.-e. Fei, R. Qiu, D. Yu, T. Fu und J. Qiu. „Properties of natural fiber-reinforced biobased thermoset biocomposites: Effects of fiber type and resin composition“. eng. In: *Composites. Part B, Engineering* 171 (2019), S. 87–95. ISSN: 1359-8368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.04.048>.
- [107] LyondellBasell Industries Holdings B.V. *LyondellBasell und Neste weiten Zusammenarbeit zur Herstellung von Polymeren und Chemieprodukten aus erneuerbaren Rohstoffen aus*. 17. Juni 2021. URL: <https://www.lyondellbasell.com/de/wesseling-site/neuigkeiten/lyondellbasell-und-neste-vereinbaren-langfristige-zusammenarbeit/> (Zugriff am 20.11.2021).
- [108] M. Mahabadi. *Fassadenbegrünungsrichtlinien - Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Fassadenbegrünungen*. ger. Ausg. 2018, 3., überarb. Aufl.. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau - Arbeitskreis Fassadenbegrünungen, 2018.
- [109] V. Maneval. *Maison du Futur 1957-1967 Disneyland*. 14. Dez. 2019. URL: <http://www.bubblemania.fr/de/maison-du-futur-1957-1967-disneyland/> (Zugriff am 25.01.2022).
- [110] Z. S. Markowski. „The Structural Applications of Plastics“. In: *Plastics in Building Construction: the proceedings of the Conference on Plastics in Building Construction, held at Battersea College of Technology (the proposed University of Surrey), 25th September 1964*. Hrsg. von R. M. Davies. 25. Sep. 1964.
- [111] K. Mayer. *Vertikalbegrünung mit Patent - modulares System aus Kalksandstein*. 12. Juni 2018. URL: <https://bi-medien.de/fachzeitschriften/galabau/gartengestaltung/vertikalbegruenung-mit-patent-modulares-system-aus-kalksandstein-g12001> (Zugriff am 10.12.2021).
- [112] V. Mazzanti, R. Pariante, A. Bonanno, O. Ruiz de Ballesteros, F. Mollica und G. Filippone. „Reinforcing mechanisms of natural fibers in green composites: Role of fibers morphology in a PLA/hemp model system“. eng. In: *Composites science and technology* 180 (2019), S. 51–59. ISSN: 0266-3538. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.05.015>.
- [113] „Mechanical performance of biocomposites based on PLA and PHBV reinforced with natural fibres – A comparative study to PP“. eng. In: *Composites science and technology* 70.12 (2010), S. 1687–1696. ISSN: 0266-3538. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.06.005>.
- [114] E. Megbel. *Enzyme sollen Plastik kompostierbar machen*. 21. Apr. 2021. URL: <https://www.spektrum.de/news/plastikabbau-enzyme-sollen-plastik-kompostierbar-machen/1863025> (Zugriff am 03.05.2022).

- [115] S. Mishra, J. Naik und Y. Patil. „The compatibilising effect of maleic anhydride on swelling and mechanical properties of plant-fiber-reinforced novolac composites“. eng. In: *Composites science and technology* 60.9 (2000), S. 1729–1735. ISSN: 0266-3538. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00056-7](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00056-7).
- [116] Mitsubishi Chemical Cooperation. *DURABIO*. 2016. URL: <https://www.mcgp-global.com/de/europa/produkte/brand/durabioTM/> (Zugriff am 13. 11. 2021).
- [117] Mobilane GmbH. *Planungsunterlagen LivePanel*. 2018. URL: <https://mobilane.com/app/uploads/2018/08/Architektenmappe-LivePanel.pdf> (Zugriff am 06. 05. 2022).
- [118] A. Morão und F. de Bie. „Life Cycle Impact Assessment of Polylactic Acid (PLA) Produced from Sugarcane in Thailand“. In: *Journal of Polymers and the Environment* Vol. 27 (22. Aug. 2019), S. 2523–2539. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01525-9>.
- [119] C. Moretti, M. Junginger und L. Shen. „Environmental life cycle assessment of polypropylene made from used cooking oil“. In: *Resources, Conservation and Recycling* 157 (2020), S. 104750. ISSN: 0921-3449. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104750>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344920300720>.
- [120] A. Moslehi, A. Ajji, M.-C. Heuzey, A. Rahimizadeh und L. Lessard. „Polylactic acid/recycled wind turbine glass fiber composites with enhanced mechanical properties and toughness“. eng. In: *Journal of applied polymer science* 139.15 (2022), 51934–n/a. ISSN: 0021-8995. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.51934>.
- [121] S. Mukhopadhyay und R. Srikanta. „Effect of ageing of sisal fibres on properties of sisal – Polypropylene composites“. eng. In: *Polymer degradation and stability* 93.11 (2008), S. 2048–2051. ISSN: 0141-3910. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2008.02.018>.
- [122] F. Müller. *Aluminium - Factsheet*. Umweltbundesamt. Mai 2019.
- [123] K. Nakajima, O. Takeda, T. Miki, K. Matsubae, S. Nakamura und T. Nagasaka. „Thermodynamic Analysis of Contamination by Alloying Elements in Aluminium Recycling“. In: *Environmental science & technology* 44.14 (Juli 2010), S. 5594–5600.
- [124] NEN – Nederlandse Norm. *Certification bodies*. 2021. URL: <https://www.biobasedcontent.eu/en/certification/certifying-bodies/> (Zugriff am 26. 04. 2021).
- [125] A. Neuberdt. *Die Alternative "Biokunststoff"*. BIOPRO Baden-Württemberg GmbH. 15. Apr. 2019. URL: <https://www.biooekonomie-bw.de/fachbeitrag/dossier/die-alternative-biokunststoff> (Zugriff am 26. 10. 2021).
- [126] R. Neugebauer, Hrsg. *Biologische Transformation*. Berlin: Springer Vieweg, 2019. ISBN: 978-3-662-58242-8. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58243-5>.
- [127] New media Publisher GmbH. *Rohstoffe und Preise: Preisvergleich*. 11. Mai 2022. URL: [https://plasticker.de/preise/preise\\_monat\\_multi.php](https://plasticker.de/preise/preise_monat_multi.php) (Zugriff am 11. 05. 2022).
- [128] B. Niesing. „Die Zukunft der Stadt“. In: *weiter.vorn - Das Fraunhofer-Magazin* (Apr. 2012), S. 8–13.

- [129] C. Noè, M. Hakkarainen, S. Malburet, A. Graillot, K. Adekunle, M. Skrifvars und M. Sangermano. „Frontal-Photopolymerization of Fully Biobased Epoxy Composites“. eng. In: *Macromolecular materials and engineering* (2022). ISSN: 1438-7492. DOI: <https://doi.org/10.1002/mame.202100864>.
- [130] Norsk Hydro ASA. *Hydro CIRCAL - Aluminium aus recyceltem Verbraucherschrott*. Jan. 2020. URL: <https://www.hydro.com/Document/Doc/Hydro%20CIRCAL%20Brosch%C3%BCre?docId=409785> (Zugriff am 23. 10. 2021).
- [131] Norsk Hydro ASA. *Hydro REDUXA 4.0 - Aluminium mit niedrigen CO<sub>2</sub>-Emissionen*. Apr. 2020. URL: <https://www.hydro.com/Document/Doc/Hydro%20REDUXA%20Brosch%C3%BCre?docId=556410> (Zugriff am 23. 10. 2021).
- [132] NPSP BV. *Biocomposite Bridge*. URL: <https://www.npsp.nl/en/project/biocomposiet-brug> (Zugriff am 28. 04. 2022).
- [133] NPSP BV. *History*. URL: <https://www.npsp.nl/en/history> (Zugriff am 17. 02. 2022).
- [134] NPSP BV. *Nabasco*. URL: <https://www.npsp.nl/en/nabasco> (Zugriff am 31. 03. 2022).
- [135] NPSP BV. *Nabasco Materialen*. URL: <https://www.npsp.nl/en/nabasco-materialen> (Zugriff am 17. 02. 2022).
- [136] K. Oksman, M. Skrifvars und J.-F. Selin. „Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites“. eng. In: *Composites science and technology* 63.9 (2003), S. 1317–1324. ISSN: 0266-3538. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00103-9](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00103-9).
- [137] H. Oliver-Ortega, F. Julian, F. X. Espinach, Q. Tarrés, M. Delgado-Aguilar und P. Mutjé. „6 - Biobased polyamide reinforced with natural fiber composites“. In: *Fiber Reinforced Composites*. Hrsg. von K. Joseph, K. Oksman, G. George, R. Wilson und S. Appukuttan. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. Woodhead Publishing, 2021, S. 141–165. ISBN: 978-0-12-821090-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821090-1.00008-9>.
- [138] *ÖNORM EN 13432:2008 02 01 – Verpackung - Anforderungen an die Verwertung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau - Prüfschema und Bewertungskriterien*. Wien: Austrian Standards, Feb. 2008.
- [139] *ÖNORM EN 13501-1:2020 01 15 – Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten*. Wien: Austrian Standards, Jan. 2020.
- [140] *ÖNORM EN 15534-5:2019 02 01 – Verbundwerkstoffe aus cellulosehaltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) oder Naturfaserverbundwerkstoffe (NFC) genannt) – Teil 5: Anforderungen an Profile und Formteile für Wandbekleidungen (Entwurf)*. Wien: Austrian Standards, Feb. 2019.
- [141] *ÖNORM EN 17228:2019 04 15 – Kunststoffe - Biobasierte Polymere, Kunststoffe und Kunststoffprodukte - Begriffe, Merkmale und Kommunikation*. Wien: Austrian Standards, März 2019.
- [142] *ÖNORM L 1136:2021 04 01 – Vertikalbegrünung im Außenraum - Anforderungen an Planung, Ausführung, Pflege und Kontrolle*. Wien: Austrian Standards, Apr. 2021.
- [143] Österreichisches Institut für Bautechnik. *Erläuternde Bemerkungen zu OIB-Richtlinie 2. OIB-330.2-016/19-004*. Wien, Apr. 2019.

- [144] Österreichisches Institut für Bautechnik. *OIB-Richtlinie 2 - Brandschutz*. OIB-330.2-012/19. Wien, Apr. 2019.
- [145] Österreichisches Institut für Bautechnik. *OIB-Richtlinie 2.3 - Brandschutz bei Gebäuden mit einem Fluchtniveau von mehr als 22 m*. OIB-330.2-015/19. Wien, Apr. 2019.
- [146] Österreichisches Institut für Bautechnik. *OIB-Richtlinien Begriffsbestimmungen*. OIB-330-001/19. Wien, Apr. 2019.
- [147] Pahlke Schaumstoffe: Oskar Pahlke GmbH. *Schaumstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe*. o.D. URL: <https://nachhaltige-schaumstoffe.de/schaumstoffe-auf-basis-nachwachsender-rohstoffe> (Zugriff am 06.05.2022).
- [148] Pahlke Schaumstoffe: Oskar Pahlke GmbH. *Schaumstoffe mit CO<sub>2</sub>-Upcycling*. o.D. URL: <https://nachhaltige-schaumstoffe.de/co2-upcycling-im-kreislaufverfahren> (Zugriff am 08.05.2022).
- [149] M. Pamminger. „Entwicklung eines ökologischen Bewertungsmodells für Begrünungssysteme in Kombination mit PV- Modulen unter Betrachtung des gesamten Lebenszyklus“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2016.
- [150] D. Paraskevas, K. Kellens, W. Dewulf und J. R. Duflou. „Environmental modelling of aluminium recycling: a Life Cycle Assessment tool for sustainable metal management“. eng. In: *Journal of cleaner production* 105 (2015), S. 357–370.
- [151] S. Peters. *Materialrevolution II - Neue nachhaltige und multifunktionale Materialien für Design und Architektur*. Basel: Birkhäuser Verlag, 2014. ISBN: 978-3-03821-454-0.
- [152] J. Pfäffinger. *Stabiles Glashaus. Glas als selbsttragender Wandbaustoff – ein innovatives Projekt bei Novartis in Basel*. 1. Nov. 2007. URL: <https://www.dabonline.de/2007/11/01/stabiles-glashaus/> (Zugriff am 29.01.2022).
- [153] V. Placet. „Characterization of the thermo-mechanical behaviour of Hemp fibres intended for the manufacturing of high performance composites“. eng. In: *Composites. Part A, Applied science and manufacturing* 40.8 (2009), S. 1111–1118. ISSN: 1359-835X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.04.031>.
- [154] J. Preiss. *Leitfaden Fassadenbegrünung*. ger. 2. Ausg. Wien: Magistrat d. Stadt Wien, Programm f. umweltgerechte Leistungen, 2019.
- [155] J. Preiss. *Urban Heat Islands Strategieplan Wien*. ger. 2. Ausg. Wien: Magistrat d. Stadt Wien, Wiener Umweltschutzabteilung - Magistratsabteilung 22, 2015.
- [156] Pressemitteilung Fraunhofer UMSICHT. *Vertikale Begrünung auf Landesgartenschau*. 12. Juli 2018. URL: <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/presse-medien/pressemitteilungen/2018/vertikale-begruenung.html> (Zugriff am 10.12.2021).
- [157] quarks.de. *Darum ist Aluminium nicht gut für die Umwelt*. 13. Sep. 2019. URL: <https://www.quarks.de/umwelt/muell/darum-ist-aluminium-nicht-gut-fuer-die-umwelt/> (Zugriff am 30.07.2021).
- [158] A. Quitadamo, V. Massardier und M. Valente. „Interactions between PLA, PE and wood flour: effects of compatibilizing agents and ionic liquids“. eng. In: *Holzforschung* 72.8 (2018), S. 691–700. ISSN: 0018-3830. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2017-0149>.
- [159] M. Rakotomalala, E. Schlosser und S. Hörold. „Biobasiert und flammwidrig?“ In: *Kunststoffe* (19. Jan. 2015).

- [160] baubook Rechner für Bauteile. *EPS-F (15.8 kg/m<sup>2</sup>) - HBCD-frei*. 16. Mai 2022. URL: <https://www.baubook.at/BTR/?SW=5&LU=1823776638&qJ=10&LP=dxWu2&SB=514400> (Zugriff am 16.05.2022).
- [161] H.-W. Reinhardt. *Ingenieurbaustoffe*. 2. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Apr. 2010. Kap. Kunststoffe. ISBN: 978-3-433-02920-6.
- [162] Resinex Group, Germany. *Rilsan®PA 11 - von Natur aus stark*. URL: <https://www.resinex.de/produkte/rilsan.html> (Zugriff am 09.04.2022).
- [163] Resysta Asia Pte Ltd. *Inspiration*. URL: <https://resysta-asia.com/inspiration/> (Zugriff am 17.02.2022).
- [164] Resysta Asia Pte Ltd. *Products*. URL: <https://resysta-asia.com/products/> (Zugriff am 17.02.2022).
- [165] Resysta International GmbH. *Das Material*. 2018. URL: <https://www.resysta.com/resysta/material.html> (Zugriff am 11.02.2022).
- [166] Resysta International GmbH. *Das Unternehmen*. 2018. URL: <https://www.resysta.com/resysta/unternehmen.html> (Zugriff am 11.02.2022).
- [167] Roschmann Group. *Projektentwicklung GfK am Beispiel Deichmanske Bibliothek*. URL: <https://roschmann.group/de/projektentwicklung-gfk/> (Zugriff am 05.02.2022).
- [168] S. Salchinger. „Biokunststoffe - Anwendungsgebiete und Potentiale von Biopolymerwerkstoffen in der Architektur“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2009.
- [169] A. Sandak, J. Sandak, M. Brzezicki und A. Kutnar. *Bio-based Building Skin*. eng. Springer Open, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-3747-5>.
- [170] M. Schulze. *Basalt: uneerschöpflich und unausgeschöpft*. 10. Jan. 2014. URL: <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/werkstoffe/basalt-unerschöpflich-und-unausgeschöpft/> (Zugriff am 02.04.2022).
- [171] U. Shaikh. *Datei: Dubai Airport overview.jpg*. 17. Dez. 2013. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Dubai\\_Airport\\_overview.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Dubai_Airport_overview.jpg) (Zugriff am 29.01.2022).
- [172] K. Shevory. *Gardens That Grow on Walls*. 5. Mai 2010. URL: <https://www.nytimes.com/2010/05/06/garden/06vertical.html> (Zugriff am 08.04.2022).
- [173] solidian GmbH. *solidian GREENWALL für bessere und nachhaltigere Gebäude*. URL: <https://solidian.com/de/products/solidian-greenwall-de/> (Zugriff am 03.11.2021).
- [174] V. K. Soo, J. Peeters, D. Paraskevas, P. Compston, M. Doolan und J. R. Duflou. „Sustainable aluminium recycling of end-of-life products: A joining techniques perspective“. eng. In: *Journal of cleaner production* 178 (2018), S. 119–132.
- [175] A. Stark. *Neste und Lyondell Basell starten kommerzielle Produktion von biobasierten Kunststoffen*. 23. Juni 2019. URL: <https://www.process.vogel.de/neste-und-lyondell-basell-%20starten-kommerzielle-produktion-von-biobasierten-kunststoffen-a-840327/> (Zugriff am 20.11.2021).

- [176] Studio Marco Vermeulen. *Dinteloord Gas Receiving Station*. URL: <https://marcovermeulen.eu/en/projects/dinteloord+gas+receiving+station/> (Zugriff am 17.02.2022).
- [177] R. Talwar Badam. *Major renovations planned for Dubai Airport's Terminal 1*. 15. Jan. 2013. URL: <https://www.thenationalnews.com/uae/major-renovations-planned-for-dubai-airport-s-terminal-1-1.580115/> (Zugriff am 29.01.2022).
- [178] Tech Metall Erzeugungs Handel und Montage GmbH. *Preisliste*. 2020. URL: [https://www.gruenwand.com/wp-content/uploads/2021/03/Preisliste-Gruenwand\\_2020.pdf](https://www.gruenwand.com/wp-content/uploads/2021/03/Preisliste-Gruenwand_2020.pdf) (Zugriff am 27.04.2022).
- [179] Tech Metall Erzeugungs Handel und Montage GmbH. *System Grünwand*. URL: [https://www.gruenwand.com/wp-content/uploads/2021/03/System\\_Gruenwand.pdf](https://www.gruenwand.com/wp-content/uploads/2021/03/System_Gruenwand.pdf).
- [180] TenCate Geosynthetics Austria GmbH. *TenCate Polyfelt® TS*. URL: <https://www.tencategeo.eu/de/produkte/vliesstoffe/tencate-polyfelt-ts> (Zugriff am 05.05.2022).
- [181] The National UAE. *The changing face of Dubai International Airport, over 50 years - in pictures*. 9. Apr. 2017. URL: <https://www.thenationalnews.com/uae/the-changing-face-of-dubai-international-airport-over-50-years-in-pictures-1.69944> (Zugriff am 29.01.2022).
- [182] C. Theunissen. *Aw: Vlies aus nicht abbaubarem, biobasterten Kunststoff?* Persönliche E-Mail. FKUR Kunststoff GmbH, 11. Mai 2022.
- [183] M. Thielen. *Biokunststoffe*. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2013. 68 S.
- [184] M. Thielen. *Biokunststoffe*. Version 7. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2020. 68 S.
- [185] M. Thielen. „Front Grill of Mazda CX-5“. In: *Bioplastics Magazine* Vol. 13 (Jan. 2018), S. 29.
- [186] C. D. Tracy. „Fire Endurance of Multicellular Panels in an FRP Building System“. Dissertation. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005. DOI: <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-3235>.
- [187] O. Türk. *Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe: Grundlagen - Werkstoffe - Anwendungen*. ger. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. ISBN: 9783834817631. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2199-7>.
- [188] TÜV AUSTRIA – *bio-based contend vs bio-based carbon content*. Kraainem: TÜV AUSTRIA Belgium, Okt. 2019.
- [189] Umweltprobenbank des Bundes. *Phtalate und Ersatzstoffe*. URL: <https://www.umweltprobenbank.de/de/documents/profiles/analytes/10287> (Zugriff am 09.04.2022).
- [190] M. Van den Heuvel. *So lassen sich Duroplaste recyceln*. 27. Juli 2020. URL: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/chemie/so-lassen-sich-duroplaste-recyceln/> (Zugriff am 09.05.2022).
- [191] *Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlamentes und Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates*. März 2011.

- [192] Vertiko GmbH. *Anker - Polygrün-Fassadenanker*. 2018. URL: <https://www.xn--fassadenbegrnung-polygrn-6scl.de/rankhilfen/befestigung/anker> (Zugriff am 01.04.2022).
- [193] Vertiko GmbH. *Diverse Detailpläne und Fachgespräch mit Hrn. Florian Freutel*. Onlinemeeting, 31. März 2022.
- [194] Vertiko GmbH. *Fachinformation - Begrünung mit Kletterpflanzen*. 31. Juli 2021.
- [195] Vertiko GmbH. *Hinweise zur Dimensionierung der Befestigung von Polygrün-Klettergerüsten*. URL: <https://www.xn--fassadenbegrnung-polygrn-6scl.de/rankhilfen/dimensionierung> (Zugriff am 25.03.2022).
- [196] Vienna.at. *Vertikalbegrünung fürs Klima: MA 48-Grünfassade feiert 10. Geburtstag*. 16. Juli 2020. URL: <https://www.vienna.at/vertikalbegruenung-fuers-klima-ma-48-gruenfassade-feiert-10-geburtstag/6678029> (Zugriff am 27.04.2022).
- [197] VinylPlus Deutschland e.V. *Herstellung und Rohstoffe*. URL: <https://www.vinylplus.de/alles-ueber-pvc/herstellung-und-rohstoffe> (Zugriff am 21.11.2021).
- [198] VinylPlus Deutschland e.V. *Verarbeitung und Produkte*. URL: <https://www.vinylplus.de/alles-ueber-pvc/verarbeitung-und-produkte> (Zugriff am 21.11.2021).
- [199] P. Voigt. „Die Pionierphase des Bauens mit glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK)“. Dissertation. Bauhaus Universität Weimar, 23. Mai 2007.
- [200] Vöslauer Mineralwasser GmbH. *Was ist rePET*. 2021. URL: <https://www.repet.com> (Zugriff am 26.11.2021).
- [201] Vynova Group. *Bio-attributed PVC*. 2019. URL: <https://www.vynova-group.com/bio-attributed-pvc> (Zugriff am 21.11.2021).
- [202] S. Walker und R. Rothman. „Life cycle assessment of bio-based and fossil-based plastic: A review“. In: *Journal of Cleaner Production* 261 (2020), S. 121158. ISSN: 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121158>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620312051>.
- [203] S. Wehr-Zenz. *Herausragende Masterarbeit über Regelungstechnik für ein vertikales Begrünungssystem*. 13. Apr. 2021. URL: <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/presse-medien/pressemitteilungen/2021/masterarbeit-biolit-vertical-green.html>.
- [204] D. Wener, G. Pommer, K. Danzinger und S. Pomper. *Studie zum Thema „Brandverhalten von Grünfassaden in großmaßstäblichen Versuchen“*. Hrsg. von Magistratsabteilung 39: Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien. 20. Dez. 2018.
- [205] D. Wener, G. Pommer, K. Danzinger und S. Pomper. *Zweite Studie zum Thema „Brandverhalten von Grünfassaden in großmaßstäblichen Versuchen“*. Hrsg. von Magistratsabteilung 39: Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien. 30. Nov. 2020.
- [206] Wetter.at. *Das sind die kältesten Orte Österreichs*. 27. Feb. 2018. URL: <https://www.wetter.at/wetter/oesterreich-wetter/das-sind-die-kaeltesten-orte-oesterreichs/323827522> (Zugriff am 08.05.2022).
- [207] G. Wypych. *Handbook of Polymers*. eng. 2. Aufl. Toronto: ChemTec Publishing, 2016. ISBN: 978-1-895198-92-8.

- [208] L. Yan, B. Kasal und L. Huang. „A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering“. In: *Composites Part B: Engineering* 92 (2016), S. 94–132. ISSN: 1359-8368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.002>.
- [209] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. *Neuer Hitze-Rekord: 40,5° C in Bad Deutsch-Altenburg*. 9. Aug. 2013. URL: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/neuer-hitze-rekord-40-5deg-c-in-bad-deutsch-altenburg> (Zugriff am 08.05.2022).

# Abbildungsverzeichnis

3.1	Hauptanwendungsgebiete Aluminium . . . . .	25
3.2	Produktionswachstum von Aluminium und Auswirkung auf Recyclingroute . . .	26
a	Weltweite Aluminiumproduktion . . . . .	26
b	Aluminiumbedarf der Baubranche 2012 . . . . .	26
3.3	Begrünungen aus Kunststoff . . . . .	28
a	Kunststoffmodul Fa. Vertical Green . . . . .	28
b	<i>LivePanel</i> Fa. Mobilane . . . . .	28
3.4	Biokunststoff-Moos-Modul des ITKE, Universität Stuttgart . . . . .	29
a	Fassaden-Moos-Modul . . . . .	29
b	Exponat Hannover Messe 2013 . . . . .	29
3.5	System <i>Skyflor</i> <sup>®</sup> . . . . .	30
a	Schematischer Aufbau . . . . .	30
b	Außenfassade . . . . .	30
3.6	Betonfertigteil des IAB Weimar . . . . .	31
3.7	Begrünung <i>Biolit Vertical Green</i> <sup>®</sup> . . . . .	31
4.1	Arten von Kunststoffen nach ihrem chemischen Aufbau . . . . .	33
4.2	Definition von Biokunststoffen . . . . .	34
4.3	Klassifikation Biokunststoffe . . . . .	36
4.4	Zertifizierung DIN CERTCO . . . . .	37
4.5	Zertifizierung TÜV AUSTRIA . . . . .	37
4.6	Vergleich biobasierte Masse und biobasierter Kohlenstoffanteil . . . . .	38
4.7	Maison en Plastique - I. Schein, Y. Magnant, R. Coulon - 1956, Frankreich . . .	41
a	Maison en Plastique - Grundriss . . . . .	41
b	Maison en Plastique - Ansicht . . . . .	41
4.8	Monsanto House of the Future - R. Hamilton, M. Goody, A. Dietz - 1957, USA .	41
a	Monsanto House of the Future - Grundriss . . . . .	41
b	Monsanto House of the Future - Ansicht . . . . .	41
4.9	Fertighaus Doernach - R. Doernach - 1958, Deutschland . . . . .	42
a	Fertighaus Doernach - Grundriss . . . . .	42
b	Fertighaus Doernach - Ansicht . . . . .	42
4.10	Dubai International Airport - B. Broughton, K. Page - 1971, VAE . . . . .	43
a	Dubai International Airport 1971 . . . . .	43
b	Dubai International Airport Dezember 2013 . . . . .	43
4.11	Fußgängerbrücke Kolding - Rambøll Group - 1997, Dänemark . . . . .	43
4.12	Empfangsgebäude Novartis Campus - M. Serra, E. Basler + Partner - 2007, Schweiz	45
a	Konstruktionsschnitt . . . . .	45
b	Ansicht . . . . .	45
4.13	Fußgängerbrücke aus naturfaserverstärktem Biopolymer - Technische Universität Eindhoven - 2016, Niederlande . . . . .	46
a	Veränderlicher Querschnitt einer NFRBP-Brücke . . . . .	46
b	NFRBP-Brücke 18 Monate nach Fertigstellung . . . . .	46

4.14	The Walbrook Building - Foster & Partner - 2010, Großbritannien	47
a	Horizontaler und vertikaler Fassadenschnitt	47
b	Außenansicht	47
4.15	Deichman Bjørvika - Lundhagem, Atelier Oslo - 2020, Norwegen	47
a	3D-Fassadendetail	47
b	Innenfassade bei Montage	47
c	Außenansicht	47
4.16	Fassadenverkleidung der Firma NPSP	48
4.17	Fassadenverkleidung <i>Resysta</i> <sup>®</sup>	49
4.18	<i>Accoya</i> <sup>®</sup> Fassade an Bremer Sporthalle	50
a	<i>Accoya</i> <sup>®</sup> Fassade an Bremer Sporthalle	50
b	Detailansicht Fassade	50
4.19	Fassadenverkleidung mit <i>Tricoya</i> <sup>®</sup>	50
5.1	Preisentwicklung PE	62
5.2	Preisentwicklung PP	64
5.3	Klassifikation von natürlichen und synthetischen Fasern	67
6.1	Bodengebundenes Begrünungssystem <i>Polygrün</i>	74
6.2	Geotextilsystem <i>Living Wall</i>	78
6.3	Trogsystem <i>grünwand</i>	82
6.4	Mattensystem <i>90deGreen</i>	84
7.1	Mögliche Anordnungen für nachweisfreie Fassadenbegrünungen	93

# Tabellenverzeichnis

4.1	Überblick über Kunststoffadditive . . . . .	51
5.1	Lebenszyklusanalyse eines Polylactids . . . . .	58
5.2	LCA verschiedener Polyethylene . . . . .	63
5.3	LCA eines biobasierten Polypropylens . . . . .	64
5.4	Eigenschaften verschiedener Naturfasern und Glasfasern . . . . .	69
6.1	Technische Daten Rankgitter <i>Polygrün</i> [37, 70] . . . . .	75
6.2	Eigenschaften <i>Nabasco 8010</i> , je nach Verstärkungsfasern [134] . . . . .	76
6.3	Produktvergleich EPS- und PLA-Hartschaumplatte . . . . .	86
7.1	Einteilung Gebäudeklassen [146] . . . . .	90
7.2	Allgemeine Anforderungen an das Brandverhalten: VHF . . . . .	91
7.3	Anforderungskatalog . . . . .	98