



Forschungsberichte

itke

38

Carmen Köhler-Hammer

Anwendungsmöglichkeiten
biobasierter Kunststoffe
im Innen- und Außenraum
von Gebäuden

- Beispielhafte Entwicklung





Forschungsberichte

itke

aus dem Institut für Tragkonstruktionen
und Konstruktives Entwerfen,
Universität Stuttgart

Herausgeber:
Professor Dr.-Ing. Jan Knippers

Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen:
Forschungsbericht 38

Carmen Köhler-Hammer:

Anwendungsmöglichkeiten biobasierter Kunststoffe im Innen-
und Außenraum von Gebäuden - Beispielhafte Entwicklung

Stuttgart, Juni 2015

ISBN 978-3-922302-38-4

D 93

© Institut für Tragkonstruktionen
und Konstruktives Entwerfen
Universität Stuttgart
Keplerstraße 11
D-70174 Stuttgart



Alle Rechte, insbesondere der Übersetzung,
bleiben vorbehalten. Vervielfältigung jeglicher Art,
auch auszugsweise, ist nicht gestattet.

Anwendungsmöglichkeiten biobasierter Kunststoffe im Innen- und Außenraum von Gebäuden – Beispielhafte Entwicklung

von der Fakultät Architektur und Stadtplanung der Universität Stuttgart zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) – genehmigte
Abhandlung

vorgelegt von
Carmen Köhler-Hammer
aus Esslingen am Neckar

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers
Mitberichter: Prof. Dr. Thomas Hirth

Tag der mündlichen Prüfung: 28. April 2015

Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen der Universität
Stuttgart, 2015

2015

Vorwort

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers und Herrn Prof. Dr. Thomas Hirth gilt mein Dank für die Übernahme der Begutachtung und Betreuung meiner Arbeit. Besonders hervorheben möchte ich hierbei die Freiheiten, die mir bei der Bearbeitung meiner Dissertation am Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE) gewährt wurden.

An dieser Stelle möchte ich ausdrücklich die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) erwähnen, die die Durchführung des Forschungsvorhabens *„Transparente und transluzente Leichtbauplatten aus vorwiegend nachwachsenden Rohstoffen als Raumgliederungselemente mit Akustikfunktion“* ermöglichte. Die Ergebnisse sind zum großen Teil in die vorliegende Arbeit eingeflossen.

Weiterhin danke ich meinen Kollegen für die angenehme Arbeitsatmosphäre. Insbesondere Petra Heim und Michaela Denzel-Seewald, den guten Seelen des Instituts.

Michael Tondera, Werkstattleiter der Fakultätswerkstatt Architektur, gilt mein Dank für seine motivierte Unterstützung bei allen praktischen Arbeiten, die im Rahmen meiner Arbeit anfielen und sein Interesse am behandelten Thema.

In meiner Zeit am ITKE haben mich zahlreiche studentische Hilfskräfte in den Forschungsprojekten unterstützt. Genannt werden sollen Caroline Wagner, Eva von Dungen, Felix Eiffler, Nicola Haberbosch, Phillip Siedler, Nicole Boesen und Ivayla Krasteva.

Meinem Mann Manfred Hammer danke ich für seine mentale Unterstützung, den Rückhalt und seinem Verständnis besonders in der schlaflosen und kräftezehrenden Endphase zu dritt.

Ergänzend möchte ich Petra Heim und Manfred Hammer für die Zeit danken, die sie sich zum Korrekturlesen meiner Rohfassung genommen haben.

Zu guter Letzt nenne ich meine Eltern, die mich zu einem kritischen, Werte orientierten Menschen erzogen haben und immer für mich da sind – überdies ein herzlicher Dank an meinen Vater für das gemeinsame Ausprobieren mancher Ideen im Vorfeld und an meine Mutter für das liebevolle Babysitten unseres Sohnes.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
Inhaltsverzeichnis	4
Abkürzungsverzeichnis	8
Kurzfassung	10
Abstract	12
1 Einleitung	14
1.1 Hintergrund der Arbeit	14
1.2 Zielsetzung	15
1.3 Aufbau der Arbeit und Vorgehen	15
2 Biobasierte Kunststoffe – Einführung in die Thematik	18
2.1 Begrifflichkeiten: Biokunststoffe und biobasierte Kunststoffe.....	18
2.1.1 Biologische Abbaubarkeit vs. Langlebigkeit und jeweilige Einsatzbereiche	18
2.2 Daten zum Biokunststoffmarkt.....	20
2.3 Kunststoffe aus nachwachsenden Ressourcen? Rohstoffherkunft.....	20
2.3.1 Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion?	21
2.4 Herstellung von biobasierten Kunststoffen.....	22
2.5 Überblick ausgewählter Biokunststoffe	23
2.5.1 Lignin	23
2.5.2 Celluloseacetat (CA).....	24
2.5.3 Cellulose regenerat (CR).....	26
2.5.4 Polylactid (PLA)	27
2.5.5 Bio-Polyethylen (Bio-PE)	29
2.5.6 Poly-Ethylen-Furanoat (PEF) / Bio-Polyethylenterephthalat (Bio-PET)	29
2.5.7 Biobasiertes Polyvinylchlorid (Bio-PVC).....	30
2.5.8 Polyhydroxyalkanoat (PHA).....	30
2.5.9 Polycarbonat mit biobasiertem Weichmacher	32
2.5.10 Biobasiertes Polymethylmethacrylat (Bio-PMMA).....	33
2.6 Übersicht und Vergleich ausgewählter (Bio)Kunststoffe	33
2.7 Ökologische Vorteile biobasierter Kunststoffe.....	35
2.8 Entsorgungsoptionen.....	36
3 Funktionale und ästhetische Anforderungen sowie baurechtliche Situation	38
3.1 Baurechtliche Situation.....	38
3.1.1 Anforderungen an das Brandverhalten	40

3.1.1.1 Außenwände.....	40
3.1.1.2 Trennwände.....	40
3.1.1.3 Brandprüfungen und ableitende Methodik eigener Brandversuche.....	41
3.1.2 Weitere Anforderungen unter Berücksichtigung der Normen	45
3.1.2.1 Außenwandbekleidungen, hinterlüftet (DIN 18516:2010-06).....	46
3.1.2.2 Büromöbel – Raumgliederungselemente (DIN 1023)	47
3.1.2.3 Nicht tragende, innere Trennwände (DIN 4103:2012-05).....	47
3.1.2.4 Dekorative Wandbekleidungen – Rollen und Plattenform (DIN EN 15102:2008-01).....	47
3.1.2.5 Produktnormen zur Orientierung – DIN EN 16240: Lichtdurchlässige, flache Massivplatten aus Polycarbonat (PC) für Innen- und Außenanwendungen an Dächern, Wänden und Decken	48
3.1.2.6 Produktnormen zur Orientierung – E DIN EN 1013 Lichtdurchlässige profilierte Platten aus Kunststoff für Innen- und Außenanwendungen für einschalige Dacheindeckungen, Wand- und Deckenbekleidungen	49
3.1.2.7 Produktnormen zur Orientierung – DIN EN 15534-5: Verbundwerkstoffe aus cellulosehaltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer - Werkstoffe (WPC) oder Naturfaserverbundwerkstoffe (NFC) genannt – Teil 5: Anforderungen an Profile und Formteile für Wandbekleidungen	49
3.1.3 Ästhetische und haptische Anforderungen.....	51
3.2 Zusammenfassung der Anforderungen.....	52
4 Innenanwendung – Beispielhafte Entwicklung	56
4.1 Verwendung erdölbasierter Kunststoffe in Innenräumen	56
4.2 Stand der Technik – Biokunststoffe in Innenräumen.....	57
4.3 Erläuterungen zum Forschungsprojekt ‚Transparente und transluzente Leichtbauplatten aus nachwachsenden Rohstoffen als Raumgliederungselemente mit Akustikfunktion‘.....	60
4.3.1 Vorgehen	60
4.3.2 Projektspezifische Anforderung.....	61
4.3.2.1 Materialrecherche – vorhandene Halbzeuge und verfügbare Granulate	63
4.3.2.2 Technologiescreening	64
4.3.3 Materialauswahl unter Berücksichtigung der Anforderungen und Ergebnisse des Technologiescreenings.....	66
4.4 Modifikationen von PLA und CA zur Anpassung des Werkstoffes für Innenraumanwendungen.....	67
4.4.1 Entzündbarkeit von PLA und CA – Der Sauerstoffindex.....	67
4.4.2 Brandverhalten von Polylactid und Celluloseacetat	68
4.4.3 Stand der Technik – Flammschutzmittel in Biokunststoffen.....	69
4.5 Versuche: Flammschutzmittel und ihre Auswirkungen auf die Lichtdurchlässigkeit und das Brandverhalten des Compounds	70
4.5.1 Auswahl geeigneter Flammschutzmittel.....	70
4.5.2 Weitere Additive und verwendete Biokunststofftypen	71
4.5.3 Versuche mit Triphenylphosphat (TPP)	73
4.5.3.1 Auswirkungen des Flammschutzmittels TPP und weiteren Additiven auf die Lichtdurchlässigkeit	75
4.5.3.2 Ergebnisse der Brandversuche	77
4.5.4 Versuche mit mikroverkapseltem Ammoniumpolyphosphat (APP).....	79
4.5.4.1 Auswirkung des Flammschutzmittels APP auf die Lichtdurchlässigkeit.....	80
4.5.5 Versuche mit aromatischem Sulfonatsalz	81

4.5.5.1	Auswirkung des Flammenschutzmittels Kalium-Diphenyl-Sulfon-Sulfonat auf die Lichtdurchlässigkeit	81
4.5.5.2	Zusammenfassung: Auswirkung verschiedener Flammenschutzmittel auf die Lichtdurchlässigkeit und das Brandverhalten von Polylactid	82
4.6	Verbesserung der Wärmeformbeständigkeit von Polylactid	83
4.6.1	Wärmeformbeständigkeit.....	83
4.6.2	Resultierende Wärmeformbeständigkeit des (modifizierten) Polylactids	84
4.6.3	Nukleierungsmittel als Kristallisationsbeschleuniger	85
4.6.4	Steuerung der Prozessführung zur Erhöhung der HDT	86
4.6.4.1	Resultierende Lichtdurchlässigkeiten	88
4.6.5	Tempern	92
4.7	UV-Beständigkeit von modifiziertem Polylactid	94
4.7.1	Künstliche Bewitterung: Globalstrahlung hinter Fensterglas.....	95
4.7.2	Freibewitterung nach DIN EN ISO 877:2010	97
4.7.3	Veränderung der mechanischen Eigenschaften durch künstliche und natürliche Alterung	99
4.7.3.1	Veränderung der Eigenschaften nach Innenraumlagerung	101
4.7.4	Veränderung der mechanischen Eigenschaften durch Feuchtigkeits- und Temperaturbeanspruchung	102
4.8	Weitere mechanische Eigenschaften von PLA	104
4.8.1	Schlagzähigkeit	104
4.9	Neutralisierung der Gelbstichigkeit durch optische Aufheller	106
4.10	Fazit und Ausblick	108
4.10.1	Herausforderungen des Produktentwicklungsprozesses - Fazit	108
4.10.2	Mögliche Lösungswege zur Realisierung des Akustikmoduls und Ausblick	111
5	Außenanwendungen – Beispielhafte Entwicklung	114
5.1	Verwendung erdölbasierter Kunststoffe in Fassaden	114
5.2	Stand der Technik – Biokunststoffe in Außenanwendungen	115
5.3	Vorgehen	116
5.4	Materialauswahl unter Berücksichtigung der Anforderungen und den Ergebnissen der Alterung	117
5.4.1	Ergebnisse der Witterungsbeständigkeit nicht modifizierter Biokunststoffe.....	117
5.4.2	Materialauswahl unter Berücksichtigung der Anforderungen und der Freibewitterung	118
5.5	Verbesserung des Brandverhaltens von Biokunststoffen zur Anpassung für Fassadenanwendungen	119
5.5.1	Experimenteller Teil: Compoundierung von Polylactid mit Flammenschutzmitteln.....	119
5.5.1.1	Versuche mit rotem Phosphor.....	120
5.5.1.2	Versuche mit Blähgraphit	121
5.5.2	Ergebnisse der Brandtests	122
5.6	Bewitterung modifizierter PLA-Compounds	124
5.6.1	Künstliche Bewitterung	125
5.6.1.1	Farbänderung nach DIN 5033-1.....	126
5.6.1.2	Veränderung des Glanzes nach DIN 67530.....	127
5.6.2	Freibewitterung nach DIN EN ISO 877	128
5.6.3	Veränderung der mechanischen Eigenschaften nach Alterung	129

5.6.4	Veränderung der mechanischen Eigenschaften durch Feuchtigkeits- und Temperaturbeanspruchung	130
5.6.5	Wasseraufnahme des Compounds	131
5.6.5.1	Veränderung mechanischer Eigenschaften nach Wasserlagerung	133
5.7	Fazit – Auswahl eines Compounds	134
5.7.1	Auswahl eines Compounds zur Außenanwendung	134
5.7.1.1	Wärmeformbeständigkeit des ausgewählten PLA-APP-Compounds	135
5.7.1.2	Anteil nachwachsender Rohstoffe des PLA-APP Compounds	136
5.7.1.3	Granulatkosten des PLA-APP-Compounds	136
5.7.2	Weitere mögliche Modifikationen zur Verbesserung der Performance für Außenanwendungen	136
6	Einsatzmöglichkeit biobasierter Kunststoffsysteme in Architekturanwendungen	139
6.1	Zusammenfassung aus beispielhafter Innen- und Außenanwendung und Ausblick	139
6.1.1	Zusammenfassung	139
6.1.2	Ausblick	140
6.2	Gestaltungsmöglichkeiten	142
	Anhang	150
	Erklärung	151
	A.1 Abbildungsverzeichnis	152
	A.2 Tabellenverzeichnis	156
	A.3 Quellenverzeichnis.....	159

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
APP	Ammoniumpolyphosphat
Bio-PE	Biobasiertes Polyethylen
Bio-PE-HD	Biobasiertes Polyethylen hoher Dichte
Bio-PET	Biobasiertes Polyethylenterephthalat
Bio-PP	Biobasiertes Polypropylen
Bio-PVC	Biobasiertes Polyvinylchlorid
BNC	Bakterielle Nanocellulose
BPA	Bisphenol A
CA	Celluloseacetat
CDA	Cellulosediacetat
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CTA	Cellulosetriacetat
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DEHP	Diethylhexylphthalat
DIBP	Diisobutylphthalat
DEP	Diethylphthalat
EG	expandierbarer Graphit
HDT	Heat Deflection Temperature, Wärmeformbeständigkeit
KSS	Kalium-Diphenyl-Sulfon-Sulfonat
LOI	Limiting Oxygen Index
MJ	Megajoule
MWNT	multiwall carbon nanotube, mehrwandige Kohlenstoffnanoröhrchen
NaWaRo	Nachwachsender Rohstoff
NC	Nanoclay
NM	Nukleierungsmittel
OA	Optischer Aufheller
P	Phosphor
PA	Polyamid
PAN	Polyacrylnitril
PC	Polycarbonat
PEF	Polyethylenfuranoat
PET	Polyethylenterephthalat

PETG	Polyethylenterephthalat Glykol
PHA	Polyhydroxyalkanoat
PHB	Polyhydroxybutyrat
PLA	Polylactid
PMMA	Polymethylmethacrylat
PPM	Parts per Million
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVC	Polyvinylchlorid
rF	relative Feuchte
RP	roter Phosphor
SM	Schlagzähigkeitsmodifizierer
SST	Schmelzestabilisator
TPP	Triphenylphosphat
UL-94	Underwriter Laboratories 94
wt %	Gewichtsprzent
Ws	Wattsekunde
WT	Werkzeugtemperatur

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit stellt Anwendungsmöglichkeiten biobasierter Kunststoffe in Gebäuden dar. Dies erfolgt an beispielhaften Modifikationen von Polylactid, einem Milchsäurekunststoff, zur Anpassung für eine Innen- und für eine Außenanwendung.

Kunststoffe werden in der Architektur aufgrund ihrer mannigfachen Gestaltungsmöglichkeit hinsichtlich Lichtdurchlässigkeit, Farb- und Formgebung oder ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit als Baustoff gewählt und finden in dieser Branche zunehmend Absatz.

Die Frage, wie sich Biokunststoffe als Baumaterialien einsetzen lassen, stellt eine zeitgemäße Weiterentwicklung dar. Die Rohstoffsituation lässt es sinnvoll erscheinen, Biomasse vor einer direkten energetischen Verwertung zunächst werkstofflich zu nutzen. Nach Gebrauchsende können biobasierte Werkstoffe, abzüglich ihrer Additive, die nicht auf nachwachsenden Rohstoffen basieren, klimaneutral verbrannt werden.

Für die Entwicklung möglichst transparenter Sandwichplatten zur Raumtrennung in öffentlichen Innenräumen, galt es im Rahmen eines von der DBU geförderten Forschungsprojektes einen biobasierten Kunststoff hinsichtlich seines Brandverhaltens und der Wärmeformbeständigkeit zu optimieren. Die akustisch wirksamen Platten sollen nach der Idee des Projektpartners Nimbus Group auf zwei Halbschalen basieren, deren mikroperforierte Deckschicht spritzgegossen wird.

Die Compoundierung von Polylactid (PLA) mit verschiedenen Flammschutzmitteln zeigte, dass nur Triphenylphosphat (TPP) die optischen Eigenschaften nicht beeinträchtigt. Durch Zugabe von sieben Gewichtsprozent TPP war es auf Materialebene möglich, ein selbst verlöschendes Compound zu entwickeln und die Brandklasse UL-94-V0 zu erreichen.

Einzig durch Erhöhung der Werkzeugtemperatur auf 100 °C und Verlängerung der Kühlzeit von etwa 25 auf 240 Sekunden bei der Formgebung, konnte mit durchschnittlich 80 °C eine ausreichende Wärmeformbeständigkeit (HDT-B) erzielt werden. Diese Maßnahme zur Erhöhung des Kristallisationsgrades von PLA verteuert durch geringere Stückzahlen pro Maschinenstunden die Fertigungskosten. Der Granulatspreis des Compounds hingegen ist konkurrenzfähig.

Der Anteil nachwachsender Rohstoffe im modifizierten Polylactid liegt bei über 90 %.

Nach einer fast dreijährigen Innenraum-Lagerung hinter Fensterglas zeigen sich die Probekörper farblich gleich. Auch die mechanischen Eigenschaften des PLA-TPP-Compounds bleiben unvermindert. Untersucht man jedoch die Prüfstäbe, die aus oben genannten Gründen einer längeren Verweildauer im Werkzeug bei höherer Temperatur ausgesetzt waren, so zeigt sich die Streckspannung um ca. 23 % und die Streckdeh-

nung um etwa 11 % vermindert. Thermostabilisatoren würden hier das Compound vor Prozesswärme schützen und die Dauerhaftigkeit erhöhen.

Es hat sich gezeigt, dass es möglich ist, Polylactid für eine Innenraumanwendung anzupassen. Die Verbesserung des Brandverhaltens und der Wärmeformbeständigkeit unter Berücksichtigung der Lichtdurchlässigkeit ist realisierbar, jedoch unwirtschaftlich.

Bei der exemplarischen Modifikation von Polylactid für Fassadenplatten konnte mit den umweltfreundlichen Flammschutzmitteln Ammoniumpolyphosphat (APP) sowie mit rotem Phosphor auf Materialebene jeweils ein schwer entflammbarer Werkstoff konzipiert werden.

Während der 18-monatigen Freibewitterung sinkt die Streckdehnung um etwa 12%. Die Streckspannung nimmt nicht ab. Die mechanischen Eigenschaftsverluste nach der Alterungssimulation durch Globalstrahlung sind in etwa 9 % höher als Polycarbonat (PC). Die untersuchte PC-Type enthält allerdings neben dem Flammschutz bereits einen UV-Stabilisator. Bei PC wurde eine größere Farb- und Glanzänderung durch die künstliche Alterung ermittelt als beim modifizierten Polylactid, welches kein UV-Schutz enthält.

Die Wasseraufnahme des PLA-APP-Compounds liegt bei 0 %. Nach zehn Tagen Wasserlagerung sind keine mechanischen Eigenschaftsverluste zu verzeichnen. Die durchschnittlich ermittelte Wärmeformbeständigkeit beträgt 79 °C (HDT-B). Um diese oder eine höhere HDT-B zu erreichen, muss der Werkstoff thermisch durch Tempern oder einer Weiterbearbeitung durch Vakuumverformen nachbehandelt werden. Möglich wäre auch das langsame Abkühlen der Platten bei der Extrusion.

Für Außenanwendungen erscheint das entwickelte, opake Material geeignet. Brandversuche auf Bauteilebene müssen dessen ungeachtet noch durchgeführt werden.

Das mit Ammoniumpolyphosphat modifizierte Polylactid basiert zu etwa 88% auf nachwachsenden Rohstoffen. Der Polymerpreis ist annähernd mit dem von Polycarbonat zu vergleichen.

Abstract

The study demonstrates potential applications for bio-based plastics in buildings. This is done using examples of polylactide modifications, a lactic acid plastic which can be adapted for interior and exterior application.

Plastics are architectural building materials chosen for their diverse scope for design in relation to translucency, colouring and shaping or their minimal heat conductivity and are increasingly finding a ready market in this sector.

The question of how bioplastics could be implemented as building materials represents a topical further development. The raw material situation appears to make it sensible to at first mechanically recycle biomass from a direct energy recovery. After the end of its useful life, bio-based materials can be burned climate-neutrally, minus the inorganic additives.

To develop sandwich composite panels that are as transparent as possible for use as room dividers in public interior spaces in the context of a German Environment Foundation (DBU) research project, a bio-based plastic needed to be optimised with regard to its fire behaviour and heat resistance. Based on an idea by the project partner Nimbus Group, the acoustically effectively panels are to be based on two half-shells in which the micro-perforated surface layer will be injection moulded.

The compounding of polylactide (PLA) with various flame retardants shows that only triphenylphosphate (TPP) does not compromise the optical characteristics. With the addition of seven weight percentages of TPP, it was possible on a material level to develop a self-extinguishing compound and to achieve a flammability rating of UL-94-V0.

Only by raising the mould temperature to 100 °C and lengthening the cooling period from around 25 to 240 seconds during the shaping could sufficient heat resistance (HDT-B), with an average of 80 °C, be achieved. This measure to increase the crystallisation level of PLA increases unit costs due to the lower number of units per machine hour. The transparent polylactide becomes translucent as the translucency reduces with increasing levels of crystallisation. The milky matte optics are nonetheless acceptable.

The proportion of renewable materials in modified polylactide is above 90 %.

After almost three years' interior storage behind window glass, the samples exhibit identical colour. The mechanical properties of the PLA-TPP compound also remain unimpaired. However, when examining the test pieces which have been exposed in the mould for longer periods of time and at higher temperatures for the reasons mentioned above, the yield stress is reduced by approx. 23 % and the yield strain by around 11 %. Thermostabilisators would protect the compound from process heat and increase durability here.

It has been shown that it is possible to adapt polylactide for interior application. The improvement in fire behaviour and heat resistance, taking into account translucency, is feasible, but not economical.

In the polylactide modification example for facing tiles, using the environmentally friendly flame retardants ammoniumpolyphosphate (APP) and red phosphorus, it was possible to devise a heavily flame resistant substance on a material level.

During 18 months of outdoor weathering, the yield strain reduces by around 12 %. The yield stress diminishes. The mechanic property losses following the ageing simulation through global radiation are around 9 % higher than polycarbonate (PC). The PC type does, however, contain a UV stabiliser in addition to flame retardant. Due to artificial ageing, a greater change in colour and lustre was detected in the PC than in the modified polylactide which contains no UV protection.

The water absorption of the PLA-APP compound is 0 %. After ten days of storage in water no mechanical property losses are recorded. The average heat resistance detected amounts to 79 °C (HDST-B). In order to achieve this or a higher HDT-B, the substance would need to be thermally cured by tempering or further processing using vacuum forming. Slow cooling of the panels during extrusion would also be possible.

The opaque material that has been developed appears suitable for exterior applications. Fire tests on a component level still need to be carried out irrespective of this.

Polylactide modified with ammoniumpolyphosphate is based on around 88 % renewable materials. The commodity price is closely comparable to that of polycarbonate.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund der Arbeit

Während im bautechnischen Bereich Kunststoffe für Rohre, Abdichtungen, Dampfsperren oder Dämmungen unabdingbare Materialien darstellen, wächst der Einsatz dieser Werkstoffklasse für Bekleidungselemente im Innen- und Außenraum sowie für raumabschließende Strukturen. Dies mag zum einen daran liegen, dass aufgrund neuartiger digitaler Planungs- und Fertigungsmethoden vermehrt Gebäude mit freien Geometrien entworfen werden, die sich häufig nur mit Kunststoff verwirklichen lassen. Zum anderen sprechen auch weitere Vorzüge wie die Korrosionsbeständigkeit, die gestalterische Vielseitigkeit, die geringe Wärmeleitfähigkeit oder das geringe Gewicht, verglichen mit beispielsweise Glas, für diesen Baustoff.

Nachteilig erscheinen jedoch die Entsorgungsoptionen. Bauteile aus thermoplastischen Kunststoffen sind zwar im Vergleich zu duroplastischen Verbänden recycelbar, allerdings führen kunststoffübliche Abbauvorgänge während der längeren Nutzungsphase, sowie eine erneute thermische und mechanische Belastung durch Shreddern und Aufschmelzen zur weiteren Minderung des Eigenschaftsniveaus. Die notwendige Zugabe von Additiven und Aufbereitungsmaßnahmen sind aus ökonomischer und ökologischer Sicht oft keine Alternative, wodurch Alt-Kunststoffbauteile meist thermisch verwertet werden.

Zudem stellt Erdöl als Grundlage für die Kunststoffherstellung eine endliche Ressource dar, wodurch auch stetig steigende Ölpreise resultieren. Interessant wären demzufolge Polymere, die auf nachwachsenden und somit unbegrenzt vorhandenen Rohstoffen basieren.

Positiv erscheint des Weiteren die Gewinnung CO₂-neutraler Energie bei der Verbrennung biobasierter Kunststoffe nach Ende der Nutzungsphase. Hierbei wird, abzüglich erdölbasierter Additive, die gleiche Menge an Kohlenstoffdioxid freigesetzt, die die Pflanzen beim Wachstum umgesetzt haben. In Anbetracht der Rohstoffsituation erscheint eine vorherige werkstoffliche Nutzung von Biomasse, statt einer direkten energetischen Nutzung sinnvoll (Kaskadennutzung).

Biokunststoffe etablierten sich bisher aufgrund ihrer Kompostierbarkeit vornehmlich in der Verpackungsindustrie. Doch hauptsächlich in der Elektronik- und Automobilbranche wächst der Einsatz biobasierter Kunststoffe für Bauteile mit einer längeren Anwendungsdauer. Demgemäß stellt sich die Frage, ob und wie Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen im Bauwesen Verwendung finden können.

1.2 Zielsetzung

Der Fokus dieser Arbeit liegt, unter Berücksichtigung der Anforderungen, auf der Werkstoffauswahl, teilweisen Modifikation und daraus resultierenden Eigenschaften von Biokunststoffen für nicht tragende innere Wände und Bekleidungen nicht tragender innerer und äußerer Wände. Die genannten Bauteile sind dazu rein mengenmäßig im Gebäude am bedeutsamsten. Ob sich biobasierte Kunststoffe und Bioverbundwerkstoffe in tragenden Strukturen einsetzen lassen, müsste man in einem weiteren Schritt untersuchen.

Um die grundsätzliche Verwendbarkeit biobasierter Kunststoffe in Bauwerken zu prüfen, erscheint zunächst die exemplarische Anwendungskonzeption sowie die Materialentwicklung für ein Bauteil im Innenraum mit überschaubaren Anforderungen sinnvoll.

Dabei gilt es, die Vorzüge biobasierter Kunststoffe im Vergleich zu natürlich vorkommenden und somit auch ‚biobasierten‘ Werkstoffen wie Holz oder Stroh zu akzentuieren. Zu nennen wären hier beispielsweise die freie Formbarkeit, Lichtdurchlässigkeit, Gestaltungsfreiheit, die Optionen einer für die Anwendung maßgeschneiderten Herstellung und darauf angepassten Eigenschaften ebenso die Möglichkeit zur Funktionsintegration.

Aus diesem Ansatz entstand das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderte Forschungsprojekt 'Transparente und transluzente Leichtbauplatten aus vorwiegend nachwachsenden Rohstoffen als Raumgliederungselemente mit Akustikfunktion' (siehe auch *Kapitel 4 Innenanwendung – beispielhafte Entwicklung*). Auf Materialebene soll unter Berücksichtigung der Anwendungs-, und Nutzeranforderungen ein geeigneter biobasierter Kunststoff identifiziert werden, welcher dann hinsichtlich seiner Eigenschaften an den Einsatzbereich angepasst wird. Dabei gilt es einen konkurrenzfähigen Prototyp eines transparenten bis transluzenten Akustikmoduls mit hohem Designanspruch zu entwickeln, der zu über 80 % aus nachwachsenden Rohstoffen besteht.

Ziel der Arbeit ist überdies, eine Aussage zu treffen, ob und mit welchen Modifikationen biobasierte Kunststoffe im Außenraum von Gebäuden Anwendung finden können (Kapitel 5). Hierzu soll ein biobasierter thermoplastischer Kunststoff für eine exemplarische Außenanwendung hinsichtlich des Brandverhaltens optimiert werden. Anschließende Materialprüfungen sollen Auskunft zur Verwendbarkeit liefern.

1.3 Aufbau der Arbeit und Vorgehen

- 1. Kapitel:** Die Einleitung umfasst Hintergrund, Zielsetzung und Aufbau der Arbeit.
- 2. Kapitel:** Zunächst erfolgen eine Einführung in die Thematik der Biokunststoffe, die Darstellung der gängigsten biobasierten, thermoplastischen Kunststoffe mit ihren Eigenschaften sowie den aktuellen Stand der Technik.

3. Kapitel: Hier werden technische und ästhetische Anforderungen sowie gesetzliche Regelungen an Bauteile bei Innen- und Außenanwendungen je nach Gebäudeklasse dargestellt.

4. Kapitel: Dieses Kapitel betrachtet Innenraumanwendungen. Dies erfolgt beispielhaft an der Entwicklung einer transparenten bis transluzenten Leichtbauplatte aus Biokunststoffen, einem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungsprojekt, welches gemeinsam mit dem Projektpartner Nimbus Group durchgeführt wurde. Unter Berücksichtigung der in Kapitel 3 genannten wie auch spezifischen Anforderungen aus Unternehmenssicht, erfolgt die Auswahl eines Biokunststoffs, der hinsichtlich seiner Eigenschaften an eine Anwendung im öffentlichen Innenraum angepasst wird. Dabei soll das Brandverhalten ebenso die Wärmeformbeständigkeit und die ästhetische Erscheinung (Lichtdurchlässigkeit, Beseitigung Gelbstich) optimiert werden. Durch Innenraumlagerung, Freibewitterung und dem künstlichen Bestrahlen der Probekörper nach EN ISO 4892 wird die Dauerhaftigkeit (UV-Beständigkeit etc.) untersucht. Die Veränderung der Eigenschaften wird anhand der Streckspannung und Streckdehnung vor und nach den Umweltsimulationen dargelegt.

5. Kapitel: Sollen Bauteile aus biobasierten Kunststoffen im Außenraum Anwendung finden, werden diese mit zusätzlichen Belastungen wie Feuchte- und Temperaturwechsel oder direkter Sonnenstrahlung konfrontiert.

Der für die beispielhafte Innenanwendung verwendete Biokunststoff Polylactid wird aufgrund seines geringen Preises, der Verfügbarkeit und der geringen Eigenschaftsverluste durch Freibewitterung als Ausgangsmaterial für die Konzeption einer Außenanwendung gewählt und hinsichtlich seines Brandverhaltens optimiert. Die Aufrechterhaltung der Lichtdurchlässigkeit ist hierbei irrelevant. Es erfolgt die Ermittlung der Wärmeformbeständigkeit.

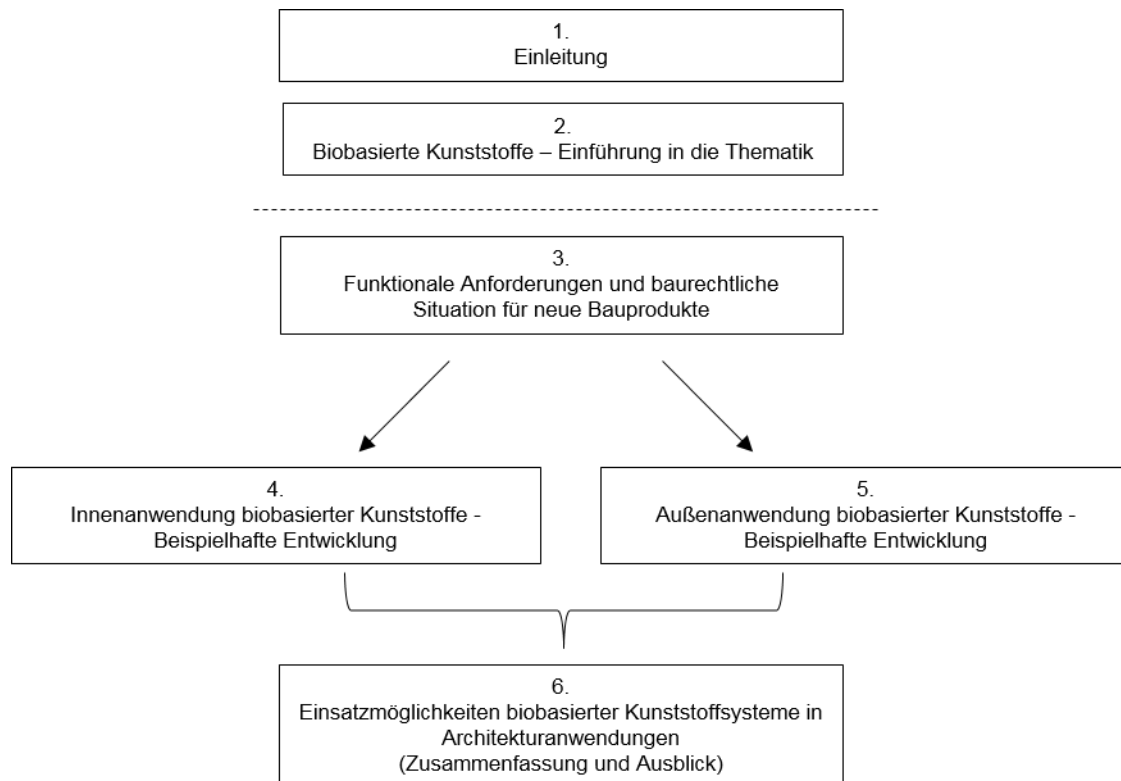
Anschließend wird die Veränderung der hergestellten Probekörper hinsichtlich Optik, Haptik und mechanischer Eigenschaften dargestellt.

Zusätzliche Modifikationen zur Verbesserung der Performance für Außenanwendungen werden beschrieben.

Die vorliegende Arbeit behandelt thermoplastische Biokunststoffe. Dies liegt darin begründet, dass sich biobasierte Duroplaste für die in Kapitel 4 beschriebene, beispielhafte Entwicklung einer Akustikplatte als nicht geeignet erwiesen. Näheres hierzu kann dem Kapitel 4.3.3 *Materialauswahl unter Berücksichtigung der Anforderungen und Ergebnisse des Technologiescreenings* entnommen werden. Zur Konzeption der Außenanwendungen (Kapitel 5) liegt es nahe, den bisher adaptierten Biokunststoff unter einem erweiterten Anforderungsspektrum zu betrachten.

6. Kapitel: Hier werden unter Bezug auf die Kapitel 4 (Innenraumanwendung) und Kapitel 5 (Außenanwendung) die Einsatzmöglichkeiten biobasierter Kunststoffe zusammengefasst und Gestaltungsmöglichkeiten gezeigt.

Dabei werden ebenfalls weiterhin zu bewältigende Herausforderungen, die Darlegung noch zu untersuchender Aspekte ferner das Zukunftspotential aus Sicht des Verfassers dargestellt.



2 Biobasierte Kunststoffe – Einführung in die Thematik

2.1 Begrifflichkeiten: Biokunststoffe und biobasierte Kunststoffe

Nach dem Branchenverband European Bioplastics [1], der Vereinigung der industriellen Hersteller, Verarbeiter und Anwender von Biokunststoffen und biologisch abbaubaren Werkstoffen und daraus hergestellter Produkte in Europa, handelt es sich bei Biokunststoffen sinngemäß um folgende Werkstoffe:

- Zum einen sind dies biologisch abbaubare Kunststoffe, die den Nachweis der Kompostierbarkeit nach der Norm EN13432 erfüllen. Diese Biokunststoffe sind nicht zwingend aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt. Sie können auch erdölbasiert sein.
- Als Biokunststoffe werden auch Kunststoffe bezeichnet, die auf der Basis nachwachsender Rohstoffe hergestellt werden. Hierbei gibt es jedoch keinen Mindestanteil. Die biobasierten Kunststoffe können kompostierbar oder auch nicht biologisch abbaubar sein.

Biokunststoffe sind demnach biobasiert, biologisch abbaubar oder beides zugleich.

Die hier vorliegende Arbeit thematisiert biobasierte thermoplastische Kunststoffe.

2.1.1 Biologische Abbaubarkeit vs. Langlebigkeit und jeweilige Einsatzbereiche

Bei biologisch abbaubaren Kunststoffen, die aus nachwachsenden Rohstoffen, Erdöl oder beidem hergestellt wurden, steht die Kompostierbarkeit im Vordergrund. Sie finden in Anwendungen mit kurzer Funktionsdauer Verwendung (*Abb. 1*). Dies wären zum Beispiel Verpackungen, in der Landwirtschaft verwendete Mulchfolien und Pflanztöpfe oder auch Cateringartikel. Kompostierbare Kunststoffe werden eingesetzt, damit etwa verdorbenes Obst und Gemüse mit seiner Verpackung preisgünstiger in Kompostierungsanlagen entsorgt werden kann.

Bei den aus nachwachsenden Rohstoffen (NaWaRo) hergestellten Kunststoffen werden längere Funktionszeiten anvisiert. Der biologische Abbau ist nicht Gegenstand des Materialkonzeptes, wohingegen der Nachhaltigkeitsaspekt zu Marketingzwecken relevant erscheint. Biobasierte, langlebige Kunststoffe sind bisher vor allem in der Elektronik- und Automobilindustrie vertreten (*Abb. 2*).



Abb. 1 Flasche aus kompostierbarem Kunststoff [2]



Abb. 2 Gyy Netbook von iUnika, Gehäuse aus biobasiertem Kunststoff [3]

Um Vorteile verschiedener erdöl- und biobasierter Biokunststoffe zu nutzen, sowie deren Nachteile, wie z.B. Sprödigkeit auszugleichen, werden Biokunststoffe unabhängig ihrer Rohstoffherkunft und Kompostierbarkeit häufig gemischt. Hierbei handelt es sich um Blends oder Compounds [4].

Zusammenfassend wird festgehalten, dass für die Bioabbaubarkeit lediglich die molekulare Struktur des Kunststoffes als entscheidend gilt. Die Rohstoffherkunft ist nicht relevant [5] [6]. Als Beispiel seien hier überdies die klassischen Kunststoffe Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) oder auch Polyethylenterephthalat (PET) genannt. Sie können nicht biologisch abgebaut werden – unabhängig davon, ob sie erdölbasiert oder biobasiert hergestellt wurden. Bei solchen als Drop-in-Lösungen bezeichneten Biokunststoffen werden die petrochemischen Rohstoffkomponenten durch biogene Rohstoffe ersetzt. Der Syntheseweg wird beibehalten [7].

Die folgende Abbildung zeigt anhand von Beispielen, dass es biobasierte, erdölbasierte und jeweils gemischtbasierte Kunststoffe gibt, die kompostierbar sein können oder auch nicht biologisch abbaubar sind.

Basis	biologisch abbaubar	nicht biologisch abbaubar
erdölbasiert	Copolyester (Ecoflex®)	Polypropylen (PP)
	Polycaprolacton (PCL)	Polyamid (PA6) Epoxidharz (EP)
Mischung (Blend)	Thermoplastische Stärke (TPS)	Epoxidharz auf Pflanzenölbasis (Bio-EP) Celluloseacetat
	Polyactid (PLA)	Cellulose regenerat (CR)
biobasiert	Polyhydroxybutyrat (PHB)	Bio-Polyethylen (Bio-PE)
	Lignin	Bio-Polypropylen (Bio-PP)

Abb. 3 Rohstoffherkunft und biologische Abbaubarkeit ausgewählter Biokunststoffe [8]

Die hier aufgeführten biobasierten Kunststoffe werden im *Kapitel 2.5 Überblick ausgewählter Biokunststoffe* teilweise beschrieben.

2.2 Daten zum Biokunststoffmarkt

2012 wurden weltweit ca. 1,4 Millionen Tonnen Biokunststoffe produziert [9]. Dies entspricht ungefähr 0,5 % der weltweiten Kunststoffproduktion von ca. 288 Millionen Tonnen [10]. Der Branchenverband European Bioplastics prognostiziert für 2017 ein Produktionsvolumen von über 6 Millionen Tonnen. Am stärksten werden dabei die biobasierten, nicht-biologisch abbaubaren Biokunststoffe wachsen [11].

Vor allem Drop-In-Lösungen, also Massenkunststoffe wie PE oder insbesondere PET, die biobasiert unter Nutzung bekannter Synthesewege erdölbasierter Pendanten hergestellt werden, bauen große Produktionsanlagen auf.

89,8 % der für das Jahr 2017 prognostizierten Biokunststoffproduktion von 6,2 Millionen Tonnen wird dabei in Südamerika (44 %) und Asien (45,8 %) erfolgen [12].

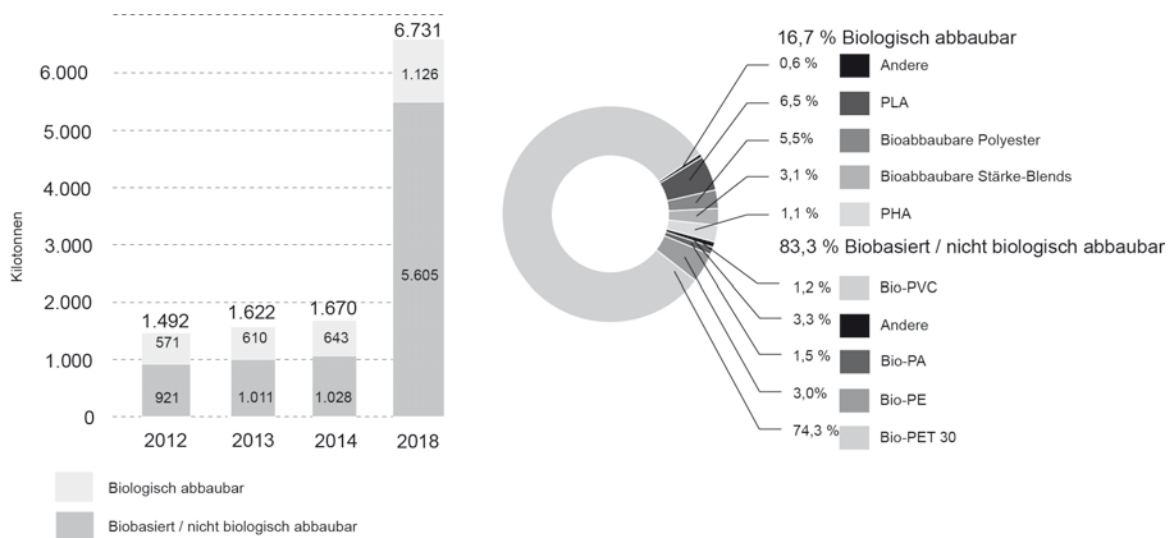


Abb. 4 Weltweite Produktionskapazitäten für Biokunststoffe [13]

Abb. 5 Weltweite Produktionskapazitäten für Biokunststoffe nach Materialtyp im Jahr 2017 [14]

2.3 Kunststoffe aus nachwachsenden Ressourcen? Rohstoffherkunft

Mittels Photosynthese bauen Pflanzen Kohlenstoffdioxid und Wasser in kohlenstoffreiche organische Verbindungen um. Kunststoffe, die biobasiert sind, werden aus vorwiegend nachwachsenden Rohstoffen (NaWaRos) wie z.B. Stärke, Zucker, Cellulose oder

Pflanzenölen hergestellt. NaWaRos sind erneuerbare pflanzliche Ressourcen, die stofflich oder energetisch verwendet und nicht für Nahrung von Mensch und Tier eingesetzt werden [15]. Darunter fallen beispielsweise zucker- und stärkehaltige Ackerpflanzen wie z.B. Zuckerrüben, Zuckerrohr oder Mais, Faserpflanzen wie Hanf oder Flachs; Ölsaaten wie z.B. Raps, Soja oder Rizinus, Gräser und Getreidestroh.

2.3.1 Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion?

Da die globalen, landwirtschaftlich nutzbaren Böden begrenzt sind, stehen Biokunststoffe wegen der Nutzungskonkurrenz dieser Flächen in der Kritik. Nach Schätzungen des Branchenverbandes European Bioplastics beträgt das Produktionsvolumen im Jahr 2017 ungefähr 6 Millionen Tonnen, für deren Erzeugung nur 0,02 % der weltweiten landwirtschaftlich nutzbaren Fläche beansprucht werden [16] [17].

Des Weiteren wird es in naher Zukunft möglich sein, aus Biomasse-Reststoffen großtechnisch Rohstoffe für die Fabrikation von Biokunststoffen zu gewinnen. Analog einer Erdölraffinerie, die aus Rohöl beispielsweise Benzin oder Naphta destilliert, gewinnt man bei der Bioraffinerie aus Biomasse und Biomasse-Reststoffen wie Stroh, Grasabfällen, Kartoffelschalen etc. der Agrar-, Lebensmittel- oder Kosmetikindustrie Stärke, Zucker, Lignin, Cellulose, Pflanzenöl, Pflanzenfasern, Synthesegas oder Biogas [18]. Dabei gilt es den Rohstoff Biomasse möglichst vollständig zu verwerten.

Bisher gibt es weltweit, so auch in der EU, einige Pilotanlagen. Die Demonstrationsanlage Utzenaich in Niederösterreich, die seit dem Jahr 2009 existiert, gewinnt pro Stunde aus vier Tonnen Gras ungefähr 100-400 Liter Grassaft. Dieser besteht überwiegend aus Milchsäure und Aminosäuren, die wichtige Grundstoffe für die Industrie darstellen. Die Milchsäure kann beispielsweise für die Herstellung des Milchsäurekunststoffes Polylactid verwendet werden (siehe auch 2.5.4) [19].

In der Schlachtindustrie fallen europaweit jährlich 500.000 Tonnen Fette an, die bisher vor allem thermisch verwertet werden. Im EU-Projekt ANIMPOL (2010-2012) gelang es unter Federführung von Martin Koller der TU Graz diese Reststoffe für die Herstellung von Polyhydroxyalkanoaten, das sind biobasierte Polyester, durch Bakterien nutzbar zu machen [20] [21] (siehe auch 2.5.8 *Polyhydroxyalkanoat (PHA)*). Die Ausbeute kann dabei bis zu 200.000 Tonnen betragen.

Weiterhin können Algen Grundbausteine für die die Polymerisation von Biokunststoffen generieren. Hierzu gibt es mehrere Ansätze. Im Forschungsprojekt SPLASH des 7. EU-Rahmenprogramms gewinnt man ohne Zerstörung der Algenzellen aus den Ausscheidungen von Grünalgen der Gattung »*Botryococcus braunii*« mittels Umkehrosiose Zucker und andere Kohlenwasserstoffe [22], [23]. In Fassaden integriert, könnten so beispielsweise landwirtschaftlich nutzbare Flächen geschont oder anderweitig genutzt werden, indem Städte als „vertikale Fabriken“ fungieren.

2.4 Herstellung von biobasierten Kunststoffen

Für die Herstellung biobasierter Kunststoffe existieren mehrere Herstellungswege.

Zum einen können sie mittels Modifikation natürlich vorkommender Biopolymere wie etwa Cellulose und Stärke hergestellt werden. Beispielgebend wäre das Celluloseacetat (siehe 2.5.2).

Zum anderen können mit Hilfe biotechnologischer Verfahren aus Ausgangsubstraten wie Stärke oder Glucose Monomere (Grundbausteine) synthetisiert werden, die dann polymerisiert zu Biokunststoffen führen. Auf diese Weise können Polylactid (*Kapitel 2.5.4*) oder das Bio-Polyethylen (*Bio-PE, Kapitel 2.5.5*) produziert werden. Dieser Syntheseweg ermöglicht größere Einstellmöglichkeiten und meist auch höhere Bioanteile im Werkstoff als bei der bloßen Modifikation von nachwachsenden Rohstoffen (NaWaRos) zu Kunststoffen.

Das Zurückgreifen auf nachwachsende Rohstoffe anstelle von Rohöl unter Verwendung desselben Synthesewegs zur Herstellung eines Kunststoffes nennt man Drop-In [24]. Dies trifft für biobasiertes PE, PP oder PET zu.

Weiterhin existieren Bakterien, die Zucker oder Glycerin direkt zu Biokunststoffen, wie beispielsweise Polyhydroxyalkanoate (*PHA, 2.5.8*), umbauen.

Tabelle 1 Übersicht zu Herstellungsverfahren biobasierter Kunststoffe [25]

Verfahren/ Rohstoffe	Beispiele biobasierter Kunststoffe
Modifizierung von nachwachsenden Rohstoffen	Celluloseacetat (CA)
	Celluloseregenerat (CR)
	Thermoplastische Stärke (TPS)
Chemische Synthese biotechnologisch hergestellter Polymerrohstoffe	Polylactid (PLA)
	Bio-Polyethylen (Bio-PE)
	Polyethylenfuranoat (PEF)
Direkte Biosynthese der Polymere	Polyhydroxyalkanoat (PHA): z. Bsp.
	Polyhydroxybutyrat (PHB)

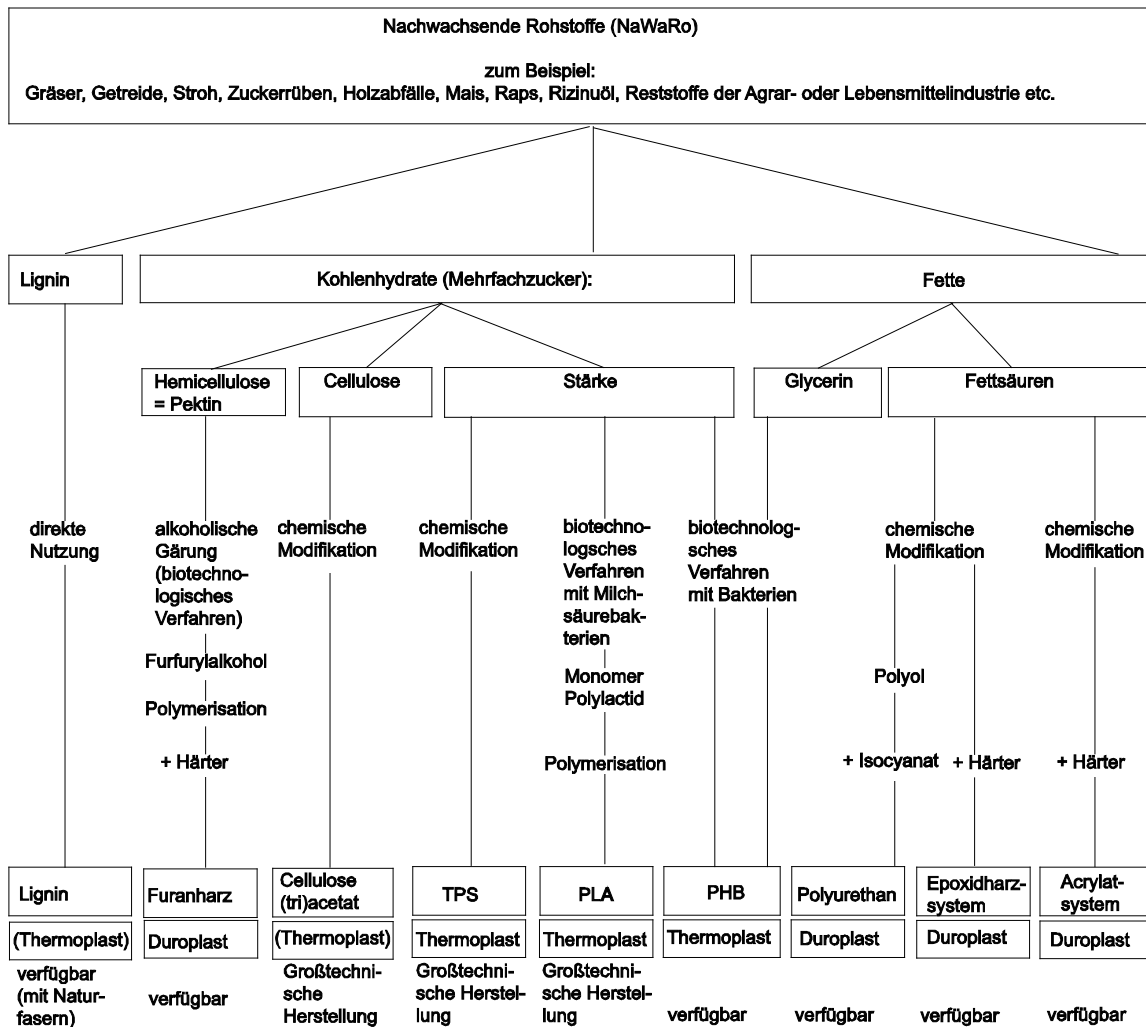


Abb. 6 Biobasierte Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen [26]

2.5 Überblick ausgewählter Biokunststoffe

2.5.1 Lignin



Abb. 7 Organosolv-Lignin nach Fällung und Filtration auf der Filterpresse © Fraunhofer CBP [27]

Abb. 8 Wandbekleidung aus Lignin: Kokosnuss-Mosaik Ekobe © reformafacil/ brasil [28]

Herstellung und Verwendung: Lignin ist für die Verholzung von Pflanzen verantwortlich. Es wird in die Zellwände von Pflanzen eingebaut und fungiert als druckfeste Matrix, wohingegen Cellulosefasern als Gerüstsubstanz die Abtragung der Zugkräfte übernehmen. Lignin gehört nach der Cellulose zu den am häufigsten vorkommenden natürlichen Verbindungen und fällt vorwiegend als Nebenprodukt der Zellstoffindustrie an. Holz besteht je nach Art zu 20-30 % aus Lignin. Bei Kokosnussschalen sind das beispielsweise ungefähr 50 %. Lignin ist das einzige, natürlich vorkommende Biopolymer, welches direkt eingesetzt werden kann. Auf dem Markt ist es lediglich als Ligninwerkstoff erhältlich, welcher zusätzlich natürliche Kurzfasern enthält.

Eigenschaften: Das Biopolymer ist dunkelbraun opak und absorbiert ultraviolette Strahlung fast vollständig, wodurch Abbaureaktionen eingeleitet werden (siehe auch 5.4. *Witterungsbeständigkeit nicht modifizierter Biokunststoffe*).

Aufgrund der ähnlichen Zusammensetzung von Holz und Ligninwerkstoffen ergibt sich ein vergleichbarer Wärmeausdehnungskoeffizient, wodurch sich ein UV-geschützter Lignin-Faserverbundwerkstoff als Verbindungsmittel im Holzbau eignen könnte [29]. Die Dichte von Ligninwerkstoffen wie beispielsweise Arboform® ist mit 1,3 – 1,4 g/cm³ [30] in etwa doppelt so hoch wie bei Holz.

Stand der Technik: Anstelle der direkten Verwendung in Innen- und Außenräumen verfügt Lignin vielmehr über ein Potential als Füllstoff oder als Ausgangsmaterial für die Erzeugung von preiswerten biobasierten Carbonfasern als Ersatz für erdölbasiertes Polyacrylnitril (PAN) [31] [32], für die Herstellung von Polyamid [33] oder auch für die Herstellung von biobasierten duroplastischen Harzen [34].

2.5.2 Celluloseacetat (CA)



Abb. 09 Schutzscheibe aus Cellulose-Acetat [35]

Abb. 10 PC-Maus mit einem biobasierten Werkstoffanteil von 45% -Fujitsu M440 ECO © Fujitsu [36]

Abb. 11 NeCycle™, Celluloseacetat aus Cashewnuss-Schalen © NEC Corporation

Herstellung und Verwendung: Celluloseacetat (CA) gehört zu den Celluloseestern. Cellulose, welches als Hauptbestandteil von pflanzlichen Zellwänden die häufigste nachwachsende Verbindung [37] darstellt, wird mit einer Säure (z.B. Essigsäure oder Essigsäureanhydrid) zu Cellulosetriacetat (CTA) bzw. Primäracetat, verestert [38]. Dieses wird für die Herstellung von Fotofilmen und LC-Displays verwendet, da sich keine

Newtonschen Ringe bilden. Aufgrund der hohen Absorptionsrate für infrarote Strahlung wird CTA auch für transparente Wärmedämmungen (TWD) [39] verwendet. Für die meisten anderen Anwendungen ist eine vollständige Veresterung der Cellulose nicht erforderlich oder nachteilig. Daher wird in einem zweiten Syntheseschritt ein Teil der Essigsäure-Moleküle wieder abgespalten. Dabei entsteht Sekundäracetat, welches auch Celluloseacetat (CA) genannt wird. Aus Celluloseacetat werden unter anderem Brillengestelle, Werkzeuggriffe, Kugelschreiber, Gehäuse von Elektronikgeräten, Spielzeug oder Verpackungsfolien hergestellt [40].

Eigenschaften: Cellulosediacetat ist transparent. Es verhält sich durch Aufnahme von Luftfeuchtigkeit antistatisch, wodurch weniger Staub an der Oberfläche angezogen wird. Aufgrund hoher Oberflächenelastizität zeigt es sich kratzunempfindlich. CA ist beständig gegenüber vielen Säuren und Laugen. Die nach der ISO 75 ermittelte Wärmeformbeständigkeit unter Last (HDT Heat Deflection Temperature) beträgt ca. 86 °C [41]. Dieser Wert wurde bei einer Biegespannung von 45 MPa ermittelt (Verfahren B).

Die Mikrostruktur der Cellulose wird durch die Modifikation mit der Säure so stark verändert, dass der resultierende Biokunststoff von Bakterien nicht mehr abgebaut werden kann. [42]

Die zur Veresterung der Cellulose verwendeten Säuren sind erdölbasiert. Celluloseacetat basiert daher maximal zu 55 % auf nachwachsenden Rohstoffen. Der Biokunststoff ist sehr spröde und lässt sich ohne Weichmacher, die ebenfalls erdölbasiert sind, nicht verarbeiten. Daher beträgt der auf nachwachsenden Rohstoffen basierte Werkstoffanteil lediglich ungefähr 40-50 % [43]. Man arbeitet jedoch daran, umweltfreundliche Weichmacher wie Citratester, Benzoate und Phosphate einzusetzen [44]. Der Kilogrammpreis schwankt je nach Abnahmemenge und Hersteller zwischen 3,50 und 5 Euro (Stand 2013).

Stand der Technik und Aussicht: Das japanische Unternehmen NEC Corporation konnte mit NeCycle™ ein Cellulose-Acetat entwickeln, das zu 70 % aus nachwachsenden Rohstoffen besteht [45]. Die Biomasse-Rohstoffe stammen zudem von Reststoffen. Das aus Cashewnusschalen gewonnene Cardanol reagiert mit Cellulose aus Getreidestroh zu Celluloseacetat (CA). Im Vergleich zum konventionellen CA erreicht die umweltfreundlichere Variante von NEC eine höhere Wärmeformbeständigkeit und eine geringere Wasseraufnahme [46].

2.5.3 Celluloseregenerat (CR)



Abb. 12 Endlos-Celluloseregeneratfasern © ITCF Denkendorf [47]

Abb. 13 Folien aus Cellulosehydrat – Verpackung aus Cellophan® [48]

Herstellung und Verwendung: Cellulose wird mithilfe von Lösungsmitteln aufgelöst und dann durch Düsen zu Fasern oder Folien (Cellulosehydrat) gepresst und wieder verfestigt (regeneriert). Neben dem marktführenden Viskoseverfahren (Viskosefasern), welches aufgrund schwefelhaltiger, toxischer Emissionen und Schwermetallen im Abwasser umweltbelastend ist, existiert das umweltfreundlichere Lyocellverfahren (Lyocellfasern), bei welchem die Lösungsmittel vollständig zurückgewonnen und wiederverwertet werden können.

Eigenschaften: Für Architekturanwendungen wären vor allem Celluloseregeneratfasern (CR) für Verbundanwendungen, beispielsweise kombiniert mit einer Biokunststoffmatrix, interessant. Versuche am Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung (IAP) haben gezeigt, dass sich bei einem Verbund aus Polylactid, einem Milchsäurekunststoff (siehe 2.5.4) und Celluloseregeneratfasern eine doppelt so hohe Schlagzähigkeit erreichen lässt wie bei einem Glasfaser-Polylactid-Werkstoff [49]. Das gilt auch für andere Matrixsysteme wie beispielsweise Polypropylen. Dies erscheint insbesondere für Fassadenelemente relevant, die durchschlagsicher sein müssen. Der Anteil nachwachsender Rohstoffe beträgt bei CR-Fasern 90-99 Gewichtsprozent [50].

Stand der Technik und Aussicht: Carbamatfasern, das sind bisher nur im Labormaßstab hergestellte CR-Fasern, die mit Hilfe unbedenklicher Harnsäure als Lösungsmittel fabriziert wurden, zeigen ein höheres Zug-E-Modul (50 GPa) [51] als beispielsweise Viskosefasern wie Cordenka (27 GPa) [52].

Da Cellulose zur Herstellung der CR-Fasern aufgelöst werden muss, können zur Spinnlösung Additive hinzugefügt werden, wodurch sich biobasierte Funktionsfasern aus Cellulose realisieren lassen. So können beispielsweise die gewöhnlich stark hygroskopischen Celluloseregeneratfasern hydrophobiert werden [53].

Weiterhin wären die Zugabe von Rußpartikeln für elektrisch leitfähige Fasern und die Zugabe von Flammschutzmitteln [54] usw. möglich. So würden sich biobasierte, funktionsintegrierte Verbundwerkstoffe umsetzen lassen.

2.5.4 Polylactid (PLA)



Abb. 14 Wasserflasche aus Polylactid © Biota [55]

Abb. 15 Touch Screen-Gehäuse der Firma Kuender/ Taiwan aus Polylactid © Corbion Purac [56]

Abb. 16 Autositzbezug aus Polylactid-Gewebe für den Mazda Premacy Hydrogen RE Hybrid © Tejin [57]

Herstellung und Verwendung: Polylactid oder auch Polymilchsäure genannt, besteht aus miteinander verbundenen Milchsäuremolekülen und gehört zur Gruppe der biobasierten Polyester. Mit Hilfe von Milchsäurebakterien wird Glucose zu Milchsäure umgesetzt (Fermentation).

Glucose (Monosaccharid) ist der Grundbaustein von Polysacchariden (Stärke, Cellulose etc.) und kann aus Weizen, Mais, Zuckerrüben, Zuckerrohr, Melasse, Molke oder auch aus Getreidestroh, Gras und anderen Agrarreststoffen gewonnen werden [58]. Getreidestroh enthält beispielsweise 38-40 % Cellulose, welches aus Glucoseeinheiten aufgebaut ist [59].

Polylactid kann spritzgegossen oder extrudiert werden. Möglich ist auch die Herstellung von Folien mittels Extrusion, Blasformen oder Kalandrieren, die Erzeugung von Fasern durch das Schmelzspinnen oder die Expansion mit dem Treibmittel CO₂ zu einem Partikelschaum, der bereits als Dämmmaterial (BioFoam® [60]) eingesetzt wird, ähnlich dem expandierten Polystyrol (EPS). Beim 3D-Druck werden Polylactid-Filamente gerne als zusätzliche Alternative zu ABS verwendet, da die Schmelztemperatur gleichfalls die Verarbeitungsschwindigkeit bei ähnlichen mechanischen Eigenschaften geringer sind. Aufgrund der Einstellbarkeit des Eigenschaftsprofils wird der Milchsäurekunststoff sowohl in der Verpackungsindustrie, als Mulchfolien oder Pflanztöpfe in der Landwirtschaft, für Cateringartikel, aber auch für langlebigere Konsumgüter wie Kleidung, Bodenbeläge oder Gehäuse von Elektronikartikeln und Interior-Autoteile [61] angewendet.

Eigenschaften: Polylactid ist ein teilkristalliner, transparenter Kunststoff. Die Wärmeformbeständigkeit liegt bei handelsüblichem Standard-PLA bei durchschnittlich 55 °C.

Mit zunehmendem Kristallisationsgrad steigen die Wärmeformbeständigkeit sowie die mechanischen Eigenschaften. Die Lichtdurchlässigkeit und Zähigkeit sinken dadurch (*Kapitel 4.6.3 Nukleierungsmittel als Kristallisationsbeschleuniger*).

Den Kristallisationsgrad kann man durch Zugabe von Nukleierungsmitteln, die die Kristallisation beschleunigen, erhöhen. Als Nukleierungsmittel können (Natur)Fasern, Talkum oder auch das Homopolymer PDLA, welches nur aus D-Lactiden zusammengesetzt ist, fungieren.

Lactide, ein Zwischenprodukt bei der Herstellung von Polylactid, kommen vorwiegend als L-Lactid aus rechtsdrehenden Milchsäuren aber auch als D-Lactid aus linksdrehenden Milchsäuren vor. Standard-Polylactid besteht überwiegend aus L-Lactiden [62].

Compoundiert man jedoch Polylactid mit beispielsweise fünf Gewichtsprozent PDLA, das ist ein Polymer, das nur aus D-Lactid-Grundbausteinen besteht, so erhöht sich die Wärmeformbeständigkeit (HDT-B) von 56 °C auf 128 °C [63].

Mischt man PDLA und PLLA nahezu ausgeglichen, so erhält man ein gleichmäßig kristallines, stereokomplexes Polylactid. So gelingt es beispielsweise, fritrierbeständige Behälter, Kaffeebecher oder bügelfeste Gewebe aus Polylactid herzustellen. [64]

Aufgrund seines hohen LOI-Indexes benötigt Polylactid mehr Sauerstoff zur Verbrennung, als in der Luft enthalten ist. Es weist eine geringe Entflammbarkeit auf (*Kapitel 4.4.1 Entzündbarkeit von PLA und CA – der Sauerstoffindex*).

Überdies verfügt es über eine hervorragende UV-Beständigkeit [65]. Polylactid weist zudem hervorragende mechanische Eigenschaften auf. PLA ist mit einem E-Modul von durchschnittlich 4 GPa [66] im Vergleich zu anderen erdölbasierten Thermoplasten ein steifer Kunststoff. Beim technischen Kunststoff ABS beträgt dieser 2,3 GPa [67].

Je nach Oberflächenkonfiguration des Werkzeugs bei der Formgebung kann eine hochwertige matte oder glänzende Oberfläche geschaffen werden.

Standard-Polylactid ist mit ca. 2 €/ Kg (Stand 2014) der preisgünstigste, biobasierte Kunststoff.

Stand der Technik und Aussicht: Im Januar 2012 stellt der niederländische Konzern Purac, Hersteller der Homopolymere PDLA und PLLA, erstmals ein kommerziell verfügbares Polylactid mit einer Wärmeformbeständigkeit von 80-150 °C vor [68]. Hochtemperaturbeständige und lichtdurchlässige PLA-Folien wurden im Oktober 2013 der Öffentlichkeit vorgestellt [69].

Ferner werden vom japanischen Chemiekonzern Tejin Industries auch Hydrolyse beständige PLA-Typen angeboten [70]. PLA ist anfällig für den Abbau des Kunststoffes durch Feuchtigkeit.

An der Universität Miyazaki forscht man mit Algen, die wärmbeständiges Polylactid erzeugen. Die verwendeten Euglena-Algen produzieren Paramylon, welches aus Glucose besteht. Der Speicherkohlenstoff wird mit Hilfe von Mikroorganismen biotechnologisch zu Milchsäure umgebaut. Die so gewonnene Milchsäure liefert ein Polylactid, welches bis 120 °C wärmeformbeständig sein soll. Vorteilhaft am Verfahren ist, dass Algen lediglich CO₂ und Wasser benötigen und es keinen landwirtschaftlichen Boden bedarf. Die geschlossenen Reaktoren könnten beispielsweise an Fassaden untergebracht werden [71].

2.5.5 Bio-Polyethylen (Bio-PE)

Biobasiertes Polyethylen (Bio-PE) ist nach biobasiertem PET der am zweit häufigsten produzierte Biokunststoff [72].

Herstellung, Stand der Technik und Verwendung: Der auf der Basis von Bioethanol aus Zuckerrohrabfällen hergestellte Drop-in-Kunststoff Bio-Polyethylen (Bio-PE) wurde 2010 von der brasilianischen Firma Braskem auf dem Markt eingeführt. Es verfügt über dieselbe chemische Struktur wie das erdölbasierte Polyethylen [73], wodurch sich auch gleiche Materialeigenschaften ergeben.

PE, so auch Bio-PE wird vorwiegend in der Verpackungsindustrie und für Alltagsgegenstände aus Plastik eingesetzt. Ab 2014 produziert Braskem ebenfalls Bio-PP.

2.5.6 Poly-Ethylen-Furanoat (PEF) / Bio-Polyethylenterephthalat (Bio-PET)

Bereits heute ist Bio-PET der am meisten produzierte Biokunststoff [74]. Auch bei der für das Jahr 2017 prognostizierten Produktionskapazität von 6,2 Mio Tonnen fällt 76 % auf das Bio-PET, welches einen NaWaRo-Anteil von 30% aufweist.

Herstellung und Verwendung: PET besteht zu 30 % aus Monoethylen-Glykol (MEG) und zu 70 % aus Terephthalsäure (PTA). Das MEG wird bereits großtechnisch auf Basis nachwachsender Rohstoffe, insbesondere aus Zuckerrohrmelasse, hergestellt.

Das niederländische Unternehmen Avantium wandelt Cellulose-Ausgangsmaterial aus Abfällen der Papier-, Lebensmittelindustrie und der Landwirtschaft mit Hilfe der YXX-Technologie, einem neuen katalytischen Verfahren durch Hydratation und Oxidation, zu Furandicarbonsäure (FDCA) um [75]. Das FDCA reagiert dann mit biobasiertem Monoethylen-Glykol (MEG) zu Polyethylenfuranoat (PEF) [76]. Das PEF wäre dann somit ein komplett biobasiertes PET. PET bzw. PEF kann man mittels Spritzgießen, Extrudie-

ren, Blasfolienherstellung, Schmelzspinnen, Gießen etc. zu Formteilen wie Flaschen, Folien, Platten und Fasern für Textilien verarbeiten.

Eigenschaften: Die thermischen Eigenschaften von PEF sollen besser sein als beim konventionellen PET, die Feuchtigkeitsaufnahme geringer [77] [78]. Zu vollständig biobasiertem PET, dem PEF, sind noch keine Datenblätter verfügbar. Der Glasübergang soll mit 86 °C ca. 12 °C höher sein als bei konventionellem PET. Der Schmelzpunkt von PEF liegt ungefähr 30 °C unter dem Schmelzpunkt von PET [79].

Stand der Technik: Ab 2016 soll die kommerzielle Produktion von 100 % biobasiertem PET – dem PEF – mit 50.000 Tonnen pro Jahr beginnen [80].

2.5.7 Biobasiertes Polyvinylchlorid (Bio-PVC)

Konventionelles PVC enthält teilweise bis zu 60 % Weichmacher (Diethylhexylphthalat (DEHP) und Phthalate), da es sonst nicht verarbeitbar wäre.

Eigenschaften: Auf dem Markt gibt es mittlerweile ein PVC, das biobasierte Weichmacher enthält und daher zu 50 Gewichtsprozent biobasiert ist (Biovinyll™) [81] [82].

Mit geringen Modifikationen kann ein selbstverlöschender Werkstoff (UL94-V0) erreicht werden. Die Wärmeformbeständigkeit, Flexibilität, Dauerhaftigkeit und Wetterstabilität ist mit konventionellem PVC vergleichbar.

Stand der Technik: Ethylen ist ein Basisbaustein für die Herstellung von PVC. Ethylen, welches auch das Monomer von Polyethylen (PE) darstellt, kann bereits vollständig auf der Basis nachwachsender Rohstoffe hergestellt werden (siehe 2.5.5 *Bio-Polyethylen (Bio-PE)*). Derzeit wird für die Herstellung von Biovinyll™ erdölbasiertes Etyhlen verwendet. Man könnte jedoch aus technischer Sicht auch ein biobasiertes Etyhlen verwenden – kombiniert mit dem biobasierten Weichmachersystem ließe sich in Zukunft somit ein PVC herstellen, das fast vollständig auf nachwachsenden Rohstoffen basiert [83].

2.5.8 Polyhydroxyalkanoat (PHA)

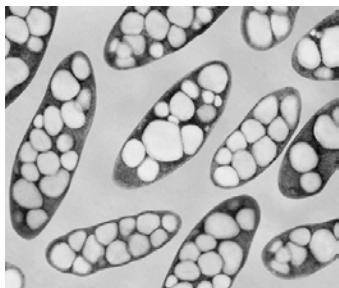


Abb. 17 Intrazelluläre Einlagerung von PHA in Bakterienzellen © Metabolix [84]

Abb. 18 Biologisch abbaubares Zelt aus PHA – One Nights Stand © Straw Dog B.V. [85]

Abb. 19 Stehlampe aus PHA - Miss Sissi bio-on Lamp von Philippe Starck [86]

Herstellung und Verwendung: Polyhydroxyalkanoate (PHA) sind biobasierte Polyester, welche von Bakterien (z.B. *Alcaligenes eutrophus*) als Speicherstoff in ihren Zellen eingelagert werden, wenn diese mehr Nahrung in Form von Glycerin oder Zucker erhalten als sie benötigen. Es muss jedoch gleichzeitig eine andere Mangelsituation vorliegen (Sauerstoff, Phosphor, Stickstoff etc.). Dies kann man sich analog der Fettspeicherung im menschlichen Körper vorstellen. Sind die Zellen mit dem Reservestoff gefüllt, werden die Zellwände mittels eines Lösungsmittels aufgebrochen. Das enthaltene PHA wird ausgewaschen, getrocknet und dann zu Granulat verarbeitet.

Für die Herstellung einer Tonne PHA sind ungefähr 4-5 Tonnen Zucker notwendig. Zur Produktion einer Tonne Polylactid werden 1,4 Tonnen Zucker benötigt [87]. PHB wird insbesondere zu Spritzgussartikeln (Spielzeug, hochpreisige Verpackungen), zu Folien und Fasern (Borsten für Besen, Zahnbürsten etc.) verarbeitet. Zur Kunststoffklasse der Polyhydroxyalkanoate gehören die Polyhydroxybutyrate (PHB) außerdem die Polyhydroxyvalerate (PHV).

Eigenschaften: Das Eigenschaftsprofil von Polyhydroxyalkanoaten ist am ehesten mit Polypropylen zu vergleichen. PHB ist etwas spröder. Polyhydroxyvalerate (PHV) sind elastisch. Polyhydroxyalkanoate (PHA) weisen je nach Type eine Wärmeformbeständigkeit von ca. 110-132 °C auf (HDT-B) [88]. Sie sind wasserfest [89]. Die Schlagzähigkeit kann eingestellt werden. Da das Schmelzverhalten flüssigkristallinen Materialien (LCP) ähnelt, kann PHA zu dünnwandigen und komplex filligranen Bauteilen gespritzt werden.

Stand der Technik: Der hohe Bedarf am Ausgangsmaterial verteuert auch den Kilopreis, der gegenwärtig je nach Typ und Abnahmemenge bei 3-12 € (Stand 2011) liegt [90] [91]. Man arbeitet daran die Ausgangssubstrate aus Reststoffen, zum Beispiel aus Schlachtabfällen, zu generieren, wodurch die Fertigungskosten tendenziell sinken werden. In einem Projekt des Siebten Rahmenprogramms RP7 der EU (SYNPOL: Biopolymers from syngas fermentation) konnte beispielsweise aus Siedlungsabfall, landwirtschaftlichen Rückständen und Klärschlamm aus Abwasseraufbereitungsanlagen Synthesegas hergestellt werden, das Mikroorganismen als Energiequelle nutzen und zu PHA verstoffwechseln [92].

2.5.9 Polycarbonat mit biobasiertem Weichmacher

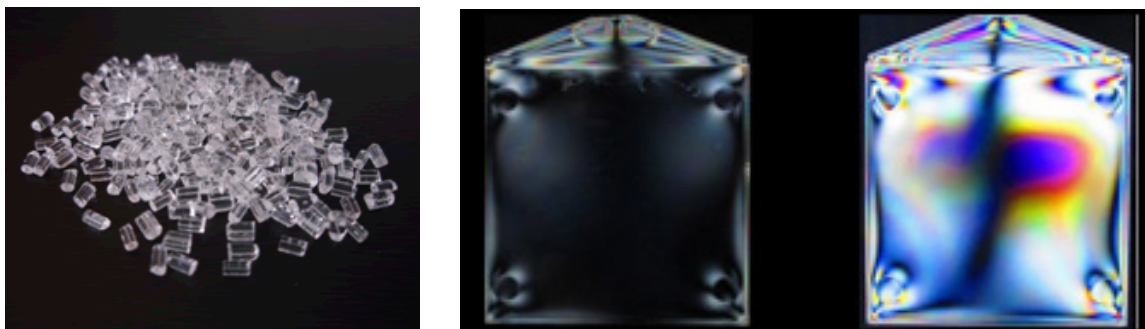


Abb. 20 Biobasiertes Polycarbonat – Granulat ©Mitsubishi Chemical Corporation [93]

Abb. 21 Durabio™ (links) zeigt keine Newtonsche Ringe (Polarisationseffekte) im Vergleich zu herkömmlichem Polycarbonat (rechts) ©Mitsubishi Chemical Corporation [94]

Herstellung und Verwendung: Die Firma Mitsubishi Chemical stellt unter dem Produkt-namen Durabio™ seit Herbst 2012 transparentes Polycarbonat ohne den Weichmacher Bisphenol A (BPA) aus pflanzenbasierten Isosorbiden her. Die jährliche Produktionskapazität von 5000 Tonnen soll bis zum Jahr 2015 auf 16.000 Tonnen steigen.

Ausgangsmaterial für das Monomer ist Stärke. Das Monomer Isosorbid kann zudem zur Herstellung von anderen Bio-Polyestern, biobasiertem Epoxidharz oder Polyurethan (biobasiertes Polyol) produziert werden [95].

Das BPA-freie Polycarbonat lässt sich wie die konventionellen Typen einsetzen. Beispielgebend wären Touchpanels oder Gehäuse von Elektronikgeräten, Bedienpanel oder andere Kunststoffteile in Automobilen, Hohlkammer-Platten etc. für die Innen- und Außenanwendung von Gebäuden.

Eigenschaften: Polycarbonat bricht aufgrund seines anisotropen Kristallaufbaus einfallendes Licht (Doppelbrechung), wodurch beispielsweise die Ablesbarkeit von Bedienpanels durch Polarisierungseffekte minimiert wird. Beim biobasierten Polycarbonat wird einfallendes Licht nicht gestreut [96]. Weitere Vorzüge sind die bessere UV-Beständigkeit ebenso eine höhere Oberflächenhärte. Diesbezüglich ist der Werkstoff mit Polymethylmethacrylat (PMMA) zu vergleichen. Hinsichtlich der Schlagzähigkeit und des Brandverhaltens ist das Material mit seinem erdölbasierten Pendant gleichzusetzen. Die Wärmeformbeständigkeit des biobasierten Polycarbonats liegt je nach Type bei 96 bis 118 °C (HDT-B). Das biobasierte Polycarbonat ist nicht biologisch abbaubar.

Biobasiertes Polycarbonat lässt sich materialtypisch verarbeiten. Überdies werden auch Durabio™-Filamente für den 3D-Druck angeboten [97].

2.5.10 Biobasiertes Polymethylmethacrylat (Bio-PMMA)

Herstellung und Verwendung: Mit Hilfe von speziellen Enzymen kann aus Zucker, Fettsäuren oder Alkohol in einem biotechnologischen Prozess Methylmethacrylat (MMA), das ist der Grundbaustein (Monomer) für das Polymer Polymethylmethacrylat (PMMA), hergestellt werden [98].

Eigenschaften: Die Eigenschaften entsprechen dem Profil herkömmlicher Polymethylmethacrylate.

Stand der Technik: Gegenwärtig wird biobasiertes Plexiglas® von Evonik auf Pilotanlagen produziert. Bis ca. 2020/ 2022 soll das Bio-PMMA auf den Markt kommen. Laut Prognosen könnte das Acrylglas aus nachwachsenden Rohstoffen dann ungefähr 10 % des Umsatzes am PMMA-Weltmarkt ausmachen. Die Firma Arkema bietet mit *Plexiglas® Rnew™ Biopolymer* ein Blend an, das nicht aus biobasiertem PMMA, sondern aus PMMA und Polylactid (PLA) besteht. Der biobasierte Anteil beträgt 25 % [99].

2.6 Übersicht und Vergleich ausgewählter (Bio)Kunststoffe

Gegenwärtig erscheint Polylactid (PLA) aufgrund der Verfügbarkeit, der guten mechanischen Eigenschaften, der UV-Beständigkeit und des geringen Preises am interessantesten. Nachteilig ist dabei die geringe Wärmeform- und Hydrolysebeständigkeit, die jedoch durch die Zugabe von Additiven und Füllstoffen (Naturfasern, Talkum, Säureblocker etc.) verbessert werden können.

Da Polyhydroxyalkanoate (PHA) in den nächsten Jahren großtechnisch aus Reststoffen hergestellt werden können und das Fertigungsverfahren stetig optimiert wird, kann der Biokunststoff in Zukunft zu marktfähigen Preisen angeboten werden. Vorteilhaft sind hierbei die sehr gute Wärmeformbeständigkeit und die große Bandbreite von steifen bis elastischen PHA-Typen.

Der geringe Anteil nachwachsender Rohstoffe von Cellulosediacetaten (CDA) kann in den nächsten Jahren durch die Verwendung biobasierter Weichmacher erhöht werden. Wie sich das auf den Preis auswirkt, ist bisher noch nicht abzusehen. Gegenwärtig ist der Biokunststoff in etwa doppelt so teuer wie PLA (Stand 2013).

Insbesondere die biobasierten Varianten Acrylglas (PMMA) und Polyvinylchlorid (PVC), aber auch Polyethylenfuranoat (PEF) und Polyethylen (PE) oder Polycarbonat ohne Bisphenol A werden für das Bauwesen in den nächsten Jahren hinsichtlich ihrer Performance am interessantesten sein. Sie sind nach Angaben der Hersteller hinsichtlich der für das Bauwesen relevanten Eigenschaften besser als ihre erdölbasierten Pendanten.

Tabelle 2 Übersicht und Vergleich ausgewählter biobasierter Kunststoffe mit PC und PMMA

Kunststoff	CA	PLA	PLA	Bio-PE	PHB	PC	PMMA
	Acetat	Biopolyester	Biopolyester	Polyolefin	Biopolyester	Polyester	Acrylat
Produktbeispiel	Plastiloid®MGP22	Ingeo™ 3251D	Ingeo™ 3260 HP	PE SHC7260/Braskem	Mirel™ P1003/F1005	Makrolon® UV	POLYplex PMMA 700, PLEXI-GLAS®
Aussehen	transparent	transparent	weiß/ creme opak	transparent	weiß/ creme opak	transparent	transparent
Anteil nachwachsender Rohstoffe [%]	30	90-97 [100]	90-97 [100]	94,5 (ASTM D6866)	90-98 [100]	0	0
Biegemodul ISO 527 [MPa]	2700	3700	4300	1350 (ASTM D638)	2000	2350	3000
Kerbschlagzähigkeit [kJ/m²] ISO 179/1eA	6	2	2	4,4	3,25	80	3,5
Streckdehnung ISO 527 [MPa]	2,5	2,5	-	7,5	-	>6	10
Streckspannung ISO 527 [MPa]	87	62	-	30 MPa (ASTM D638)	25	>60	70
Wärmeformbeständigkeit [°C] HDT-B (0,45MPa)	86	55 (E2092)	151	76	132 (ASTM D648B)	140	94
Brandverhalten	tropft brennend ab (s.a. auch Brandversuche nach UL94 Kapitel 4.4.2)	LOI-Index > Sauerstoff (21%) (s.a. auch Kapitel 4.4.1, Brandversuche nach UL94 Kapitel 4.4.2)		wie PE, leicht entflammbar	leicht entflammbar	normal entflammbar EN 13501-B s1 d0 bei 1-6mm Farbe clear 2099	DIN 4102-B2 Platte extrudiert ab 1,8mm [101]
LOI-Index [%] ISO 4589	18 [215]	26 [214]	26 [214]	18 [218]	-	26 [216]	18 [102]
Verarbeitungsmöglichkeiten	Spritzguss, Folien, Fasern, Blasformen	Spritzguss, Extrusion, Blasformen, Folien, Fasern, 3D-Druck, Expandieren		Spritzguss, Extrusion, Blasformen, Kalandrieren Fasern	Spritzguss, Extrusion, Blasformen, Kalandrieren Fasern	vor allem Spritzguss, Extrusion	Spritzgießen, Gießen, Extrudieren
Verarbeitungsschwindigkeit ISO 294-4	0,4-0,6	0,4	1,7-1,8	-	1,3-1,6	0,7	0,4
biologisch abbaubar	nein	ja	nein	nein	ja	nein	nein
Verfügbarkeit	größtenteils verfügbar	größtenteils verfügbar	größtenteils verfügbar	größtenteils verfügbar	verfügbar	größtenteils verfügbar	größtenteils verfügbar
Preis pro Kg [€]	3,5-50 (Stand 2013)	1,50- 2,0 (Stand 2014)	ca. 5,0 (SUPLA) (Stand 2011)	1,80-2,50 (Stand 2014)	4,00-12,00 [103] (Stand 2013)	2,60 [104] (Stand 2013)	2,40-2,60 [104] (Stand 2013)
Quellen			[105]	[106]		[107]	[108] [109]

2.7 Ökologische Vorteile biobasierter Kunststoffe

Gebäude werden zunehmend ökologisch bilanziert und zertifiziert. Dies erfolgt beispielsweise durch die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB). Baustoffe oder Bauteile aus vorwiegend nachwachsenden Rohstoffen können als Bestandteil eines Gebäudes fungieren und diese Bilanz unter Umständen verbessern.

Da biobasierte Kunststoffe auf nachwachsenden Rohstoffen, insbesondere auch zunehmend auf Biomasse-Reststoffen basieren, schonen sie die endliche Ressource Rohöl. Ob sich diese auch bei der Herstellung hinsichtlich Energieverbrauch und Treibhausgaspotential als umweltfreundlich erweisen, zeigt folgende Tabelle:

Tabelle 3 Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen bei der Herstellung von biobasierten Kunststoffen (hellgrau) und erdölbasierten Kunststoffen (dunkelgrau) [110] [111] [112]

Werkstoff [Granulat]	Energieverbrauch [MJ/kg]	Treibhausgasemission [kg CO ₂ eq./kg polymer]	Systemgrenze	Quelle	Stand
PLA gegenwärtige Technologie	42.2	1.3	cradle-to-gate	[111]	2010
PLA Bioraffinerie	35	0.8	cradle-to-gate	[111]	2010
PHA	41,4	1,96	cradle-to-gate	[113]	2007
PHA Bioraffinerie	2,5	-2,3	cradle-to-gate	[114]	2008
CA	89	2.2	cradle-to-gate	[112]	2010
CR	80	6.5	cradle-to-gate	[115]	2011
Bio-PET (PEF)	26	1.4	cradle-to-gate	[116]	2014
Green-PE		-2,5	cradle-to-gate	[117]	2013
Bio-PVC		1	cradle-to-gate	[118]	2012
PVC	59,3	1,9	cradle-to-gate	[111]	2010
PMMA	115,5	3.8- 7	cradle-to-gate	[119][120]	2014
PET	80	3,2	cradle-to-gate	[111]	2010
PE	77	2,1	cradle-to-gate	[111]	2010
PC	113	7,6	cradle-to-gate	[111]	2010

Um die Umweltfreundlichkeit bei der Herstellung gänzlich darzustellen, müssten alle Stoffströme, z.B. auch der Wasserverbrauch und weitere Umweltwirkungen dargestellt werden. Bei der Herstellung von Celluloseregeneraten (CR) wird beinahe die fünffache Menge an Schwefeldioxid freigesetzt im Vergleich zu anderen bio- und erdölbasierten Kunststoffen [121]. Das Versauerungspotential ist dadurch vergleichsweise hoch. Auch

hinsichtlich des Wasserverbrauchs fallen die Celluloseregenerate negativ auf. Zur Herstellung eines Kilogramms wird ungefähr, verglichen mit der Produktion von PLA, die sechsfache Menge benötigt. In den meisten Fällen wird *cradle-to-gate* angegeben, das beinhaltet die Stoff- und Energieströme bis zur Fertigstellung des Granulats. Bei *cradle-to-grave* wird der gesamte Lebensweg von der Herstellung über die Nutzungsphase bis zur Entsorgung berücksichtigt, wobei beim Bio-PET (PEF) nicht angegeben wird, welche Entsorgungsoption berücksichtigt wurde [116]. In den meisten Fällen handelt es sich hierbei um die Deponierung.

Zur Herstellung von einem Kilogramm Polylactid wird ungefähr 64 % weniger Energie benötigt als zur Herstellung von einem Kilogramm Plexiglas (siehe Tabelle 3). Wird in den nächsten Jahren Polylactid mithilfe von Bioraffinerien hergestellt werden können, so ist eine noch größere Einsparung möglich.

Wenn die für die Herstellung von PHB oder Polylactid notwendigen Ausgangssubstrate aus Bioraffinerien stammen und man daher auf Reststoffe der Agrar- oder Lebensmittelindustrie zurückgreift, so sind sowohl der Energieverbrauch wie auch die Treibhausgasemissionen geringer. Dies rührt daher, dass nicht zusätzlich Mais oder andere Pflanzen angebaut werden müssen, um daraus Stärke oder Glucose zu erhalten. Weiterhin liefern nicht weiter verwertbare Biomasseabfälle notwendige Energie zum Betrieb der Bioraffinerie.

Die Herstellung von Celluloseacetat, welches bisher maximal zu 50 % biobasiert herstellbar ist, zeigt sich hinsichtlich Energieverbrauch und der Freisetzung von Treibhausgasen nicht vorteilhafter. Bei der Herstellung von PVC wird ca. 34 % weniger Energie benötigt und weniger CO₂ emittiert.

2.8 Entsorgungsoptionen

Kompostierbare Biokunststoffe müssen sich im Rahmen einer Industriekompostierung nach der Norm EN 13432 innerhalb von 12 Wochen zu 90 % abbauen. Biologisch abbaubare Biokunststoffe werden insbesondere für Verpackungen, Cateringartikel oder in der Landwirtschaft (Pflanztöpfe, Mulchfolien) verwendet. Die Bedingungen im heimischen Kompost reichen für den biologischen Abbau nicht aus.

Biobasierte Kunststoffe, die für Anwendungen mit langer Funktionsdauer konzipiert werden, lassen sich aufgrund ihrer chemischen Struktur meist nicht mehr kompostieren – weder auf dem Kompost, noch in industriellen Kompostierungsanlagen. Dies betrifft beispielsweise Celluloseacetat, Drop-in-Lösungen wie Bio-PE oder auch PLA-Blends, die Flammschutzmittel enthalten.

Beim biologischen Abbau wird der Biokunststoff zu CO₂, Wasser und Biomasse abgebaut. Die im Kunststoff gespeicherte Energie kann bei diesem Entsorgungsweg nicht

genutzt werden. Die thermische Verwertung in Müllverbrennungsanlagen liefert abzüglich der nicht biobasierten Bestandteile im Werkstoff (z.B. erdölbasierte Additive) eine nahezu CO₂-neutrale Energie [122]. Es wird lediglich die Menge an Kohlenstoffdioxid freigesetzt, die die Pflanzen der Atmosphäre beim Wachstum entzogen haben. Ferner muss auch berücksichtigt werden, dass zum Anbau, der Ernte oder zur Herstellung der Biokunststoffe auch Energie notwendig ist. Folgende Tabelle bietet einen Vergleich der Brennwerte von erdöl- und biobasierten Kunststoffen und anderen Energieträgern.

Tabelle 4 Brennwerte von petrochemischen Kunststoffen im Vergleich zu biobasierten Kunststoffen [123]

Kunststoff	Biobasierte Kunststoffe								Heizöl	Kohle	Holz	Papier
	PE	PC	PET	PVC	Bio-PE	PHA	PLA	Cellulose- derivate				
Brennwert [MJ/ Kg]	45	31	22	18	44	24	19	18	43	30	19	19

Im Falle von Polylactid kann bei der thermischen Verwertung in etwa 29 % der für die Herstellung benötigten Energie zurückgewonnen werden (*Tabelle 3 und 4*), da der Output in etwa 65 % vom Heizwert beträgt.

Ob chemisches Recycling, das ist die Aufspaltung in Grundbausteine, ökonomisch und ökologisch sinnvoll ist, muss sich noch zeigen. Polylactid kann so beispielsweise mittels Hydrolyse zu Lactid recycelt werden [124]. Hierunter fällt auch das Cradle-to-Cradle-Prinzip LOOPLA® der Firma Galactic.

Hinsichtlich des stofflichen Recyclings gibt es unterschiedliche Meinungen. Viele kompostierbare Kunststoffe (insbesondere durch Verpackungen) finden sich im Abfallstrom für konventionelle Kunststoffe wieder. Dort stören sie nach Erfahrungen der Ecoplast Kunststoff-Recycling GmbH die Produktion hochwertiger Recyclate [125].

In den Niederlanden wurde an der TU Delft ein 3D-Plotter entwickelt, der es dem Konsumenten zu Hause ermöglicht mit Biokunststoffabfällen (beispielsweise PLA-Verpackungen) individuell Entworfenenes zu drucken [126].

3 Funktionale und ästhetische Anforderungen sowie baurechtliche Situation

Ob biobasierte Kunststoffe für den Einsatz in Gebäuden geeignet sind, hängt von den Anforderungen der jeweiligen Anwendung ab. Je nach Einsatzgebiet des Bauproduktes greifen unterschiedliche Regelwerke.

3.1 Baurechtliche Situation

Generell gilt für alle Bauprodukte die Bauproduktenverordnung (EU) Nr. 305/2011, die seit Juli 2013 die Bauproduktenrichtlinie (89/106/EWG) ersetzt. Die nationale Regelung der Bauregelliste und die Kennzeichnung durch das Ü-Zeichen sind daher im Jahr 2013 ausgelaufen. Die Bauproduktenverordnung gilt nun direkt und wird nicht mehr in nationale Gesetze umgesetzt [127].

Bevor neue Bauprodukte auf den Markt kommen, muss deren Einsatztauglichkeit nachgewiesen werden. Es gilt:

„Bauwerke müssen als Ganzes und in ihren Teilen für deren Verwendungszweck tauglich sein, wobei insbesondere der Gesundheit und der Sicherheit der während des gesamten Lebenszyklus der Bauwerke involvierten Personen Rechnung zu tragen ist. Bauwerke müssen diese Grundanforderungen an Bauwerke bei normaler Instandhaltung über einen wirtschaftlich angemessenen Zeitraum erfüllen.“ (Europäische Union: VERORDNUNG (EU) Nr. 305/2011 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 09. März 2011. In: *Amtsblatt der Europäischen Union*, S. L88/33 Anhang 1 Grundanforderungen an Gebäude) [128].

Bei der Bauproduktenverordnung sind die wesentlichen Leistungsmerkmale der Bauprodukte nicht exakt festgelegt, sondern können vielmehr aus dem Anhang I *„Grundanforderungen an Gebäude“* abgeleitet werden.

Diese Anforderungen an Bauwerke werden folgenden Merkmalen beschrieben [129]:

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

- Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen

Für die genannten Merkmale werden in technischen Spezifikationen (Normen) konkrete Anforderungen festgesetzt.

Für den Einsatz von Bauprodukten in Deutschland gelten die Anforderungen der jeweiligen Landesbauordnungen (LBO). Die Musterbauordnung (MBO) ist eine Standard- und Mindestbauordnung, die den Ländern als Grundlage für deren jeweilige Landesbauordnungen (LBO) dient. [130]

Nach § 17 der MBO dürfen Bauprodukte nur dann *„für die Errichtung, Änderung und Instandhaltung baulicher Anlagen verwendet werden“* [131], wenn sie nach den Vorschriften der Bauproduktenverordnung in den Verkehr gebracht werden.

Für neue bzw. nicht geregelte Bauprodukte, beispielsweise auch für Fassadenbekleidungen aus biobasierten Kunststoffen, erteilt das Deutsche Institut für Bautechnik eine allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung (BAZ), wenn deren Verwendbarkeit im Sinne des §3 Absatz 2 der Musterbauordnung (MBO) nachgewiesen wurde. [132]

„Bauprodukte und Bauarten dürfen nur verwendet werden, wenn bei ihrer Verwendung die baulichen Anlagen bei ordnungsgemäßer Instandhaltung während einer dem Zweck entsprechenden angemessenen Zeitdauer die Anforderungen dieses Gesetzes erfüllen und gebrauchstauglich sind“. (Musterbauordnung - MBO -, Fassung November 2002; Dritter Teil Bauprodukte, Bauarten; § 3 Allgemeine Anforderungen) [133]

Verwendbarkeitsnachweise auf europäischer Ebene, sogenannte Europäische Technische Zulassungen (ETA), werden einem Hersteller von Bauprodukten auf Antrag erteilt, wenn eine harmonisierte Europäische Norm nicht vorliegt.

Grundlage für die Konformitätskennzeichnung CE sind harmonisierte europäische Normen, *die als* technische Regeln von der Europäischen Normenorganisationen aufgrund eines von der Europäischen Kommission erteilten Mandats, z.B. das Mandat M/ 121 (Innen – und Außenwände und Deckenabschlüsse) im Hinblick auf die wesentlichen Anforderungen der Bauproduktenrichtlinie erarbeitet wurden [134].

Bauprodukte mit entsprechender CE-Kennzeichnung können im europäischen Binnenmarkt frei gehandelt werden.

Auch in der Musterbauordnung (MBO) werden wenig konkrete Anforderungen formuliert: Die Standsicherheit einer baulichen Anlage *„muss im Ganzen und in ihren einzelnen Teilen für sich standsicher sein“* [135]. Des Weiteren werden im § 26 der MBO *„Allgemeine Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen“* aufgelistet.

3.1.1 Anforderungen an das Brandverhalten

„Baustoffe, die nicht mindestens normal entflammbar sind (leicht entflammbare Baustoffe) dürfen nicht verwendet werden; dies gilt nicht, wenn sie in Verbindung mit anderen Baustoffen nicht leicht entflammbar sind.“ (Musterbauordnung - MBO -, Fassung November 2002; Dritter Teil Bauliche Anlagen, vierter Abschnitt Wände, Decken, Dächer, § 26 Allgemeine Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen.)[136]

3.1.1.1 Außenwände

Außenwände und Außenwandteile müssen so ausgebildet werden, dass eine Brandausbreitung auf und in diesen Bauteilen ausreichend lang begrenzt ist [137].

Nichttragende Außenwände und nichttragende Teile tragender Außenwände der Gebäudeklassen 4 und 5 (siehe Tabelle 4) müssen aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen (§ 28 Absatz 2 MBO). Sie sind aus brennbaren Baustoffen zulässig, wenn sie als raumabschließende Bauteile feuerhemmend sind (Feuerwiderstand F30).

Nicht brennbare Baustoffe entsprechen den Baustoffklassen A1 und A2 nach DIN 4102 [138] und den EU-Baustoffklassen A1 und A2 nach EN ISO 13501[139].

Oberflächen von Außenwänden sowie Außenwandbekleidungen müssen schwer entflammbar sein (§ 28 Absatz 3 MBO). Das bedeutet B1 nach DIN 4102 oder EN ISO 13501-B oder C. Dies gilt nicht für die Gebäudeklassen 1 bis 3. Außenwandbekleidungen für diese Gebäudeklassen können normal entflammbar sein und es wird keine bestimmte Feuerwiderstandsdauer vorgeschrieben [140].

3.1.1.2 Trennwände

Nicht tragende innere Trennwände müssen nach der Musterbauordnung im § 29 *Trennwände* als raumabschließende Bauteile zwischen Nutzungseinheiten sowie zwischen Nutzungseinheiten und anders genutzten Räumen, ausgenommen Fluren, sowie zwischen Aufenthaltsräumen und anders genutzten Räumen im Kellergeschoss mindestens feuerhemmend sein, also einen Feuerwiderstand von 30 Minuten aufweisen. Diese Anforderung gilt nicht für Wohngebäude der Gebäudeklassen 1 und 2 [141].

Tragende Wände und Stützen (§ 27 MBO), Brandwände (§ 30 MBO), Decken (§ 31 MBO) und Dächer (§ 32 MBO) werden nicht betrachtet, da für genannte Bauteile aus Performancegründen keine Thermoplaste verwendet werden.

Tabelle 5 Brandschutzanforderungen unterschiedlicher Gebäudeklassen nach MBO [142]

Bauteil	§ MBO	Gebäudeklasse (GK)				
	§ 2	1	2	3	4	5
	1)	Gebäude geringer Höhe h ≤ 7m			Gebäude mittlerer Höher h ≤ 13m h ≥ 22m	
		freistehende Gebäude	Gebäude	sonstige Gebäude	Gebäude	sonstige Gebäude einschließlich unter- irdischer Gebäude
		max. 2 Nutzungseinheiten ≤ 400m ²			Nutzungs- einheiten ≤ 400 m ²	
Tragende Wände, Stützen	§ 27	F 0	F 30	F 30	F 60	F 90
Tragende Wände, Stützen im Kellergeschoss		F 30	F 30	F 90	F 90	F 90
Tragende Wände, Stützen im Dachgeschoss, wenn Aufenthaltsräume darüber sind		F 0	F 30	F 30	F 60	F 90
nichttragende Außenwände	§ 28	keine			A oder F 30	A oder F 30
Trennwände	§ 29	F 0	F 30 ²⁾	F 30	F 60	F 90
Decken	§ 31	F 0	F 30	F 30	F 60	F 90
Decken im Dachgeschoss, wenn darüber Aufenthalts- räume sind		F 0	F 30	F 30	F 60	F 90
Decken im Kellergeschoss		F 30	F 30	F 90	F 90	F 90

¹⁾ Die Höhe bezieht sich auf Fußbodenoberkante des obersten Geschosses über Geländeoberfläche.

²⁾ gilt nicht für Wohngebäude

F 30 = feuerhemmend

F 60 = hochfeuerhemmend

F 90 = feuerbeständig

3.1.1.3 Brandprüfungen und ableitende Methodik eigener Brandversuche

Die in der deutschen Norm 4102-4 (DIN 4102-4:1994-03) über das Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen [143] genannten Baustoffe sind ohne weitere Brandprüfung in die dort angegebene Baustoffklasse aufgenommen. Da biobasierte Kunststoffe eine für das Bauwesen neue Werkstoffklasse darstellen, sind diese nicht gelistet. In diesem Fall muss die Baustoffklasse durch Brandprüfungen ermittelt werden. Eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis oder eine Zustimmung im Einzelfall werden erforderlich.

Bei der europäischen Norm zur *'Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten'* (DIN EN 13501-1:2010-01) [144] wird im Vergleich zur deutschen Norm zum *'Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen'* (DIN 4102-1:1998-05) [145], die Rauchentwicklung und brennendes Abtropfen berücksichtigt. Eine direkte Gegenüberstellung beider Regelwerke zur Klassifizierung ist daher nicht generell möglich.

Zu den schwer entflammbaren Baustoffen gehört beispielsweise nach der Norm DIN 4102-1 die Baustoffklasse B1. In der DIN EN 13501-1:2010-01 tragen schwer entflammbare Werkstoffe die Baustoffklassen B und C (siehe Tabelle 5).

Baustoffklassen für nichtbrennbare Baustoffe (DIN 4102-A1 und A2) werden in der oben stehenden Tabelle nicht berücksichtigt, da die gängigsten Thermoplaste ohne Modifikation generell brennbar sind und auch bei einer sinnvollen Zugabe von Flammenschutzmitteln brennbar bleiben.

Die Prüfungen nach DIN 4102 und DIN EN 13501 beziehen sich immer auf Bauteile, wie beispielsweise ein definierter Ausschnitt einer nicht tragenden Innen- oder Außenwand, welche dann gezielt in einer genormten Prüfung einer Brandquelle ausgesetzt werden.

Zur Überprüfung des Brennverhaltens der mit Flammenschutzmitteln modifizierten Biokunststoffe macht es Sinn, zunächst auf Materialebene nach der Prüfnorm UL 94:2013-03 [146] zu testen. Anschließende Prüfungen auf Bauteilebene sind jedoch unumgänglich.

In der vorliegenden Arbeit dienen daher die Tests zur *'Brennbarkeit von Kunststoffen für Teile in Geräten und Anwendungen'* [146] der Underwriters Laboratories (UL) bei der Modifikation von biobasierten Kunststoffen zur Anpassung an Architekturanwendungen zu einer ersten Einschätzung der Rezeptur. Bei der Adaption eines Biokunststoffes handelt es sich um einen iterativen Prozess, bei dem viele Chargen und Versuchskörper produziert und untersucht werden müssen. Es würde den finanziellen und zeitlichen Rahmen sprengen, das Material stets auf Bauteilebene zu prüfen.

Tabelle 6 Gegenüberstellung Baustoff- und Brandklassennormen auf Material und Bauteilebene

Bauteilebene		Bauteilebene				Materialebene					
Baustoffklassen nach DIN 4102-1:1998-05		Baustoffklassen nach DIN EN 13501:2007-05				Brandklassen nach UL 94 V:2013-03					
national		EU				USA					
		Brand-Parallelerscheinung				Anforderungen					
mit brennbaren organischen Bestandteilen						Brenndauer nach jeder Beflammung		Gesamt brenndauer je Satz: 10 Beflammungen	Abbrand bis zur Halteklammer	Nachbrenn- und Glühdauer nach der 2. Beflammung	Entzündung der Watte
B	Brennbar										
B1	schwer entflammbar Diese Baustoffe dürfen nach Erlöschen des Feuers nicht selbstständig weiterbrennen	B C	Schwer entflammbar	s1-s3 d0-d2 s1-s3 d0-d2	Flash over (*) wird nicht ausgelöst Flash over (*) wird ausgelöst	V0	≤ 10 s	≤ 50 s	nein	≤ 30 s	nein
B2	normal entflammbar Diese Baustoffe lassen sich durch Zündquellen entflammen und brennen von allein weiter	D E	Normal brennbar	s1-s3 d0-d2 s1-s3 d0-d2	Flash over (*) wird ausgelöst	V1	≤ 30 s	≤ 250 s	nein	≤ 60 s	nein
B3	leicht entflammbar	F	Leicht entflammbar	unbestimmt		V2	≤ 30 s	≤ 250 s	nein	≤ 60 s	ja

- s1 keine Sichtbehinderung durch Rauchentwicklung
- s2 Sichtbehinderung durch Rauchentwicklung
- s3 starke Sichtbehinderung durch Rauchentwicklung
- d0 kein brennendes Abtropfen oder Abfallen
- d1 brennendes Abtropfen oder Abfallen über max. 10 sec. (während eines 10 min. Tests)
- d2 brennendes Abtropfen oder Abfallen, mehr als 10 sec. (während eines 10 min. Tests)
- * Flash over - Brandverbreitung durch Wärmestrahlung
- s smoke
- d droplets
- fl Floorings (Brandverhaltensklasse für Bodenbeläge)

Ein Bauprodukt, das beispielsweise für die Klasse DIN EN 13501-E (normal entflammbar) vorgesehen ist, muss nach EN ISO 11925-2:2011-02 15 Sekunden lang beflammt werden. Hierbei wird die Entzündbarkeit getestet [147].

Bauprodukte, die die Klasse E erreichen und hinsichtlich der Baustoffklasse D (normal entflammbar), C oder B (beide schwer entflammbar) geprüft werden, müssen nach EN ISO 11925-2:2011-02 30 Sekunden lang beflammt werden. Ferner sollen sie zusätzlich nach EN 13823:2010-12 [148], dem Single Burning Item (SBI) geprüft werden. Beim SBI-Test wird der potentielle Beitrag zu einem sich entwickelnden Brand, bei der ein einzelner brennender Gegenstand in einer Raumecke nahe dem Bauprodukt positioniert ist, eruiert [149].

Für die Baustoffklassen DIN EN 13501-D, -C, -B dürfen nach EN ISO 11925-2:2011-02 bei der Flächen- und Kantenbeflammung eines Bauproduktes, bei einer Beflammungsdauer von 30 Sekunden, die vertikale Flammenausbreitung innerhalb von 60 Sekunden nach Beginn der Beflammung 150 mm oberhalb des Beflammungspunktes nicht überschreiten [150].

Hinsichtlich des SBI-Tests nach EN 13823:2010-12 dürfen unterschiedliche maximale Werte bezüglich der Wärmefreisetzung und Feuerwachstumswerten erzielt werden.

Für schwer entflammbare Werkstoffe darf es keine seitliche Flammenausbreitung bis zur Kante der Probe geben [151]. Bei schwer entflammbaren Baustoffen darf sich in der Prüfung nach EN ISO 11925-2 das Filterpapier entzünden [152]. Nach der DIN EN 13501-1 gibt es für schwer entflammbare Baustoffe keine Anforderungen hinsichtlich der Rauchentwicklung [153].

Vertikalbrennprüfungen

Bei den Vertikalbrennprüfungen nach UL 94:2013-03 kann die Brandklasse V-0, V-1 oder V-2 erreicht werden. Erlischt der Brand am Prüfstab nach Wegnahme der Flamme innerhalb maximal 10 Sekunden und nach der zweiten Beflammung binnen längstens 30 Sekunden, würde dies der Brandklasse V0 entsprechen, vorausgesetzt, es entstehen keine Tropfen, die die im Abstand von 30 cm platzierte Watte entzünden. Die Beflammungen werden für jeweils 10 Sekunden durchgeführt. Die Brandklasse V-0 beschreibt auf Materialebene, dass das untersuchte Material für die genannte Dicke schwer entflammbar ist. Bei erfolgsversprechenden Rezepturen (*Kapitel 4* und *5*) wurde die Beflammungsdauer auf 15, 30 und mehr Sekunden erhöht, um damit den Prüfbedingungen auf Bauteilebene näher zu kommen. Üblicherweise werden vor den Vertikalbrennprüfungen Horizontalprüfungen (UL 94 HB) vorgeschaltet. Diese gelten als bestanden, wenn in Abhängigkeit von dem Probekörperdicken eine bestimmte Abbrand-Geschwindigkeit zwischen zwei Markierungen nicht überschritten wird. Die Prüfung wird bei gering flammwidrigen Materialien eingesetzt. Im Rahmen der eigenen Brandversuche wurde direkt mit den strengeren Vertikalbrennprüfungen begonnen.

Tabelle 7 Brandklassen nach UL 94 V (2013-03)

Brandklasse	Brenndauer nach der 1. Beflammung	Gesamtbrenndauer je Satz (10 Beflammungen)	Abbrand bis zur Halteklammer	Nachbrennzeit und Glühdauer nach der 2. Beflammung	Entzündung der Watte
V-0	≤ 10 s	≤ 50 s	nein	≤ 30 s	nein
V-1	≤ 30 s	≤ 250 s	nein	≤ 60 s	nein
V-2	≤ 30 s	≤ 250 s	nein	≤ 60 s	ja

Werden Materialproben modifizierter Biokunststoffe im Rahmen der Compoundierungsversuche in den *Kapiteln 4* (Innenanwendung) und *5* (Außenanwendung) nach UL 94 V-0 klassifiziert, so wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass diese Rezepturen auf Bauteilebene getestet, die Baustoffklassen erreichen können, die zu den schwer entflammaren Werkstoffen, mindestens jedoch zu den normal entflammaren Baustoffen gehören. Materialproben, die bei den Brennbarkeitsversuchen nach UL 94 V in die Brandklasse V-1 oder V-2 eingestuft werden, finden keine weitere Berücksichtigung.

Selbst bei schwer entflammaren Baustoffen der Klasse DIN EN 13501-C oder B darf sich der Werkstoff bei einer Prüfung nach EN ISO 11925-2:2011-02 entzünden, wenn die Flammausbreitung, wie bereits oben beschrieben, innerhalb eines bestimmten Rahmens bleibt und der Feuerwachstumswert ebenso die Wärmefreisetzung, die im SBI-Test nach EN ISO 13823:2010-12 eruiert werden, einen Maximalwert nicht überschreiten.

Etwaige Beschichtungen, angrenzende Baumaterialien, Verbindungsmittel und Anwendungsdicken müssen bei Brandversuchen auf Bauteilebene berücksichtigt werden, da diese einen Einfluss auf das Brandverhalten haben können [154]. Nach Durchführung der Brandtests genannter Bauteilnormen kann vom Deutsches Institut für Bautechnik (DIBT) oder einer anderen akkreditierten Prüfeinrichtung ein Prüfzeugnis erstellt werden.

3.1.2 Weitere Anforderungen unter Berücksichtigung der Normen

Zur weiteren systematischen Darstellung der Material- und Produkthanforderungen werden entsprechende Regelwerke aufgeführt, die die technischen Spezifikationen von Bekleidungen nicht tragender innerer und äußerer Wände, sowie Raumgliederungselemente beschreiben. Insbesondere bei den Systemnormen gilt zu beachten, dass Bekleidungen lediglich ein Bestandteil von nicht tragenden inneren Wänden (DIN 4103:1984-07) [155] oder hinterlüfteten Außenwandbekleidungen (DIN 18516-1:2010-06) [156] darstellen. Letztere setzen sich beispielsweise aus der Bekleidung, der Hinterlüftungszone, der Dämmung und der Unterkonstruktion zusammen.

Tabelle 8 Regelwerke, die Bekleidungen und Wandelemente im Innen- Außenraum umfassen

Außenanwendung		Innenanwendung	
Systemnormen			
DIN 18516-1:2010-06	Außenwandbekleidungen, hinterlüftet – Anforderungen, Prüfgrundsätze	DIN 4103:2012-05	Nicht tragende innere Wände
		EN 15102:2008-01	Dekorative Wandbekleidung - Rollen- und Plattenform
		DIN EN 1023	Büromöbel – Raumgliederungselemente
Zur Orientierung: Produktnormen und Entwürfe			
E DIN EN 16240:2014-03	Lichtdurchlässige, flache, massive Platten aus Polycarbonat (PC) für Innen- und Außenanwendungen an Dächern, Wänden und Decken – Anforderungen und Prüfverfahren;	E DIN EN 16240:2014-03	Lichtdurchlässige, flache, massive Platten aus Polycarbonat (PC) für Innen- und Außenanwendungen an Dächern, Wänden und Decken – Anforderungen und Prüfverfahren;
DIN EN 1013:2012+A1:2014	Lichtdurchlässige profilierte Platten aus Kunststoff für Innen- und Außenanwendungen für einschalige Dacheindeckungen, Wand- und Deckenbekleidungen - Anforderungen und Prüfverfahren	DIN EN 1013:2012+A1:2014	Lichtdurchlässige profilierte Platten aus Kunststoff für Innen- und Außenanwendungen für einschalige Dacheindeckungen, Wand- und Deckenbekleidungen - Anforderungen und Prüfverfahren
DIN EN15534-5	Verbundwerkstoffe aus Cellulose haltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) oder natürliche Faserverbundwerkstoffe (NFC) genannt) – Teil 5: Anforderungen an Profile und Platten für Wandbekleidungen	DIN EN15534-5	Verbundwerkstoffe aus Cellulose haltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) oder natürliche Faserverbundwerkstoffe (NFC) genannt) – Teil 5: Anforderungen an Profile und Platten für Wandbekleidungen

3.1.2.1 Außenwandbekleidungen, hinterlüftet (DIN 18516:2010-06)

Vorgehängte hinterlüftete Fassaden sind in der DIN 18516:2010-06 'Außenwandbekleidungen, hinterlüftet' [157] geregelt. Für Baustoffe gilt es eine eventuelle Korrosionsbeanspruchung z.B. durch Regen, Luftfeuchtigkeit, Schadstoffe (Chloride, Schwefeldioxid) oder Tauwasserbildung zu beachten. Lediglich Bekleidungselemente, deren Verwendbarkeit für diese Anwendung nachgewiesen ist, dürfen eingesetzt werden. Der Nachweis der Einsetzbarkeit kann durch eine Bauaufsichtliche Zulassung erfolgen [158]. In der Bauaufsichtlichen Zulassung (BAZ) muss die Standsicherheit der Fassadenplatten und deren Befestigung an der Unterkonstruktion durch eine statische Berechnung nachgewiesen werden. Die Aufnahme der Biegemomente in den Fassadenplatten ist mit einer definierten maximal zulässigen Spannung nachzuweisen [159].

Weiterhin müssen physikalische Werte wie Biegefestigkeit nach DIN EN ISO 178, E-Biegemodul und die Rohdichte angegeben werden. Dies gilt auch für geeignete Befestigungsmittel inklusive zulässiger Zuglasten. Sowohl die Anordnung der Befestigung, die Anzahl und Art der Befestigung, die Plattengröße und Plattendicke als auch die Toleranz müssen angegeben werden. Ferner sollen Angaben zum Brandschutz, Wärmeschutz, Schallschutz und Bestimmungen für die Ausführung getätigt werden [160].

Außenwandbekleidungen sollten Grenztemperaturen von – 20 °C und + 80 °C standhalten können [161]. Außenwandbekleidungen müssen im Vergleich zu Vorhangfassaden (DIN EN 13830) nicht CE-zertifiziert werden.

3.1.2.2 Büromöbel – Raumgliederungselemente (DIN 1023)

Für Trennwandelemente gilt die DIN 1023 *‘Büromöbel – Raumgliederungselemente’*. In den Normen DIN 1023-1:1996-05 [162], 2:2001-01 [163] und 3:2001-01 [164] werden Maße, mechanische Sicherheitsanforderungen ferner relevante Prüfungen (Stand sicherheits- und Loslöseprüfung) erläutert. Das Regelwerk zu Raumgliederungselementen enthält keine konkreten Angaben zu Material- bzw. Baustoffanforderungen. Büromöbel dürfen leicht entflammbar sein.

3.1.2.3 Nicht tragende, innere Trennwände (DIN 4103:2012-05)

‘Nicht tragende innere Trennwände sind Bauteile im Inneren einer baulichen Anlage, die nur der Raumtrennung dienen und nicht zur Gebäudeaussteifung herangezogen werden’. DIN 4103:2012-05 [165]

Trennwände müssen so konzipiert werden, dass sie statischen und stoßartigen Belastungen standhalten können. Es dürfen lediglich genormte Baustoffe eingesetzt werden oder Baustoffe, deren Verwendbarkeit nachgewiesen wurde [166]. Das Regelwerk beinhaltet keine konkreten Angaben zu Material- bzw. Baustoffanforderungen.

3.1.2.4 Dekorative Wandbekleidungen – Rollen und Plattenform (DIN EN 15102:2008-01)

Wandbekleidungsprodukte in Rollen- oder Plattenform sind für die Innenbekleidung von Wänden, Trennwänden oder Decken vorgesehen (DIN EN 15102:2008-01) [167]. Sie werden mit einer nach der EN 13238 *‘Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten - Konditionierungsverfahren und allgemeine Regeln für die Auswahl von Trägerplatten’* [168] ausgewählter Trägerplatte verklebt. Das Brandverhalten, die Schallabsorption und der Wärmedurchlasswiderstand müssen angegeben werden. Die einzige Anforderung, die aus dieser Norm abgeleitet werden könnte, wäre die maximale Freisetzung gefährlicher Stoffe für Bekleidungsprodukte, die im Innenraum eingesetzt werden. Dieser Aspekt erscheint relevant, da die Anpassung biobasierter Kunststoffe für Architekturwendungen des Einsatzes verschiedener Additive bedarf.

Nach der EN 12149:1998-01 [169] gelten folgende Werte hinsichtlich der Abgabe gefährlicher Substanzen:

Tabelle 9 Abgabe gefährlicher Substanzen nach der Norm EN 12149 ‚Wandbekleidung in Rollen- und Plattenform‘ Bestimmung der Migration von Schwermetallen und bestimmten anderen extrahierbaren Elementen, des Gehaltes an Vinylchlorid-Monomer sowie der Formaldehydabgabe‘ [169]

Abgabe gefährlicher Substanzen	Norm	Höchstwert [mg/kg]
Formaldehydabgabe	EN 12149:1997; 4.2	120
Schwermetalle (Auswahl)		
Cadmium	EN 12149:1997; 4.3.1, Tabelle1	25
Chrom	EN 12149:1997; 4.3.1, Tabelle1	60
Blei	EN 12149:1997; 4.3.1, Tabelle1	90
Quecksilber	EN 12149:1997; 4.3.1, Tabelle1	20
Selen	EN 12149:1997; 4.3.1, Tabelle1	165
Barium	EN 12149:1997; 4.3.1, Tabelle1	500
Vinylchlorid-Monomer (VCM)	EN 12149:1997; 4.3.2	0,2

3.1.2.5 Produktnormen zur Orientierung – DIN EN 16240: Lichtdurchlässige, flache Massivplatten aus Polycarbonat (PC) für Innen- und Außenanwendungen an Dächern, Wänden und Decken

Die Europäische Norm 16240:2014-03 [170] legt die Anforderungen an lichtdurchlässige, flache, massive Platten aus Polycarbonat (PC) für Innen- und Außenanwendungen an Wänden, Dächern und Decken fest und gilt für lichtdurchlässige, flache, extrudierte massive Platten aus PC mit einer Mindestdicke von 2 mm. Die Dauerhaftigkeit wird durch eine künstliche beschleunigte Alterung nachgewiesen.

Anstatt der Globalstrahlung bei einer natürlichen Bewitterung, die einen Wellenlängenbereich von 300 bis 2450 Nanometer (nm) umfasst, soll in dieser Norm die Bestrahlung zwischen 300 und 400 nm ablaufen. In diesem Wellenlängenbereich befindet sich die für den Abbau von Kunststoffen verantwortliche Strahlung. Das Licht, das auf die Oberfläche des Kunststoffbauteils auftrifft, wird entweder reflektiert oder absorbiert. Die Absorptionswellenlänge der meisten Kunststoffe liegt bei ≥ 300 nm. Der absorbierte Anteil führt zum Abbau des Polymers [171]. Der prozentuale Anteil im Wellenlängenbereich 300-400 nm an der Gesamtstrahlung von 300-2450 nm beträgt 6,8 %. Dies entspricht einer Strahlungsstärke von 74,6 W/m². Um einen Strahlungsenergiewert von 0,68 GJ/m² bei einer Bestrahlungsstärke von 300-400nm zu simulieren, beträgt die Prüfdauer 3148 Stunden. Hierbei muss der Zyklus-Nummer 1 nach EN ISO 4892-2 geprüft werden [172].

Die Veränderung des Gelbwerts nach künstlicher Alterung ist anzugeben (Ermittlung nach 6.2. [172]).

3.1.2.6 Produktnormen zur Orientierung – E DIN EN 1013 Lichtdurchlässige profilierte Platten aus Kunststoff für Innen- und Außenanwendungen für einschalige Dacheindeckungen, Wand- und Deckenbekleidungen

Aussagen über die Dauerhaftigkeit eines Werkstoffes sollen im Entwurf der DIN EN 1013:2007-12 [173] wie folgt getroffen werden:

- Änderung des Gelbwertes nach künstlicher Alterung nach EN ISO 4892-2, Verfahren A [174].

Der Hersteller muss die Änderung der Vergilbung für jede der Klassen A0 bis A2, die sich in ihrer Gesamt-Bestrahlungsstärke und Dauer unterscheiden, angeben.

- Änderung der Biege- und Zugfestigkeit nach der künstlichen Alterung nach EN ISO 4892-2, Verfahren A ausgehend von den Werten unbelasteter Prüfkörper.

Die prozentuale Verringerung ist in den Bereichen <10 %, >10 % bis <20 %, >20 % bis <30 % oder >30 % anzugeben.

- Änderung der Lichtdurchlässigkeit nach der künstlichen Alterung durch Ermittlung des totalen Lichttransmissionsgrades ist zu ermitteln. Dies gilt insbesondere für transparente Werkstoffe.
- Die Beständigkeit gegen Wärmealterung von thermoplastischen Platten ist durch die Änderung des totalen Lichttransmissionsgrades, des Gelbwertes und der Biege-/Zugfestigkeit vor und nach dem Beanspruchen von trockener Wärme anzugeben. Die Probeplatten werden hierfür für 3000 Stunden bei 60 °C in einen Wärmeschrank gelegt.

Diese Prüfungen können daher bereits bei der Materialoptimierung Berücksichtigung finden.

Fassadenbekleidungen müssen schlagregenfest sein. Die Schlagfestigkeit wird auf Bauteilebene im Entwurf der DIN EN 1013 mittels einer 250 g schweren Stahlkugel ermittelt, die aus 1 m Höhe auf einen Prüfkörper fällt. Der Prüfkörper muss rissfrei bleiben und darf nicht brechen

Die DIN EN 16153:2013 - Lichtdurchlässige flache Stegmehrfachplatten aus Polycarbonat (PC) für Innen- und Außenanwendungen an Dächern, Wänden und Decken [175] bietet eine ähnliche Orientierung.

3.1.2.7 Produktnormen zur Orientierung – DIN EN 15534-5: Verbundwerkstoffe aus cellulosehaltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) oder Naturfaserverbundwerkstoffe (NFC) genannt – Teil 5: Anforderungen an Profile und Formteile für Wandbekleidungen

Die DIN EN 15534:2014-04 [176], Verbundwerkstoffe aus cellulosehaltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) oder Naturfaserver-

bundwerkstoffe (NFC) genannt)‘ wird insbesondere dann relevant, sobald biobasierte Kunststoffe mit Naturfasern oder anderen cellulosehaltigen Komponenten compoundiert werden. In dieser Norm werden die Eigenschaften von Profilen, Formteilen und Platten für Wandbekleidungen im Außen- oder Innenbereich, die aus cellulosehaltigen Materialien und Thermoplasten hergestellt sind, festgelegt.

Bei Profilen für Wandbekleidungen soll eine Schlagfestigkeitsprüfung nach EN 477 in mehreren Energiestufen von 100 g bis zu einer Gesamtmasse des Fallbolzens von 2000 g durchgeführt werden [177] [178].

Bei Endprodukten für nicht tragende Anwendungen soll außerdem neben dem Zug- und Biegeverhalten das Kriechverhalten eruiert werden [179].

Auch hinsichtlich thermischer Eigenschaften werden keine Vorgaben gesetzt. Vielmehr soll die Wärmeformbeständigkeitstemperatur (HDT), die lineare thermische Ausdehnung, sowie der Wärmeschrumpf und das Brandverhalten bestimmt und angegeben werden [180].

Die Dauerhaftigkeit kann bereits auf Materialebene untersucht und optimiert werden. Folgende Eigenschaften müssen bei der Anwendung in der Gebrauchsklasse 3 – *‘Anwendungen im Außenbereich ohne Erdkontakt Boden‘* (aus Verbundwerkstoffe aus cellulosehaltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer Werkstoffe (WPC) oder natürliche Faserverbundwerkstoffe (NFC) genannt) – Teil 5: Anforderungen an Profile und Platten für Wandbekleidungen; Deutsche Fassung prEN 15534-5:2012 [181] nachgewiesen werden.

- Beständigkeit gegen künstliche Bewitterung

Nach der Durchführung einer 300 stündigen künstlichen Alterung nach EN ISO 4892-2:2006, Zyklus 1 sollte der Farbabstand Delta E bei einer Farbmessung zur Ermittlung der LAB-Werte nach EN ISO 11664-4 $s \leq 15$ sein [182].

- Beständigkeit gegen Feuchtigkeit

Die Feuchtigkeitsbeständigkeit wird mittels Kochversuch [183], sowie unter zyklischen Bedingungen untersucht. Es wird die Abnahme der Biegefestigkeit angegeben. Nach dem Kochversuch muss der Mittelwert der Wasseraufnahme $\leq 8 \%$ sein. Überdies gelten maximale Mittelwerte und Einzelwerte hinsichtlich Dicken-, Breiten- und Längenquellung [184].

Falls vom Kunden oder weiteren Rechtsvorschriften verlangt, müssen gegebenenfalls weitere Eigenschaften ermittelt werden:

- Beständigkeit gegen natürliche Alterung

Prüfkörper werden mindestens 8760 Stunden durch eine Freibewitterung nach EN ISO 877-2:2010, Verfahren A beansprucht. Die Abnahme der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls soll angegeben werden. Es wird ebenfalls Delta E im Zuge der Farbmessungen angegeben oder Änderung der Farbe anhand des Graumaßstabs [185]

- Beständigkeit gegen Termitenbefall
- Beständigkeit gegen biologischen Befall
- Beständigkeit gegen Salzsprühnebel
- Der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient bei Außenanwendungen soll $\leq 50 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ betragen [186].
- Haltevermögen von Nägeln und Schrauben [187]

3.1.3 Ästhetische und haptische Anforderungen

Neben rein funktionalen und bautechnischen Forderungen ebenso gesetzlichen Reglements sind für Architekturwendungen, neben der Wirtschaftlichkeit insbesondere auch ästhetische und haptische Aspekte relevant.

Optische Qualitäten umfassen unter anderem die Oberflächengüte (z.B. Kratzfestigkeit), die auch zur Dauerhaftigkeit beiträgt, die Farbechtheit und die hochwertige Erscheinung des Materials. Insbesondere bei Kunststoffen und daher auch Biokunststoffen gilt es eine zu plastikartige Erscheinung zu vermeiden. Durch die Oberflächenbeschaffenheit des Formgebungswerkzeuges können glänzende, matte, raue oder strukturierte Oberflächen und somit auch unterschiedliche Wirkungen des Kunststoffes geschaffen werden.

Wichtig erscheint auch die Farbe, Farbgebung oder Lichtdurchlässigkeit des Biokunststoffes. Ist beispielsweise nur ein dunkelbrauner Werkstoff ausführbar, so ist die Einsatzbreite des Materials möglicherweise gering. Der bei einigen Biokunststoffen bekannte Gelbstich (z.B. bei Polylactid) wirkt in sichtbaren Anwendungen nicht ansprechend, da der Farbton oftmals mit einer Vergilbung - einer Alterserscheinung - assoziiert wird. Es muss auch eine Aussage getroffen werden können, wie sich der biobasierte Werkstoff über die Zeit verändert.

Eine weitere wichtige Anforderung stellen aufgrund der Einzigartigkeit jeder Bauaufgabe die Gestaltungs- und Weiterbearbeitungsmöglichkeiten generell dar. Beispielsweise die Realisierbarkeit unterschiedlicher Oberflächenstrukturen oder Formteile durch das Tiefziehen thermoplastischer Halbzeuge (z.B. mit extrudierten Vollplatten) oder auch die Bearbeitung durch das CNC-Fräsen.

Die meisten biobasierten, thermoplastischen Kunststoffe lassen sich rein optisch nicht von konventionellen, erdölbasierten Kunststoffen unterscheiden. Die Nachhaltigkeit des Materials kann durch eine Kennzeichnung (z.B. TÜV- oder Vinçotte-Siegel) sichtbar ge-

macht werden. Die Rohstoffherkunft bzw. Biobasiertheit könnte auch mit der Materialanmut sichtbar gemacht werden, beispielsweise durch einen Verbund mit natürlichen Fasern oder Blättern (siehe auch *Kapitel 6.2 Gestaltungsmöglichkeiten*).

3.2 Zusammenfassung der Anforderungen

Gemäß den Grundanforderungen der Bauproduktenverordnung an Gebäude muss neben dem Brandschutz auch die Standsicherheit und mechanische Festigkeit gewährleistet werden. Zur Anpassung eines biobasierten Kunststoffes für die Anwendung im Innen- oder Außenraum (*Kapitel 4* und *5*) wurde daher Folgendes berücksichtigt:

In der DIN EN ISO 13501 wird das Brandverhalten nach Alterung bisher nicht betrachtet. Im Brandschachttest werden nach der DIN 4102-16:1998-05 (für die Baustoffklasse B1, A1 und A2) auch Proben nach zwei- und fünfjähriger Freibewitterung geprüft. Daher macht es Sinn in der europäischen „Zentralprüfmethode“ *Single Burning Item (SBI)* auch gealterte Bauteile zu berücksichtigen [188]. Die zu erreichende Brandklasse auf Materialebene (Spalte 4 und 7 *Tabelle 10*) dient in vorliegender Arbeit bei Versuchen mit verschiedenen Flammenschutzmitteln (*Kapitel 4.5*) als Indikator, ob notwendige Baustoffklassen erreicht werden könnten.

Tabelle 10 Anforderungen an das Brandverhalten bei Innen- und Außenanwendung unterschiedlicher Bauteile [189]

	Innenanwendung			Außenanwendung		
	Anforderung auf Bauteilebene	Regelwerk	zu erreichende Brandklasse auf Materialebene	Anforderung auf Bauteilebene	Regelwerk	zu erreichende Brandklasse auf Materialebene
Brandverhalten/ Baustoffklasse						
	(Bekleidung) Trennwände/ Innere Wände			Bekleidung Außenwände		
GK 1	Leicht entflammbar möglich	MBO §26	UL 94-V0	normal entflammbar: DIN 4102-B2 DIN EN 13501-D, E	MBO §28	UL 94-V0
GK 2	normal entflammbar: DIN 4102-B2; DIN EN 13501-D, E		UL 94-V0	Siehe GK 1		UL 94-V0
GK 3	leicht entflammbare Baustoffe dürfen nur verwendet werden, wenn sie in Verbindung mit anderen Baustoffen nicht leicht entflammbar sind.		UL 94-V0	Siehe GK 1		UL 94-V0
GK 4	Bei GK 4 und 5 wird teilweise auch DIN 4102-B1 oder DIN EN 13501- B, C gewünscht / verlangt		UL 94-V0	schwer entflammbar DIN 4102-B1 oder DIN EN 13501- B, C		UL 94-V0
GK 5			UL 94-V0	siehe GK 4		UL 94-V0
	Raumgliederungselemente (Büromöbel)					
	leicht entflammbar erlaubt , bei öffentlichen Bauten wird teilweise auch DIN 4102-B1 oder DIN EN 13501- B, C verlangt		UL 94-V1 / V2			UL 94-V1 / V2
Feuerwiderstand						
	(Bekleidung) Trennwände/ Innere Wände	MBO §29, §26		Bekleidung Außenwände	MBO §28	
GK 1	F0			F0		
GK 2	F30 (gilt nicht für Wohngebäude)			F0		
GK 3	F30			F0		
GK 4	F60			F30		
GK 5	F90		F30			

GK = Gebäudeklasse
>400 m²

GK1 bis GK3: h ≤ 7 m, ≤ 400 m² | GK 2: h ≤ 13 m, ≤ 400 m² | GK 5: h ≤ 22 m,

Tabelle 11 Weitere Materialanforderungen bei Innen- und Außenanwendung

	Innenanwendung		Außenanwendung		Berücksichtigung in vorliegender Arbeit
	Anforderung	Regelwerk (Auswahl)	Anforderung	Regelwerk (Auswahl)	
Mechanische Eigenschaften					
Biege-/ Zugfestigkeit	muss angegeben werden	E EN1013:2007 (D)	siehe Innenanwendung		Zugversuche nach DIN EN ISO 527:2012 [190]
Beständigkeit gegen Schlagbeanspruchung durch Fallbolzen	Pro Energiestufe (100-2000 g) darf bei jeweils 10 Prüfungen maximal 1 Fehler (Bruch oder Riss) auftreten	E DIN EN 15534-1: 2012; 7.2. Prüfung nach EN 477:1995; DIN EN 15534-1, 8.2.2	siehe Innenanwendung		nein
		E DIN EN 16240: 2011; 6.4			
Thermische Eigenschaften					
Wärmeformbeständigkeit	mindestens 60 °C (HDT-B) geringster Wert eines erdöl-basierten Kunststoffes (PVC U), der im Innenraum eingesetzt wird	keine Regelung	-20 °C bis +80 °C	DIN 18515-1	Ermittlung HDT-B nach DIN EN ISO 75 [191]
linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient		keine Regelung	$\leq 50 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	E DIN EN 15534-5	nein
Dauerhaftigkeit					
Beständigkeit gegen Künstliche Bestrahlung / Bewitterung		E DIN EN 1013: 2007	Prüfdauer 1259-5666h, Änderung der Farbmessung angeben, prozentuale Verringerung der Biege-, Zugfestigkeit angeben	E DIN EN 1013:2007; 6.3 Tabelle 6	Künstliches Bewittern nach DIN EN ISO 4892, Ermittlung Farbwerte und Zugversuche
			300 h nach DIN EN ISO 4892-2, Zyklus 1	E DIN EN 15534-5: 2012	
Beständigkeit natürliche Alterung		keine Regelung	8760 h Freibewitterung nach EN ISO 877-2, Verfahren A	DIN EN 155345: 2012; 8.2	Freibewitterung nach EN ISO 877:2010
Beständigkeit gegen Wärmealterung	3000 h Wärmelagerung bei 60 °C, Ermittlung Gelbwert	E DIN EN 1013:2007; 6.6	siehe Innenanwendung		Wärmelagerung
Beständigkeit gegen Feuchtigkeit		keine Regelung	Abnahme der Biegefestigkeit angeben. Wasseraufnahme $\leq 8 \%$ (Massezunahme)	DIN EN 15534-5 4.4.4., Tabelle 6	Wasseraufnahme nach DIN EN ISO 62:2008, Wasserlagerung
Beständigkeit gegen biologischen Befall				EN 15534-1:2012; 8.4 -8.5	nein

Es gilt, dass stets mechanische Eigenschaften wie Zug- und Biegeeigenschaften, das Kriechverhalten, Haltevermögen von Nägeln und Schrauben etc. angegeben werden sollten. Sie spielen bei der Modifikation zunächst keine Rolle.

Wie bereits zu Beginn des Kapitels erläutert, soll ein Bauteil seine Funktion *‘über einen wirtschaftlich angemessenen Zeitraum erfüllen’* (Europäische Union: Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 09. März 2011)[192].

Der Bund technischer Experten (BTE) nimmt in seinem BTE-Katalog für Kunststoffbekleidungen tragender Außenwände eine durchschnittliche technische Lebensdauer von 30 Jahren an. Diese beschreibt die nutzbare Zeit. Bei Bekleidungen von Innenwänden beträgt sie ungefähr 40 Jahre. Zu beachten ist jedoch, dass die wirtschaftliche Lebensdauer meist kürzer ist, da sie vom Zeitgeist und sich ändernden Nutzeransprüchen abhängt [193].

Auf Gestaltungsmöglichkeiten von Biokunststoffen zur Erzielung unterschiedlicher optischer und haptischer Qualitäten für Architekturanwendungen wird in *Kapitel 6* eingegangen.

4 Innenanwendung – Beispielhafte Entwicklung

Im vorliegenden Kapitel wird unter Berücksichtigung der in Teil 3 genannten Anforderungen eine Anwendungsmöglichkeit biobasierter Kunststoffe in Innenräumen von Gebäuden vorgeschlagen. Dies erfolgt beispielhaft an der Entwicklung eines möglichst transluzenten Akustikmoduls, das als Raumgliederungselement, für Raum-im-Raum-Systeme oder als Bestandteil von nicht tragenden inneren Wänden (Trennwänden) eingesetzt werden soll.

Lichtdurchlässige Bauteile lassen sich lediglich mit Kunststoffen oder Glas realisieren. Die Akustikfunktion kann durch die Form, beispielsweise mittels einer bestimmten Struktur oder Perforation, in das Bauteil integriert werden. Nur Kunststoffe bieten die Eigenschaftskombination der Transparenz und der freien Formbarkeit. Biobasierte Kunststoffe weisen den zusätzlichen Vorteil auf, dass sie auf Basis nachwachsender Rohstoffe hergestellt werden. Der Baustoff Holz stellt zwar einen nachhaltigen Baustoff dar, dieser lässt sich jedoch schwieriger verformen und ist nicht lichtdurchlässig.

Das Forschungsprojekt mit dem Titel '*Transparente und transluzente Leichtbauplatten aus nachwachsenden Rohstoffen als Raumgliederungselemente mit Akustikfunktion*' wurde im Zeitraum 2010/2011 19 Monate lang von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert und gemeinsam mit dem Projektpartner Nimbus Group, welcher mit der Marke *Rosso* das Segment der akustisch wirksamen, flexiblen Raumgliederungssysteme (Abb. 22) bedient, durchgeführt.

4.1 Verwendung erdölbasierter Kunststoffe in Innenräumen

Kunststoffe werden in Innenräumen vor allem wegen ihres geringen Gewichts wie auch den vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten bezüglich Farbe, Form und ihrer Lichtdurchlässigkeit eingesetzt.

Hierbei handelt es sich vorwiegend um Wabenpaneele oder andere Sandwichplatten, Hohlkammerplatten und Vollplatten aus den Thermoplasten Polycarbonat (PC), Polyethylenterephthalat (PET), Polyethylenenterephthalat Glycol (PETG), Polymethylmethacrylat (PMMA) oder auch um Faserverstärkte Kunststoffe, wie beispielsweise GFK.

Anwendung finden die Platten und Formteile insbesondere in Raumgliederungselementen, nicht tragenden inneren Wänden (Trennwände), Raum-im-Raum-Systemen oder Wandbekleidungen.



Abb. 22 Rossoacoustic CP 30 Raumteiler aus Sandwichplatten mit mikroperforierter Deckschicht © Nimbus
 Abb. 23 Clear-PEP® Color - Farbige Sandwichplatten aus Polycarbonat © Design Composite

4.2 Stand der Technik – Biokunststoffe in Innenräumen

Sandwichpaneele aus dem Biokunststoff Polylactid werden von der Firma Marvel GmbH unter dem Produktnamen *Marvel Bioresin* angeboten [194]. Eine weitere PLA-basierte Leichtbauplatte konnte die belgische Firma EconCore N.V. auf den Markt bringen [195]. Beide Produkte sind hinsichtlich des Brandverhaltens und der Wärmeformbeständigkeit von Polylactid nicht optimiert. Die maximale Anwendungstemperatur liegt bei 55 °C.

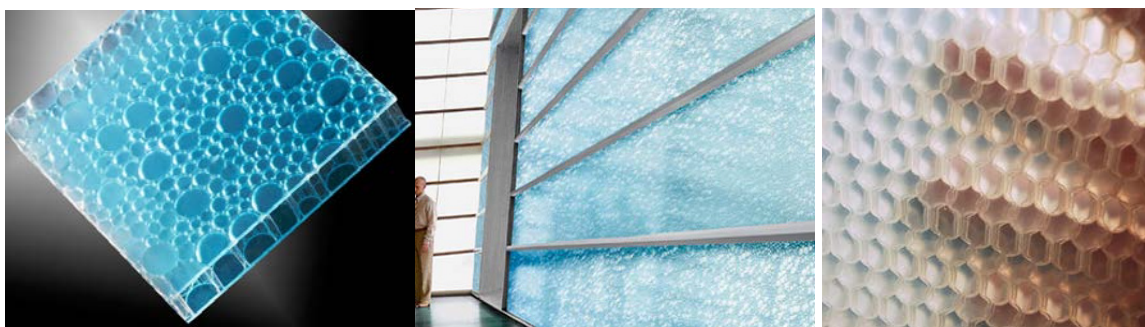


Abb. 24 und Abb. 25 MARVEL BIORESIN® - Biokunstglasplatten aus Polylactid © Marvel GmbH
 Abb. 26 ThermHex von EconCore- Wabenplatten aus Polylactid © EconCore N.V./ Belgium

Celluloseacetate können infrarote Strahlung in hohem Maße absorbieren und weisen somit eine gute Wärmedämmeigenschaft auf [196]. Die transparente Wärmedämmung (TWD) *Moniflex* (Abb.27) aus gefalteten Cellulosediacetat-Folien der schwedischen Firma Isoflex AB wurde bereits seit den 1930er Jahren als Wärme- und Schallschutz in

Transportfahrzeugen, vor allem in Zügen [197], aber auch in Lichtbändern und Dachverglasungen ferner zur Füllung für Fassaden-Doppelverglasungen eingesetzt. Ein Beispiel ist die Kolbenschmidt-, ehemals Knorr-Arena in Heilbronn [198]. *Moniflex* wird heute nicht mehr produziert. Mit *TiMax® CA* aus Cellulosetriacetat-Folien bietet die Firma Wacotech ein vergleichbares Produkt an (*Abb.28*). Es weist eine Dauereinsatztemperatur von 100 °C und die Baustoffklasse DIN 4102-B2 auf. Bei Bedarf kann eine flammgeschützte Type (DIN 4102 B1) als Sonderanfertigung hergestellt werden [199]. Es handelt sich hierbei, wie bereits erwähnt, um eine transparente Wärmedämmung (TWD), die beispielsweise im Verbund mit Profilglasfassaden eingesetzt wird. Der Anteil nachwachsender Rohstoffe liegt bei Cellulosetriacetaten jedoch unter 50 %.

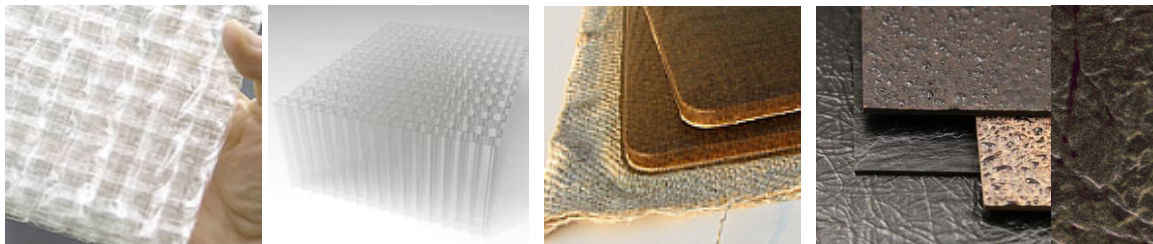


Abb. 27 Moniflex von Isoflex AB - TWD aus Cellulosediacetat © Isoflex AB/ Schweden

Abb. 28 TiMax® CA – TWD aus Cellulosetriacetat © Wacotech GmbH & Co. KG

Abb. 29 Biotex Flachs/ PLA - Prepreg aus Flachsgewebe und PLA © Netcomposites [200]

Abb. 30 Re-Y-Stone® von Resopal - Platten aus Zuckerrohr-Harz und Altpapier © Dekodur

Die Firma Composites Evolution bietet mit dem Produkt *Biotex Flax/PLA* kunststoffimprägnierte Gewebe aus Flachs mit Polylactid als Bindemittel an (*Abb. 29*). Die Prepregs können mittels thermoplastischem Formpressen zu Platten oder Formteilen für Fahrzeuginterieur, Verkleidungen in Gebäuden oder zu Möbeln verarbeitet werden [201]. Flammschutz ausgerüstete Varianten bietet Composites Evolution mit dem Produkt *PFA Prepregs* an. Das Halbzeug greift auf ein duroplastisches Bioharz auf der Basis von Polyfurfurylalkohol (PFA) zurück, welches aus Hemicellulose hergestellt wird. Das Harz weist ein vergleichbares Brandverhalten sowie eine ähnliche Wärmeformbeständigkeit wie Phenolharz auf. Ferner gibt es zusätzlich Flammschutz ausgerüstete Varianten [202] [203].

Ein Produkt, das ebenso auf einem duroplastischen Harz aus Bagasse und Altpapier basiert, ist *Re-Y-Stone®* von Resopal (*Abb. 30*). Die großformatigen Platten können zur Innenwandbekleidung eingesetzt werden [204].



Abb. 31 Biofliese aus Leinölepoxid, Naturfasern und Mehl fossiler Kieselalgen © Fraunhofer IWM

Abb. 32 Kokoboard – gepresstes Reisstroh mit Ligninmatrix, Bibliothek Ubon Ratchathani, Thailand [205]

Abb. 33 Wandbekleidungen aus gepresster Bambuspulpe © 3DWalldekor/ Niederlande

Die Biofliese (Abb. 31) besteht aus einem Epoxid ähnlichen Harz auf der Basis von Leinöl, verschiedenen Naturfasern und Kieselgur, das sind gemahlene Siliciumdioxidschalen fossiler Kieselalgen. Das biobasierte, duroplastische Fliesensystem wurde am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM in Halle entwickelt. Die Fliesen sollen ressourcen- und energieeffizienter und ebenso biegsamer als ihr keramisches Pendant sein. Durch die Herstellung im Gießverfahren können individuelle Formen, Muster und Farben einfach realisiert werden [206].

Die in der Abb. 32 gezeigten Platten werden unter dem Produktnamen *Kokoboard* in Thailand hergestellt und vertrieben [207]. Das in Reisstroh und Kokosnuss-Kurzfasern enthaltene, natürlich vorkommende Biopolymer Lignin wird durch das Pressen unter Druck und Wärme plastifiziert und fungiert so als Bindemittel. Durch im Reisstroh enthaltene Silicate ist bereits ein natürliches Flammschutzmittel integriert.

Ein ansprechendes, wenngleich biokunststofffreies Beispiel für Produkte aus vorwiegend nachwachsenden Rohstoffen zur Bekleidung von Innenwänden stellt die Bambusfaserplatte der Firma 3DWalldekor aus den Niederlanden dar (Abb. 33). Die dreidimensionalen Platten basieren laut Unternehmensdarstellung hauptsächlich auf Bambuspulpe [208] und weisen somit auch einen hohen Anteil nachwachsender Rohstoffe auf.

Neben einem hohen Anteil erneuerbarer Ressourcen sind insbesondere auch die Herstellungskosten und Ästhetik wichtige Kriterien für die erfolgreiche Vermarktung von nachhaltigen Bauprodukten.

4.3 Erläuterungen zum Forschungsprojekt ‚Transparente und transluzente Leichtbauplatten aus nachwachsenden Rohstoffen als Raumgliederungselemente mit Akustikfunktion‘

Die Idee zum DBU-geförderten Forschungsprojekt *‘Transparente und transluzente Leichtbauplatten aus nachwachsenden Rohstoffen als Raumgliederungselemente mit Akustikfunktion‘* entstand aus dem Antrieb heraus, einen neuartigen Ansatz zu finden. Alle bisher angedachten Forschungen zu Bioverbundwerkstoffen und Produkten für Innenraumanwendungen, wie beispielsweise Baustoffplatten, Wandverkleidungen, Trennwände etc., sind opak. Auf dem Markt verfügbare transparente oder lichtdurchlässige Sandwichplatten aus Polylactid sind hinsichtlich des Brandverhaltens und der Wärmeformbeständigkeit nicht an Anwendungen im Innenraum angepasst. Transparente Wärmedämmungen (TWD) aus Celluloseacetaten weisen einen geringen Anteil nachwachsender Rohstoffe auf und sind nicht im Verbund mit Deckschichten aus biobasierten Kunststoffen erhältlich.

Im Hinblick auf die spätere Vermarktbarkeit erscheint es von Bedeutung, Alleinstellungsmerkmale zu eruieren. Beispielsweise gibt es für Strohplatten, die als Alternative zu Spanplatten für Trennwände fungieren könnten, bereits mehrere Produkte (StrawCor Wandelemente; Strawtec modulares Wandsystem aus hochverdichtetem Getreidestroh; Superplatte SP/ Strohlos; Kokoboard etc.), so dass es wenig sinnvoll erscheint eine weitere Strohplatte zu entwickeln, die später auf dem Markt mit anderen Strohplatten und Holzfaserplatten konkurrieren muss. Meist wird das günstigere und nicht das nachhaltigere Produkt gewählt.

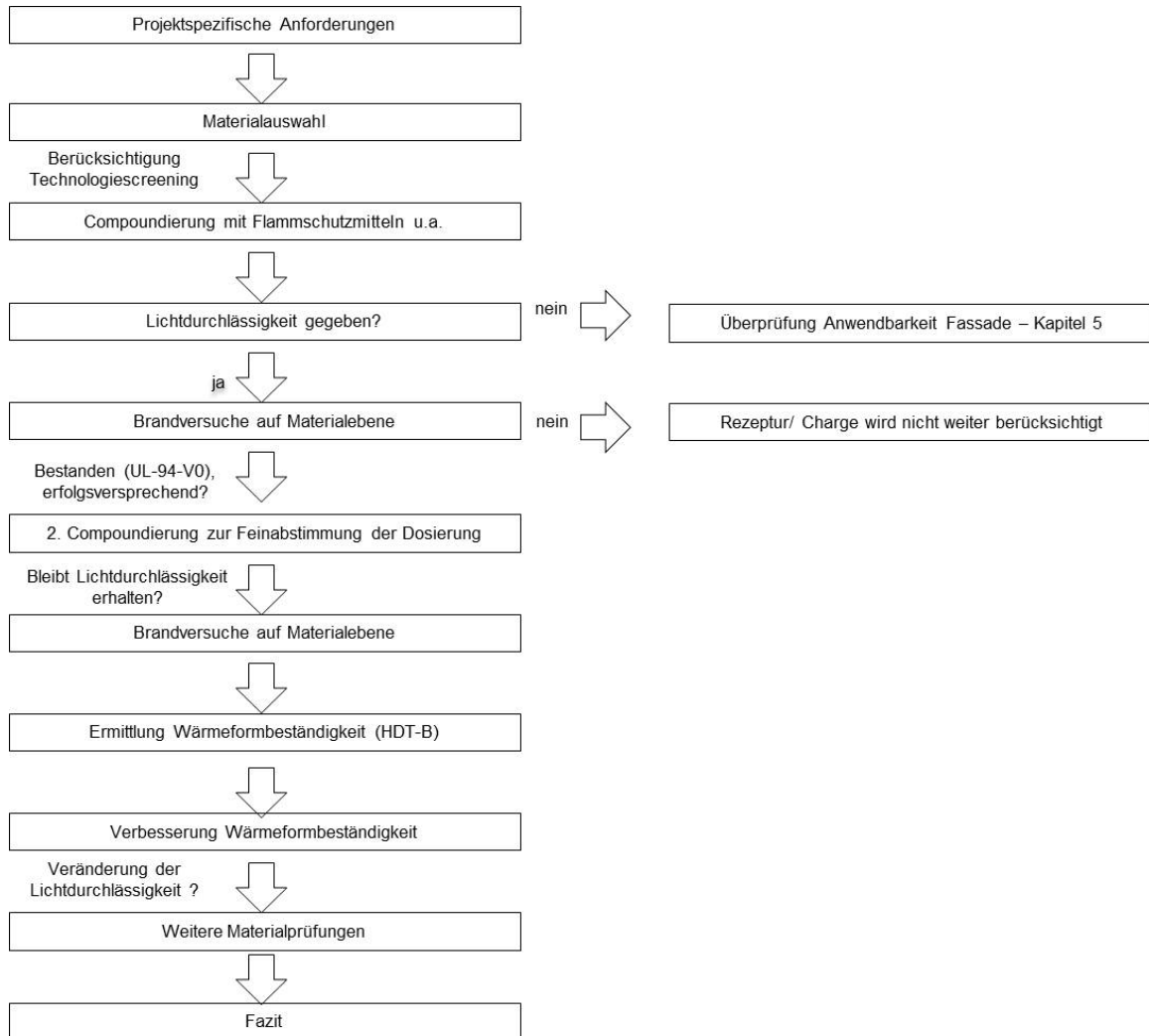
Biokunststoffe wie beispielsweise Polylactid oder Celluloseacetat sind transparent. Konventionelle Kunststoffe wie PET, PET-G, PMMA oder PC werden aufgrund ihrer freien Formbarkeit und Lichtdurchlässigkeit eingesetzt. Zudem sind Halbzeuge aus genannten Werkstoffen leichter als Glas, sie lassen sich einfärben, nachbearbeiten (bohren, fräsen, tiefziehen) und sind daher universell im sichtbaren Innen- und auch Außenraum einsetzbar.

Daher galt die Frage, ob sich lichtdurchlässige, funktionsintegrierte Platten aus biobasierten Kunststoffen entwickeln lassen, die an die Anforderungen in (öffentlichen) Innenräumen hinsichtlich Wärmeformbeständigkeit und Brandverhalten angepasst sind und sich als nicht tragende innere Wände oder Trennwandelemente einsetzen lassen.

4.3.1 Vorgehen

Unter Berücksichtigung der Anforderungen werden die ausgewählten Biokunststoffe mit Flammenschutzmitteln compoundiert. Die resultierende Lichtdurchlässigkeit stellt dabei zunächst das wichtigste Beurteilungskriterium dar. Opake Werkstoffe werden nicht wei-

ter berücksichtigt. Wird bei transparenten bis transluzenten Compounds auf Materialebene die Brandklasse UL94-V0 erreicht, werden zur Feinabstimmung der Rezeptur weitere Compoundierungen und Brandversuche durchgeführt. Anschließend erfolgen die Ermittlung und gegebenenfalls die Verbesserung der Wärmeformbeständigkeit unter Beachtung des Transparenzgrades abschließend weitere Materialprüfungen zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit.



4.3.2 Projektspezifische Anforderung

Neben den in *Kapitel 2* genannten Anforderungen müssen projektspezifische Forderungen und Vorgaben berücksichtigt werden:

- Für Innenraumanwendungen gibt es hinsichtlich der Wärmeformbeständigkeit keine klaren Vorgaben. Die Standsicherheit muss gewährleistet sein. Fensterprofile aus PVC-U weisen von Kunststoffen, die in Innenräumen eingesetzt werden, mit einer HDT-B von 61 °C (ISO 75) die geringste Wärmeformbeständigkeit auf (siehe auch 4.6.2 Resultierende Wärmeformbeständigkeit des (modifizierten) Po-

lylactids). Daher soll die **Wärmeformbeständigkeit mindestens 60 °C (HDT-B) betragen**.

- Das Akustikmodul soll als Bestandteil nicht tragender innerer Wände alle Gebäudeklassen bedienen können. Daher wird mindestens die Baustoffklasse **normal entflammbar** (Baustoffklasse DIN 4102-B2 oder DIN EN 13501-D oder E) angestrebt (vgl. 3.1.1.2, 3.1.2.3, 3.2). Bei den Brandversuchen, die zunächst nur auf Materialebene stattfinden können, muss daher die UL 94 V-0 erreicht werden. Sollte dieses Ziel nicht erreicht werden können, bleibt die Option leicht entflammbare Akustik-Module zu realisieren. Diese können als Raumgliederungselemente, eingesetzt werden, da sie nach der Norm DIN 1023 (siehe auch 3.1.2.2) zu den Büromöbeln zählen. Weiterhin ist ein Einsatz in Bauwerken der Gebäudeklasse 1 möglich. Hier gibt es keine Anforderungen hinsichtlich des Feuerwiderstands (F0) (siehe Tabelle 4)
- Es dürfen **keine gefährlichen Stoffe** abgegeben werden, die die Innenraumluftqualität belasten. Dies ist bei Auswahl der Flammenschutzmittel zu beachten.
- **UV-Beständigkeit:** Die Akustikleichtbauplatte wird direkt im sichtbaren Bereich eingebaut. Eine altersbedingte Gelbfärbung (Vergilbung) nach kurzer Nutzungsphase ist nicht gewünscht. Das Verhalten des Compounds unter Einwirkung von Sonnenlicht muss daher untersucht werden.
- Ein Kunststoff bedingter Gelbstich soll beseitigt werden.
- **Akustische Wirksamkeit der Leichtbauplatte.** Durch mikroperforierte Folienmembranen als Deckschichten wird beim Nimbus-Produkt *Rossoacoustic CP30* [209] Schall in Wärme umgewandelt. So können auch lichtdurchlässige Materialien Schall absorbieren und die Nachhallzeit verringern. Das vom Fraunhofer - Institut für Bauphysik und der Nimbus Group für diesen Einsatzzweck entwickelte Prinzip [210] soll auch in der biobasierten Akustikplatte angewendet werden. Das bedeutet, die Perforation bzw. Umformbarkeit einer biobasierten Folie muss gewährleistet werden. Durchmesser und Abstand der Löcher hängen von der Dicke der Deckschicht ab. Die *Rossoacoustic*-Folien weisen bei einer Folienstärke von 400 Mikrometer einen Lochabstand von 6 mm auf [211].
- Gewünschte Optik des Akustikelements: Milchig matt, transluzent.
- Mehrere Produktausführungen hinsichtlich Farbgebung, Sandwichkernvarianten etc. sollten möglich sein.
- Zum Zwecke der überzeugenden Vermarktung eines nachhaltigen Produktes wird ein Anteil nachwachsender Rohstoffe im Produkt von über 80% angestrebt.
- Die Herstellungskosten der biobasierten Akustikplatten sollen maximal 80€/m² betragen (Stand 2010).

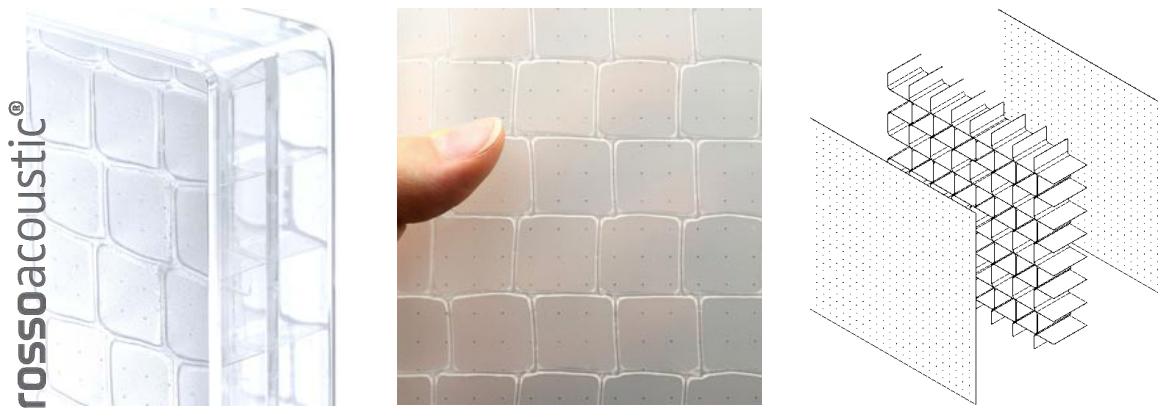


Abb. 34 Akustikplatte zur flexiblen Raumgliederung – rossoacoustic® © nimbus

Abb. 35 Rossoacoustic CP 30, Transluzent matt © nimbus [212]

Abb. 36 Prinzipskizze Aufbau der Akustikplatte als Wabenplatte mit mikroperforierter Deckschicht © nimbus

4.3.2.1 Materialrecherche – vorhandene Halbzeuge und verfügbare Granulate

Zu Beginn des Projekts wurde eine biobasierte Version des Raumgliederungselements Rossoacoustic CP30 (Abb. 34) mit einem anders gestalteten Sandwichkern anvisiert.

Zunächst wurde eruiert, ob geeignete, biobasierte Halbzeuge (Folien) verfügbar sind und ob sich diese umformen lassen. Folien aus Standard-Polylactid für Verpackungen, Kreditkarten etc. sind in unterschiedlichen Dicken verfügbar. Folien mit gewünschter Wärmeformbeständigkeit und FlammSchutzausrüstung sind nicht erhältlich. Polylactid-Granulate mit FlammSchutz (LATIGEA B01-V0HF [213], SUPLA™ C1003 [214]) bzw. PLA-Granulate mit einer höheren Wärmeformbeständigkeit (z.B. Biofront [215], Ingeo™ 3260 HP [216]) sind nicht mehr lichtdurchlässig. Eine transparente, wärmeformbeständige PLA-Folie kam im Herbst 2012 (nach Projektende) auf den Markt [217]. Der BrandSchutz wurde hier nicht berücksichtigt, da lediglich Anwendungen im Verpackungsbe- reich angedacht sind.

Die Folienextrusion zur Herstellung von Folien aus modifiziertem Polylactid mit einer Breite von ungefähr 120 cm wird erst ab ca. einer Tonne [218] durchgeführt, da hier große Extrusionsmaschinen notwendig sind. Polylactid lässt sich hervorragend tiefziehen (Abb. 37), ritzprägen und falten (Abb. 38).

Folien aus mit FlammSchutz ausgerüstetem Cellulosediacetat sind nur in der Foliendicke 36 µm verfügbar [219]. Die annähernd zehnfache Dicke wird benötigt. Die Folien werden im Gießverfahren auf einem Endlosband hergestellt. Eine Fabrikation nach Wunsch kann auch hier erst ab 1,5 -2 Tonnen erfolgen. Eigene Versuche haben gezeigt, dass die Folien nur bedingt tiefziehbar sind. Sie lassen sich jedoch ritzprägen und falten. Die Wärmeformbeständigkeit wäre ausreichend. Folien aus Cellulosetriacetat (CTA) sind lediglich ohne FlammSchutz verfügbar. Sie lassen sich nicht tiefziehen (Abb. 39) und falten. CTA wird daher nicht weiter berücksichtigt.



Abb. 37 Tiefgezogenes Formteil aus PLA mit Werkzeug, Seminar biocompositions SS 09 Stefan Schädel © Foto Pixelcatcher

Abb. 38 Faltkern aus perforierten PLA-Folien, Herstellung durch Foldcore © Foto Pixelcatcher

Abb. 39 Tiefziehversuch mit einer Cellulosetriacetatfolie © Foto Pixelcatcher

4.3.2.2 Technologiescreening

Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt 4.3.2.1 erläutert, wurden Sandwichkerne teilweise tiefgezogen. Auch das Twin-Sheet-Verfahren wurde geprüft. Hierbei werden zwei Folien gleichzeitig tiefgezogen, wobei Hohlkörper entstehen können (Abb. 42). Aus akustischer Sicht sollte der Sandwichkern offen sein. Daher wurden PLA- und CDA-Folien perforiert und wieder mit Abziehfolien kaschiert, um beim Tiefziehen das nötige Vakuum erzeugen zu können. Die Kaschierfolie zieht sich jedoch beim Vakuumverformen zusammen, gewünschte Strukturen werden nicht richtig abgebildet (Abb. 40). In einem weiteren Versuch wurden Streifen aus Cellulosediacetatfolien tiefgezogen, die dann zu einer Wabenplatte verschweißt oder verklebt wurden (Abb. 41).

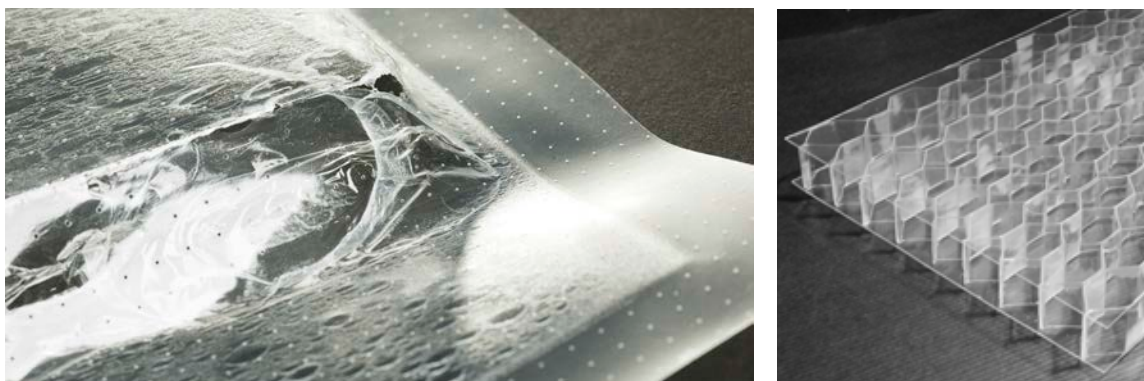


Abb. 40 Perforierte und kaschierte Folie nach dem Tiefziehversuch © Foto: Pixelcatcher

Abb. 41 Wabenplatte aus Cellulosediacetat – Seminarergebnis ITKE Biocompositions SS 09 © S. Ischka

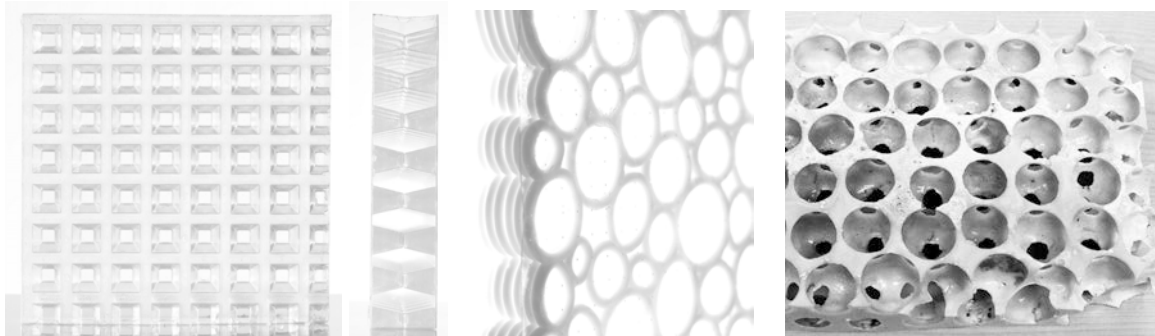


Abb. 42 Hohlkammer-Sandwichkern aus PLA (Twin-Sheet), Herstellung: Hombach KT © Foto: Pixelcatcher

Abb. 43 Sandwichkern aus PLA, Herstellung: Firma Koziol ©Foto: Pixelcatcher

Abb. 44 Schaumkern aus duroplastischem Bioharz

Weiterhin wurden Demonstratoren mit einem Spritzgusskern (Abb. 43) getestet und ein Sandwichkern mittels Extrusion, Verstrecken einer Kunststoffplatte oder dem Schäumen ermittelt. Allen Herstellungstechnologien ist jedoch gemein, dass bis zum Endprodukt viele Fertigungsschritte nötig sind:

Herstellung eines maßgeschneiderten Biokunststoff-Compounds, Folienextrusion, Perforation der Folien und Kaschierung, Herstellung des Sandwichkerns durch Falten, Tiefziehen, Spritzguss etc., Verkleben oder Verschweißen des Sandwichkerns mit den Deckschichten und Anbringen der Abschlussleisten zur Einfassung der Platten. Ferner kristallisierte sich das Fügen der Einzelteile zu einer ästhetisch ansprechenden Sandwichplatte als schwierig heraus.

„Es wäre ideal, wenn wir ein Verfahren finden, das alle Fertigungsschritte von CP30 in sich vereint. Ein Produkt, das fertig aus der Maschine fällt....“ (Dietrich Brennenstuhl, Geschäftsführer der Nimbus Group).

Mit Hilfe des Spritzgussverfahrens könnte die Deckschicht, der Sandwichkern sowie die Kantenlösung in einem Fertigungsschritt vereint werden (Abb. 45). Bedingt durch das Fertigungsverfahren ergibt sich eine Bauteilgröße von ca. 25 x 25 cm. Bei größeren Modulen benötigt man mehr Einspritzpunkte und die Werkzeugkosten sind teurer. Das Akustikmodul soll aus zwei Halbschalen bestehen, die vom Kunden zusammengesteckt werden (Abb. 46).

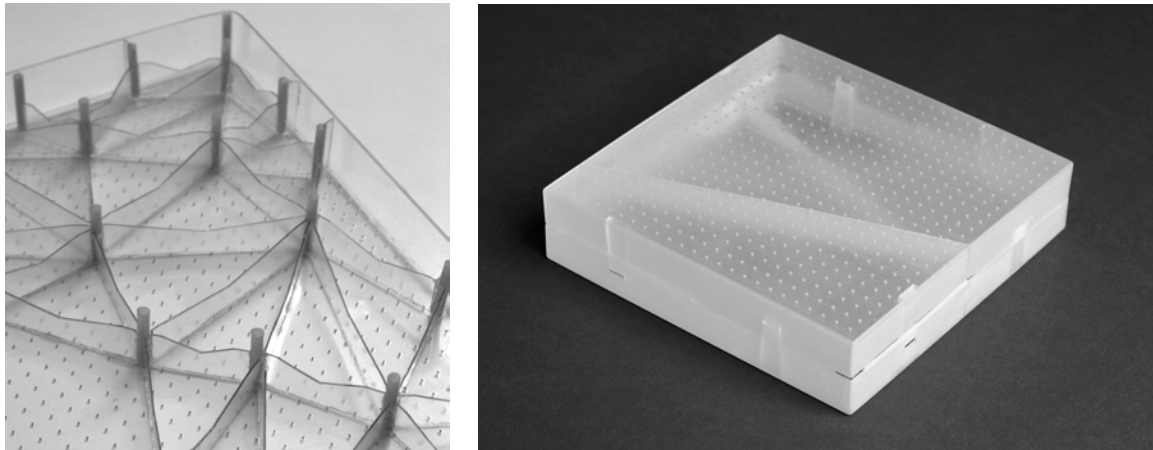


Abb. 45 Spritzguss-Konzeptmodell für die Halbschale des Akustik-Moduls © Nimbus Group

Abb. 46 3D-Druck: Aus zwei Halbschalen zusammengestecktes Akustikmodul, Nimbus © Foto: Pixelcatcher

4.3.3 Materialauswahl unter Berücksichtigung der Anforderungen und Ergebnisse des Technologiescreenings

Das Spritzgusswerkzeug umfasst bei einer Modulgröße von 25 x 25 cm 961 Stahlpins pro Halbschale im Abstand von ca. 0,8 cm, die von der Kunststoffschmelze umflossen werden müssen. Dies kann nur mit einem niedrigviskosen Werkstoff, vergleichbar mit Polycarbonat, realisiert werden [220]. Des Weiteren ist eine Verarbeitungsschwindigkeit von maximal 0,8 % unabdingbar. Cellulosediacetat und Polylactid erfüllen die Kriterien mit einem Wert von 0,4 % (siehe *Tabelle 2 Übersicht und Vergleich ausgewählter biobasierter Kunststoffe mit PC und PMMA*). Die Firma NatureWorks bietet mit ingeo™ 3251D eine niedrigviskose, transparente Type an. Sowohl der hohe Anteil nachwachsender Rohstoffe (>90 %) wie auch der geringe Preis sprechen zugleich für den Werkstoff Polylactid. Polyhydroxybutyrat eignet sich aufgrund seines hohen Bioanteils und der hohen Wärmeformbeständigkeit. Der Biokunststoff ist verglichen mit Polylactid doppelt bis dreifach teurer (Stand 2013). Bei einer Plattenstärke des Akustikmoduls von 2 mm, ist die Lichtdurchlässigkeit des opaken Werkstoffes fraglich.

Der biobasierte Anteil liegt bei nicht modifiziertem Cellulosediacetat bei etwa 30-50 %, je nach Anteil des zur Verarbeitung notwendigen Weichmachers. Die Werkstoffkosten sind im Vergleich zu Polylactid in etwa doppelt so hoch (Stand 2013). Cellulosediacetat wird dennoch aufgrund seiner hohen Wärmeformbeständigkeit neben Polylactid, das aufgrund genannter Vorzüge hauptsächlich fokussiert wird, für Modifikationen ausgewählt. Polylactid verfügt über eine Härte und somit auch Oberflächenhärte, die mit den Werten der technischen Kunststoffe ABS und Polyamid vergleichbar ist [221].

Diese Dissertationsschrift betrachtet nur biobasierte Thermoplaste. Bei der Umsetzung des genannten Forschungsprojektes wurden zunächst auch duroplastische Bioharze untersucht. Beim Herstellen verschiedener Gieß- und Schaumstrukturen (siehe *Abb. 44*) zeigt sich, dass die Aushärtungszeit zu lange ist. Teilweise binden die heiß härtenden

Harze nicht richtig ab und bleiben klebrig. Diese Bioharze sind gelblich transparent und zu ähnlichen Preisen wie Epoxidharz zu erwerben. Farblose, transparente und kalt härtende Harze sind aufgrund ihres Herstellungsverfahrens sehr kostenintensiv [222].

4.4 Modifikationen von PLA und CA zur Anpassung des Werkstoffes für Innenraumanwendungen

Wie in *Kapitel 4.3.3.* erläutert, wird Polylactid (PLA) bei der Anpassung eines biobasierenden Kunststoffes für die Anwendung im öffentlichen Innenraum fokussiert. Celluloseacetat (CA) wird aufgrund seiner höheren Wärmeformbeständigkeit ebenfalls mit berücksichtigt. Folgende Eigenschaften sollen zunächst optimiert werden

Tabelle 12 Für Innenraumanwendungen zu optimierende Eigenschaften von Polylactid und Celluloseacetat

	Verbesserung Brandverhalten	Verbesserung Wärmebeständigkeit	Neutralisierung Gelbstich
Poly lactid	ja	ja	ja
Celluloseacetat	ja	nein	nein

Insbesondere bei Design orientierten Anwendungen sollte im Zuge der Modifikation die Gelbstichigkeit, die bei vielen Biokunststoff-Typen vorliegt, mittels optischen Aufhellern neutralisiert werden (siehe *Kapitel 4.9 Neutralisierung der Gelbstichigkeit durch optische Aufheller*).

4.4.1 Entzündbarkeit von PLA und CA – Der Sauerstoffindex

Der Sauerstoffindex LOI (Limiting Oxygen Index) ist ein Kriterium zur Abschätzung der Brennbarkeit eines Materials. Der LOI-Wert gibt den Mindestgehalt an Sauerstoff eines Stickstoff-Sauerstoff-Gemisches an, in dem der Kunststoff entflammt und verbrennt ohne zu verlöschen [223].

Der Sauerstoffgehalt der Luft beträgt ungefähr 21 %. Polylactid (PLA) wie auch Polycarbonat (PC) haben einen LOI-Index von 26 [224]. Das bedeutet, dass für die Verbrennung in etwa 26 % Sauerstoff benötigt wird – dies ist mehr als in der Luft vorhanden ist. Daraus resultiert ein vermutlich geringerer Flammschutzmittelbedarf als bei Celluloseacetat oder auch Polyethylen. Ein LOI-Wert von unter 21 % deutet auf leicht entflammbare Materialien hin. Werkstoffe mit einem LOI-Index zwischen 21 und 28 brennen langsam ab. Werte über 28 lassen auf eine selbstverlöschende Substanz schließen.

Tabelle 13 Sauerstoffindex (Limiting Oxygen Index (LOI)) ausgewählter Kunststoffe

Rohstoffherkunft	biobasiert		erdölbasiert				
	PLA	CA	PC	PET	PE	PVC	PTFE
Kunststoffe							
Sauerstoffindex [%]	26	18	26	28	18	42	95
Datenquelle	[225]	[226]	[227]	[228]	[229]	[229]	[229]

Durch die Zugabe von Flammschutzmitteln erhöht sich der LOI-Index bei jedem Kunststoff je nach Zusammensetzung unterschiedlich hoch. Die Erfahrung zeigt, dass der LOI-Index bei mindestens 30 % liegen muss, um die Brandschutzanforderungen verschiedener Branchen zu erreichen. Polylactid benötigt aufgrund seines hohen LOI-Index voraussichtlich eine geringere Flammschutzmittelkonzentration als beispielsweise Celluloseacetat (CA) [230].

4.4.2 Brandverhalten von Polylactid und Celluloseacetat

Die Verbrennungswärme von PLA ist nahezu um die Hälfte geringer als bei üblichen Kunststoffen. Polylactid brennt daher mit niedrigerer Flammtemperatur als andere Kunststoffe. Man kann kaum eine Flamme erkennen [231]. Wird Polylactid nach der UL94-V (Kapitel 3.1.1.3) einer Zündquelle ausgesetzt, so schmilzt dieses aufgrund seiner geringen Wärmeformbeständigkeit von ca. 55-58 °C und tropft ab. Es entsteht eine kaum sichtbare, kleine, hellblaue Flamme am vier Millimeter dicken Prüfstab. Die Tropfen entzünden die im Abstand von 30 cm platzierte Baumwollwatte. Auf Materialebene wird in eigenen Brandversuchen nach UL 94 die Brandklasse V-2 erreicht. Bei mäßig flammwidrigem Material würde man üblicherweise zunächst die Horizontalbrennprüfung (HB) durchführen. Bei bestandener HB-Prüfung werden Vertikalbrennprüfungen durchgeführt.

Da PLA zur Ausbreitung des Brandes beiträgt, würden Bauteile aus Polylactid ohne Flammschutz daher als leicht entflammbar eingestuft werden und die Baustoffklasse DIN 4102-B3 oder DIN EN 13501-F erreichen.

Verbrennt man gemäß UL 94 V vier Millimeter dicke Prüfstäbe aus Celluloseacetat (CA), so entstehen nach durchschnittlich 7-9 Sekunden brennende Tropfen. Bauteile aus CA sind leicht entflammbar und würden daher ebenso wie PLA zur Brandausbreitung beitragen.

Die Entflammbarkeit und Brennbarkeit eines Kunststoffes lässt sich durch ein für den jeweiligen Kunststofftyp geeignetes Flammschutzmittel positiv beeinflussen.

Es gilt daher eine geeignete FlammSchutzausrüstung für Polylactid und Celluloseacetat zu identifizieren. Die Lichtdurchlässigkeit sollte dadurch unbeeinflusst bleiben.

4.4.3 Stand der Technik – FlammSchutzmittel in Biokunststoffen

Die Firma Bayer MaterialScience bietet mit *MAKROBLEND BC400* [232] ein opakes Granulat aus den Kunststoffen Polycarbonat und Polylactid an, das die Brandklasse UL 94 V-0 erreicht. Der Werkstoff besteht zu etwa 40 Gewichtsprozenten aus nachwachsenden Rohstoffen.

In Taiwan wird *SUPLA C1003* angeboten. Nach Zugabe halogenfreier Flammhemmer, bleibt der Biokunststoff bei der Brandklasse UL 94 V-0 zu 90 % biobasiert und weist eine Wärmeformbeständigkeit von über 100 °C auf [233]. Das opake Granulat erscheint stark gelbstichig. Es existieren noch keine Vertriebswege nach Europa (Stand 2011), wodurch sehr hohe Frachtkosten resultieren, die den Kilopreis in die Höhe treiben.

Einen über 75 % biobasierten Werkstoff aus Polylactid und Aluminiumtrihydroxid als Flammhemmer entwickelte der Elektronikhersteller NEC für den Einsatz in firmeneigenen Geräten wie Handyschalen und PC-Gehäusen [234]. Beim Einsatz von Metallhydroxiden als Flammhemmer kann die Lichtdurchlässigkeit des PLA nicht aufrechterhalten werden.

Die Firma LATI Industria Termoplastici bietet mit *LATIGEA B01-V0HF* ein Polylactid-Compound an, das nach Zugabe halogenfreier Flammhemmer, die nicht näher spezifiziert werden, die Brandklasse UL 94 V-0 (0,75 mm) erreicht [235]. Der Werkstoff ist nicht lichtdurchlässig. Die Wärmeformbeständigkeit liegt bei 55 °C. Der Anteil nachwachsender Rohstoffe wird nicht angegeben.

Im Patent *DE4325849A1* [236] wird ein flammwidrig ausgerüstetes Polylactid beschrieben, das nicht lichtdurchlässig ist. Hier wurden Metalloxide wie z.B. Aluminiumoxidtrihydrat und Phosphate wie etwa Ammoniumpolyphosphat mit Guanidiums Salzen kombiniert. Resultat ist ein opaker Werkstoff, der in die Brandklasse UL 94 V-0 eingestuft werden kann. Der Anteil des Polylactids und somit auch der Anteil nachwachsender Rohstoffe liegt im Patent *DE4325849A1* bei 60-65 %.

Die FlammSchutzformulierung im Patent *US2010/0184894A1* ‚*Poly(lactide)-Based Compositions*‘ [237] greift auf Calciumsulfat in der Kombination mit Silikaten zurück. Die Transparenz des Werkstoffes Polylactid ist nach Zugabe dieser funktionalen Additive mineralischer Herkunft nicht mehr gegeben.

Hanwen Xiao von der Hubei Universität in Wuhan setzt in seiner Untersuchung ‚*Synergistic effects on nonisothermal poly(lactic acid) crystallization*‘ Triphenylphosphat (TPP) als Weichmacher für Polylactid ein [238]. Als Nukleierungsmittel wird hier Talkum verwendet, welches in jedem Falle zu einem opaken Werkstoff führt. Hier wird lediglich der

Einfluss von TPP mit seiner Weichmacherfunktion, auf die Kristallisationsgeschwindigkeit von PLA untersucht. Das Brandverhalten wurde nicht untersucht.

Versuche von Serge Bourbigot und Gaëlle Fontaine zeigen, dass der Verbund von Ammoniumpolyphosphat (APP), einem Phosphat basierten Flammschutzmittel, und PLA zu einer Reduzierung der Entzündungszeit führt, wobei keine bessere Brandklasse als UL 94 V-2 erzielt werden konnte [239]. Die Zugabe von Nanoclay, sogenannten Schichtsilikaten, senkt die Wärmefreisetzung [240].

Es konnten keine Studien gefunden werden, die die Verbesserung des Brandverhaltens von Polylactid im Zusammenhang mit der Aufrechterhaltung der Lichtdurchlässigkeit untersuchen.

Es existieren Flammschutz ausgerüstete Celluloseacetat-Produkte. Zu nennen wären hier Folien der Firma Clarifoil [241] oder Wabenplatten der Firma Wacotech aus Celluloseacetat, die als transparente Wärmedämmung eingesetzt werden [242].

4.5 Versuche: Flammschutzmittel und ihre Auswirkungen auf die Lichtdurchlässigkeit und das Brandverhalten des Compounds

4.5.1 Auswahl geeigneter Flammschutzmittel

Zur Verbesserung des Brandverhaltens wurden halogenfreie, ökologisch unbedenkliche Flammschutzmittel eingesetzt. Diese sind phosphat- oder schwefelbasiert und senken den Anteil nachwachsender Rohstoffe im Compound. Ziel der Versuche ist daher das Finden eines Flammschutzmittels, das die Lichtdurchlässigkeit nicht oder nur in geringem Maße beeinträchtigt und den biobasierten Anteil nur minimal senkt. Sobald man Kunststoffe mit Additiven compoundingt, werden Stoffe mit unterschiedlichen Lichtbrechungsindices gemischt, wodurch ein transparentes Polymer trüb oder opak werden kann.

Der anorganische Brandhemmer Aluminiumtrihydroxid (ATH), welcher weltweit am meisten eingesetzt wird [243], führt in jedem Falle zu einem opaken Werkstoff. Überdies müssen je nach Kunststofftyp bis zu 60 Gewichtsprozent hinzugefügt werden, um eine Brandschutzwirkung zu erzielen.

Wird ein Brandschutz-Additiv eruiert, dass die Lichtdurchlässigkeit nicht beeinträchtigt, so wird in einem nächsten Schritt untersucht, wie weit die Dosierung gesenkt werden kann, um dennoch die Brandklasse UL 94-V0 zu erreichen.

Es wurden folgende Flammschutzmittel mit Polylactid oder Celluloseacetat compoundingt:

Tabelle 14 Übersicht verwendeter Flammschutzmittel

Flammschutzmittel	Abk.	Klassifizierung	NaWaRo-Anteil [%]
Triphenylphosphat	TPP	Organische Phosphorverbindung	0
Ammoniumpolyphosphat	APP	anorganisches Flammschutzmittel: Phosphorverbindung	0
Kalium-Diphenyl-Sulfon-Sulfonat	KSS	anorganisches Flammschutzmittel: aromatisches Sulfonatsalz	0

4.5.2 Weitere Additive und verwendete Biokunststofftypen

In jedem Falle muss die Temperaturbeständigkeit von Polylactid verbessert werden. Dazu wird bei nahezu allen Versuchen mit PLA Nukleierungsmittel als Masterbatch hinzugefügt, das den Kristallisationsgrad und somit auch die Wärmeformbeständigkeit erhöhen soll (*Kapitel 4.6.3 Nukleierungsmittel als Kristallisationsbeschleuniger*). Das Masterbatch ist ein Zusatzadditiv in Granulatform, das eine höhere Konzentration des jeweiligen Additivs enthält als bei der Compoundierung benötigt wird und dient der einfacheren Dosierung von Additiven, die nur in kleinen Mengen zugegeben werden. Im vorliegenden Fall wird das Nukleierungsmittel mit dem Trägerpolymer Polylactid compoundiert, um dann als Masterbatch eingesetzt zu werden.

Da bei PLA ebenso der Gelbstich neutralisiert werden muss, werden optische Aufheller in unterschiedlichen Dosierungen als Masterbatch hinzugefügt (*Kapitel 4.9*).

Polylactid schmilzt beim Verbrennen und tropft ab. Aus diesem Grund wurde in manchen Versuchen ein Schichtsilikat (Nanoclay) als Antitropfmittel hinzugefügt (*Kapitel 4.5.5*). Verwendet wurde ein organisch modifiziertes Bentonit mit einer Partikelgröße kleiner 10 µm. Das Schichtsilikat Bentonit ist ein Gemisch aus unterschiedlichen Tonmineralien, das durch die Verwitterung vulkanischer Asche entsteht. Hauptbestandteil des Bentonits ist Montmorillonit, welches als Dreischichtsilikat vorwiegend aus Siliziumoxid und Aluminiumoxid besteht. Die Einarbeitung des Schichtsilikats zur Herstellung eines Nanocomposites erfolgt durch die Schmelzcompoundierung mit PLA [244]. Es wurde das Produkt Nanofil® SE 3000 von Süd-Chemie AG verwendet. Das Schichtsilikat sorgt bei einer Dosierung von 1-5 Gewichtsprozenten für einen verbesserten Flammschutz durch dreidimensionale Vernetzung in Verbindung mit halogenfreien Flammschutzmitteln und hat somit eine synergistische Wirkung [245].

Des Weiteren verbessert es die Steifigkeit ohne Verlust der Stoßfestigkeit, es erhöht die Temperaturbeständigkeit von Kunststoffen und beeinflusst die Transparenz des Verbundes nicht.

Aufgrund seiner Sprödigkeit werden in den ersten Versuchen Schlagzähigkeitsmodifizierer zur Verbesserung der Schlagzähigkeit beigemischt (*Kapitel 4.8.1 Schlagzähigkeit*). Das Flammschutzmittel Triphenylphosphat (*Kapitel 4.5.3*) verfügt über eine zusätzlich weich machende Wirkung, wodurch die Kunststoffschmelze bei steigender Dosierung zu dünnflüssig und instabil wird. Schmelzstabilisatoren sorgen daher für eine viskose und stabile Kunststoffschmelze.

Tabelle 15 Übersicht verwendeter Additive

Additive	Abk.	Produktname	Einsatzzweck	NaWaRo-Anteil [%]	Beeinträchtigung der Kompostierbarkeit
Triphenylphosphat	TPP	Disflamoll®TP	Flammschutzmittel	0	ja
Ammoniumpolyphosphat	APP	EUCAM® 375	Flammschutzmittel	0	ja
Kalium-Diphenyl-Sulfon-Sulfonat	KSS	Arichem KSS	Flammschutzmittel	0	ja
Nukleierungsmittel	NM	SUKANO® PLA na S516	Kristallisationsbeschleuniger zur Verbesserung der Wärmeformbeständigkeit	85	nein
Nukleierungsmittel	NM	Biomax® Thermal	Kristallisationsbeschleuniger zur Verbesserung der Wärmeformbeständigkeit	50	nein
optischer Aufheller	OA	SUKANO® PLA ob S515-N	Beseitigung des für PLA üblichen Gelbstichs, Farbneutralisierung	85	nein
Nanoclay / Schichtsilikat	NC	Nanofil® SE 3000	Antitropfmittel	0	nein
Schmelzestabilisator	SSt	PARALOID™ BPMS-260	Stabilisierung der Kunststoffschmelze/ Verarbeitungshilfe	0	nein
Schlagzähigkeitsmodifizierer	SM	Biomax Strong 120	Verbesserung der Schlagzähigkeit	0	nein

Mit Ausnahme der Flammschutzmittel sind alle Additive für den Einsatz in Biokunststoffen abgestimmt und werden auch für die Herstellung von Folien und Formkörpern für die Verpackungsindustrie verwendet [246][247].

Für die Compoundierung von Polylactid und Celluloseacetat mit Flammschutzmitteln und weiteren notwendigen Additiven wurden folgende Produkttypen verwendet:

Tabelle 16 Biokunststoffe – Produkttypen für Compoundierungsversuche

Biokunststoff	Produkttyp	Hersteller	Anmerkungen
Polylactid	Ingeo™ 3251D	NatureWorks LLC/ USA	niedrigviskose Type
Celluloseacetat	Plastiloid®22 MGP	Mazzucchelli 1849 Spa/ Italien	enthält 22 % Diethylphthalat (DEP) als Weichmacher

Compoundierung

Polylactid, Celluloseacetat sowie weitere Additive, die bei den jeweiligen Versuchen beschrieben werden, wurden je nach Notwendigkeit vor der Verarbeitung bei Temperaturen von 35-45 °C 15-24 Stunden getrocknet.

Beim Compoundieren muss ein Extruder und die entsprechende Fachkraft zur Bedienung der Maschine meist tageweise gebucht werden, da das Reinigen der Schnecke sehr zeitaufwendig ist. Daher wurden im Vorfeld unterschiedliche Rezepturen zusammengestellt, die mehrere Kombinationen von Additiven mit unterschiedlicher Dosierung aufweisen. Am Ende der mannigfachen Kunststoffaufbereitungsprozesse entstehen pro Rezeptur Granulate, die dann mittels Spritzguss zu Prüfstäben verarbeitet werden. Erst dann können die Eigenschaften ermittelt werden. Unter Umständen sind dann weitere Versuchsreihen notwendig.



Abb. 47 Vortrocknen der Additive

Abb. 48 Biokunststoffstrang nach dem Compoundieren, Abkühlen im Wasserbad vor dem Granulieren

Abb. 49 Säcke mit Granulat verschiedener Rezepturen

4.5.3 Versuche mit Triphenylphosphat (TPP)

Triphenylphosphat (TPP) oder auch Phosphorsäuretriphenylester gehört zur Gruppe der Phosphorsäureester und zählt zu den aromatischen Organophosphor-Flammschutzmitteln. TPP dient in Kunststoffen, insbesondere bei Folien auf Basis von Celluloseacetat, als Weichmacher. In Phenolharzlaminate oder diversen Thermoplasten, wie z.B. PC/ABS-Compounds, verbessert TPP die Flammwidrigkeit [248]. Es findet sich auch in Hydraulik-Flüssigkeit, Öl- und Treibstoffadditiven [249]. Nach Aluminiumoxid stellen die Organophosphate mit einem Anteil von 15 % am Verbrauch die zweitbedeutendste Flammschutzmittelproduktgruppe in Europa dar [250], wodurch die Allgemeinbevölkerung fast täglich in Gebäuden, Verkehrsträgern (Zug, PKW etc.) und durch die Nutzung von Bedarfsgütern wie Elektroartikeln, Textilien oder Möbeln mit diesen Substanzen konfrontiert wird. Sie stehen in Verdacht neurotoxisch, fortpflanzungsschädi-

gend, sowie krebserregend zu sein [251]. Belege gibt es hierzu bisher nicht. Vorhandene Studien zeigen, dass der Verdacht nicht begründet ist [252].

Nach der Entsorgung organophosphathaltiger Produkte werden organische Phosphate freigesetzt und belasten aufgrund ihrer hohen chemischen Stabilität im Wasser hauptsächlich die aquatische Umwelt [253].

Für die Versuche wurde Disflamoll® TP von Lanxess eingesetzt, welches als weiße Pastillen vorliegt und einen Phosphorgehalt von ca. 9,5 % sowie eine geringe Flüchtigkeit aufweist [254]. Disflamoll® TP ist eine polare chemische Verbindung, die am besten verträglich mit Polymeren ist, die eine ähnliche Polarität aufweisen [255]. PLA ist auch polar. Ebenso bestätigt der Hersteller NatureWorks LLC die Kompatibilität des Flamm- schutzmittels TPP mit der PLA-Type Ingeo™ 3251D [256].

Tabelle 17 Compoundierungsversuche mit dem Flammenschutzmittel Triphenylphosphat (TPP)

Biokunststoff	Polylactid (Ingeo™ 3251D)					Celluloseacetat (Plastiloid ®22 MGP)
Additive	Anteil bezogen auf Endprodukt [wt %]					
Flammenschutzmittel						
Triphenylphosphat (Disflamoll® TP)	15	10	8	7	6	10 15 20
weitere Additive						keine weiteren Additive
Nukleierungsmittel (SUKANO® PLA na S516) - Masterbatch	-	-	3-6	3-6	4	
Nukleierungsmittel (Biomax® Thermal)	3,5	2	-	-	-	
optischer Aufheller (SUKANO® PLA ob S515-N - Masterbatch)	-	-	0,5-1	0,5-1	0,75	
Nanoclay (Nanofil® SE 3000)	-	-	2	1	-	
Schlagzähigkeitsmodifizierer (Biomax® Strong)	2	1	-	-	-	
Schmelzestabilisator (PARALOID™ BPMS-260 Melt Strength Enhancer)	-	-	2	2	-	

Die oben stehende Tabelle fasst zwei Versuchsreihen zusammen. Zunächst wurde Celluloseacetat mit 10, 15 und 20 Gewichtsprozenten TPP, sowie PLA mit 10 und 15 Gewichtsprozenten des Flammenschutzmittels compoundiert.

4.5.3.1 Auswirkungen des Flammenschutzmittels TPP und weiteren Additiven auf die Lichtdurchlässigkeit

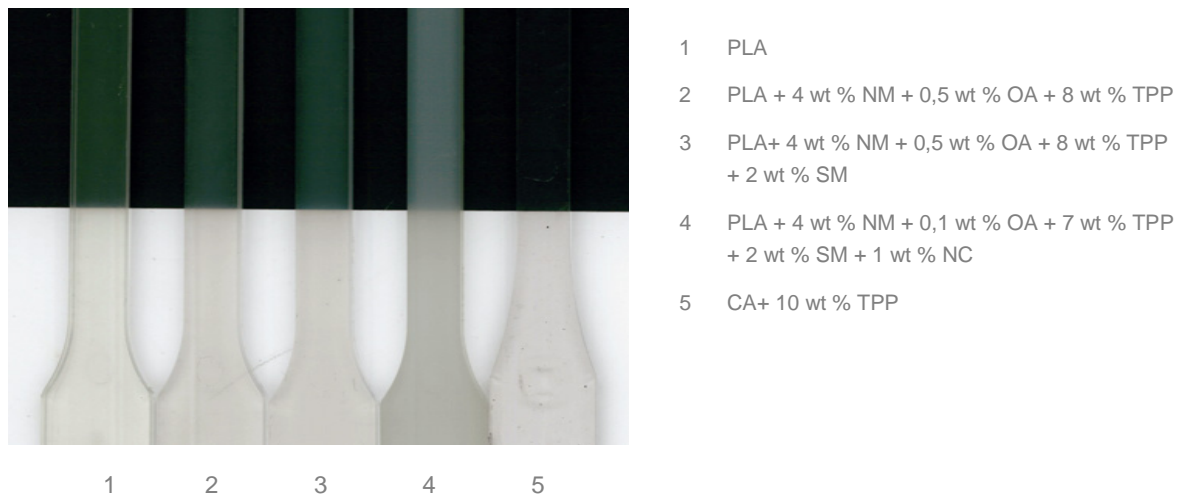


Abb. 50 Auswirkung von TPP und weiteren Additiven auf die Lichtdurchlässigkeit von PLA und CA (Stabdicke 4 mm)

Die Zugabe des Flammenschutzmittels Triphenylphosphat beeinflusst die Transparenz bei Polylactid und Cellulosediacetat kaum (Abb. 50, Nr. 1, 2, 3 und 5). Bei Prüfstab Nr. 3 ist zu erkennen, dass auch die Zugabe von zwei Gewichtsprozent Schlagzähigkeitsmodifizierer (siehe auch 4.8.1 *Schlagzähigkeit*) die Lichtdurchlässigkeit gering beeinflusst. Diese sinkt von 42-43 % bei Polylactid (Nr. 1, Abb. 50) auf 39-40 % bei den Prüfkörpern 2 und 3 der gleichen Abbildung. Die Lichtdurchlässigkeit in Prozent wurde mit einem digitalen Messgerät WTM-1000 der Firma Landtec ermittelt.

Die Zugabe des Nanoclays, einem Schichtsilikat, das als Anti-Tropfmittel fungieren soll, beeinträchtigt die Transparenz deutlich (Abb. 50, Nr. 4). So sinkt die Lichtdurchlässigkeit von 39-40 % auf 7,5 - 8,2 %. Auch die Ergebnisse der Brandprüfungen zeigen, dass das Schichtsilikat für die gewünschte Anwendung nicht hilfreich ist (siehe *Tabelle 19 Ergebnisse der Brandversuche nach UL 94 V*, Zeilen 5 und 6).



Abb. 51 Auswirkung von Nukleierungsmittel und Schlagzähigkeitsmodifizierer auf die Transparenz (Plattendicke 2 mm)

Tabelle 18 Zusammenfassung: Auswirkung verschiedener Additive auf die Transparenz von Polylactid

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zusammensetzung	PLA	PLA + 4 wt % NM + 0,5wt% OA + 8 wt% TPP	PLA + 4 wt % NM + 0,5wt% OA + 8 wt% TPP + 2 wt % SM	PLA + 4 wt % NM + 0,1wt% OA + 7 wt% TPP + 2 wt % SST + 1 wt % NC	CA + 10 wt % TPP	PLA	PLA + 2 wt % NM+ 1,5 wt % SM	PLA + 3 wt % NM + 1,5 wt % SM + 0,5 wt % OA	PLA + 4 wt % NM + 2 wt % SM + 0,5 wt % OA	PLA + 5 wt % NM + 3 wt % SM + 1 wt % OA
Dicke Probe- körper [mm]	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2
Lichtdurch- lässigkeit [%]	42-42	39-40	39-40	7,5-8,2	75	68,5- 70	23-28	24-30	18-20	10-13
NM = Nukleierungsmittel			SST= Schmelzestabilisator			OA= Optischer Aufheller				
SM= Schlagzähigkeitsmodifizierer			TPP= Triphenylphosphat			NC= Nanoclay				

Der Einfluss unterschiedlicher Dosierungen von Nukleierungsmittel und Schlagzähigkeitsmodifizierer kann der *Abb. 51* entnommen werden. Die angegebenen Transparenzgrade wurden für 2 mm dicke Ansichtplatten ermittelt. Ansichtplatte Nr. 10 der *Abb. 51* enthält drei Gewichtsprozent Schlagzähigkeitsmodifizierer. Prüfstab Nr. 2 der *Abb. 50* präsentiert sich lichtdurchlässiger, obwohl im Compound eine nahezu vergleichbare Menge an Nukleierungsmitteln und optischem Aufheller enthalten ist. Dies bedeutet, dass der verminderte Transparenzgrad der Ansichtplatte 10 im *Abb. 51* vom Schlagzähigkeitsmodifizierer rührt. Da getestete Dosierungen zudem zeigen, dass die Schlagzähigkeit nicht signifikant verbessert werden konnte (*Kapitel 4.8.1*), wurde auf die Zugabe von Schlagzähigkeitsmodifizierern in weiteren Versuchen abgesehen. Die Relevanz des Nukleierungsmittels wird im *Kapitel 4.6* besprochen.

Der Einfluss des Schmelzestabilisators auf die Transparenz ist gering, es zeigte sich jedoch, dass Compounds, die dieses Additiv nicht enthalten, auch granuliert und zu Prüfstäbe, sowie später auch zu einer prototypischen Platte mit Mikroperforation spritzgegossen werden können.

Um den Anteil nachwachsender Rohstoffe im Compound möglichst hoch und die Kosten gering zu halten, wurden in weiteren Versuchen zur Feinabstimmung der Rezeptur zunächst nur unabdingbare Additive verwendet:

- Nukleierungsmittel
- Flammenschutzmittel und Weichmacher TPP
- Optischer Aufheller

4.5.3.2 Ergebnisse der Brandversuche

Die Brandversuche nach UL 94 V zeigten, dass die Dosierung des Triphenylphosphats von zunächst 15 und zehn Gewichtsprozent bei Polylactid minimiert werden kann, da die Nachbrennzeiten lediglich bei durchschnittlich null bis 3 Sekunden lagen. Zwar entstehen bei der zweiten Beflammung nicht brennende Tropfen, diese entzündeten die platzierte Baumwolle jedoch nicht.

Bei Celluloseacetat (CA) musste mindestens 20 Gewichtsprozent TPP hinzugefügt werden, um die Brandklasse UL 94 V-0 zu erreichen. Die Begleiterscheinungen, wie lang anhaltende Rauchbildung (30 Sekunden), sowie eine starke Verrußung des Stabes (siehe *Abb. 52*), sind sowohl bei zehn Gewichtsprozenten, wie auch bei der doppelten Dosierung vorhanden.

Die Brandversuche wurden wie in *Kapitel 3.1.1.3 Brandprüfungen und ableitende Methodik eigener Brandversuche* beschrieben, durchgeführt. Eine Übersicht der Versuchsergebnisse kann der *Tabelle 19* entnommen werden.

Da man einen möglichst hohen Anteil nachwachsender Rohstoffe im Compound erzielen möchte, wurden die Versuche mit Celluloseacetat (CA) an dieser Stelle abgebrochen.

Wie bereits im *Kapitel 2.5.2* über Celluloseacetat beschrieben, weist CA bereits ohne zusätzliche Modifizierung aufgrund seines gegenwärtigen Herstellungsprozesses lediglich einen Anteil nachwachsender Rohstoffe von ca. 30-50 % inklusive notwendiger Weichmacher auf. Überdies ist der Kilogrammpreis im Vergleich zu Polylactid mindestens doppelt so hoch.

Die Zugabe von TPP zu Polylactid hingegen wurde auf 8, 7 und 6 Gewichtsprozent gesenkt. Die Ergebnisse der Brandtests in *Tabelle 19* zeigen, dass bei Polylactid sieben Gewichtsprozent Triphenylphosphat ausreichen, um die Brandklasse UL 94 V-0 zu erreichen. Sechs Gewichtsprozent TPP führen bei der zweiten Beflammung zu brennenden Tropfen, die die platzierte Watte entzündeten.

Die Zugabe von Schichtsilikat (Nanoclay) zum Compound aus PLA und 7wt% TPP mit der Funktion eines Antitropfmittels verschlechtert das Brandverhalten. Prüfstäbe dieses Verbunds werden auf Materialebene leicht entflammbar.

Die in *Tabelle 19* angegebenen Brennbarkeitsklassen gelten für vier Millimeter dicke Prüfkörper.

Tabelle 19 Ergebnisse der Brandversuche nach UL 94 V

Probekörper	Nachbrennzeit 1. Beflammung in Sekunden	Abbrand bis zur Halteklammer	Nachbrenn- und Glühdauer nach der 2. Beflammung	Entzündung der Watte	Abtropfen ohne Entzündung der Watte	Rauchbildung	Brennbarkeitsklasse nach UL 94 V
Versuche mit Polylactid (PLA)							
1	PLA	10	nein	18	ja	ja, kein Ruß	V-2
2	PLA + 7 wt % TPP + 3wt% NM + 0,5 wt % OA	2	nein	2	nein	ja, bei 2. Beflammung	ja, kein Ruß V-0
3	PLA + 6 wt % TPP + 4 wt % NM + 0,75 wt % optischer Aufheller	2	nein		ja, nach 2-3s entstehen brennende Tropfen	nein	ja, kein Ruß V-2
4	PLA + 7 wt % TPP + 5 wt % NM + 2 wt% SM + 0,5 wt % OA	0	nein	0	nein	ja, bei 2. Beflammung	ja, 14s kein Ruß V-0
5	PLA + 5 wt % NM + 0,1 wt % OA + 2 wt % SST + 1 wt % NC + 7wt % TPP	0	nein	4	ja	nein	13s, kein Ruß V-2
6	PLA + 7 wt % TPP + 5 wt % NM + 2 wt % NC + 2 wt % SM	2	nein	30	ja	ja	8s, kein Ruß V-2
30 Sekunden beflammen - Vortest für Prüfung der Entzündlichkeit nach EN ISO 11925-2:2011-02							
7	PLA + 8 wt % TPP + 4 wt % NM + 0,5 wt % OA	0	nein	0	nein	ja, Kunststoff schmilzt stark	8s, kein Ruß Test für DIN EN13501-B oder C schwer entflammbar
Versuche mit Cellulosediacetat							
8	CA+10 wt % TPP	0	nein	55	ja	nein	starke Rauchbildung, ca. 37s. Ruß V-2
9	CA + 20 wt % TPP	1	nein	1	nein	ja	verrußter Rauch ca. 30s V-0
NM= Nukleierungsmittel		SST= Schmelzestabilisator		OA= Optischer Aufheller			
SM= Schlagzähigkeitsmodifizierer		TPP= Triphenylphosphat		NC= Nanoclay			



Abb. 52 Probekörper nach den Vertikalbrennprüfungen nach UL 94 (Dicke der Probekörper 4 mm)

4.5.4 Versuche mit mikroverkapseltem Ammoniumpolyphosphat (APP)

Ammoniumpolyphosphat (APP) ist ein phosphorhaltiges Flammschutzmittel, welches aufgrund seiner Hygroskopizität und Wasserlöslichkeit verkapselt wird, um ein Auswaschen durch Witterung oder Reinigungsvorgänge zu vermeiden [257].

Verwendet wurde ein mit Melaminharz mikroverkapseltes APP mit dem Produktnamen EUCAM 375 der Firma Endotherm Brandschutz [258]. Die Partikelgröße des Pulvers ist zu über 80 % kleiner als 50 µm, wobei maximal 0,2 % eine Partikelgröße über 100 µm aufweisen. Der Phosphorgehalt beträgt 29-31 %.

Das Flammschutzmittel enthält keine Halogene und hat keine negativen Auswirkungen auf die Umwelt. Bereits im Jahr 2004 wurde nach Aussagen des Institutes für Strukturleichtbau des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) Ammoniumpolyphosphat in Bioverbundwerkstoffen für Schienenfahrzeuge getestet, da diese nicht toxisch sind und sich mit dem Konzept von umweltfreundlichen Kunststoffen auf der Basis nachwachsender Rohstoffe vereinbaren lassen [259].

APP wird als Brandschutzmittel in Polyurethan-Schaumstoffen, in Polyolefinen wie beispielsweise PE, PP oder auch in duroplastischen Harzen eingesetzt. Zudem weist es

einen guten Brandschutzeffekt bei Holz und anderen Cellulose haltigen Werkstoffen auf. Des Weiteren finden Ammoniumpolyphosphate als Säurespender meist zusammen mit synergistisch wirkenden Substanzen, wie Kohlenstofflieferanten und Treibmitteln für Intumeszenz-Beschichtungen, beispielsweise bei Stahl Verwendung [260] [261].

Tabelle 20 Compoundierungsversuche mit dem Flammschutzmittel Ammoniumpolyphosphat (APP)

Biokunststoff	Polylactid (Ingeo™ 3251D)
Additive	Anteil bezogen auf Endprodukt [wt %]
Flammschutzmittel	
Ammoniumpolyphosphat APP (EUCAM 375)	10
weitere Additive	
Nukleierungsmittel/ Thermostabilisator (Biomax® Thermal)	2
Schlagzähigkeitsmodifizierer (Biomax® Strong)	1

4.5.4.1 Auswirkung des Flammschutzmittels APP auf die Lichtdurchlässigkeit

Die hergestellten Prüfstäbe sind bei einer Zugabe von 10 Gewichtsprozent vollständig opak (Abb. 53, Nr. 2). Zur Entfaltung der Wirksamkeit wird eine Zugabe von 10-20 wt % empfohlen. Aufgrund der Opazität wurden keine weiteren Compoundierungen mit einer höheren Dosierung durchgeführt. Die hergestellten Prüfstäbe wurden hinsichtlich ihres Brandverhaltens im Kapitel 5.5 für Außenanwendungen untersucht, da hier die Transparenz kein ausschlaggebendes Kriterium darstellt.

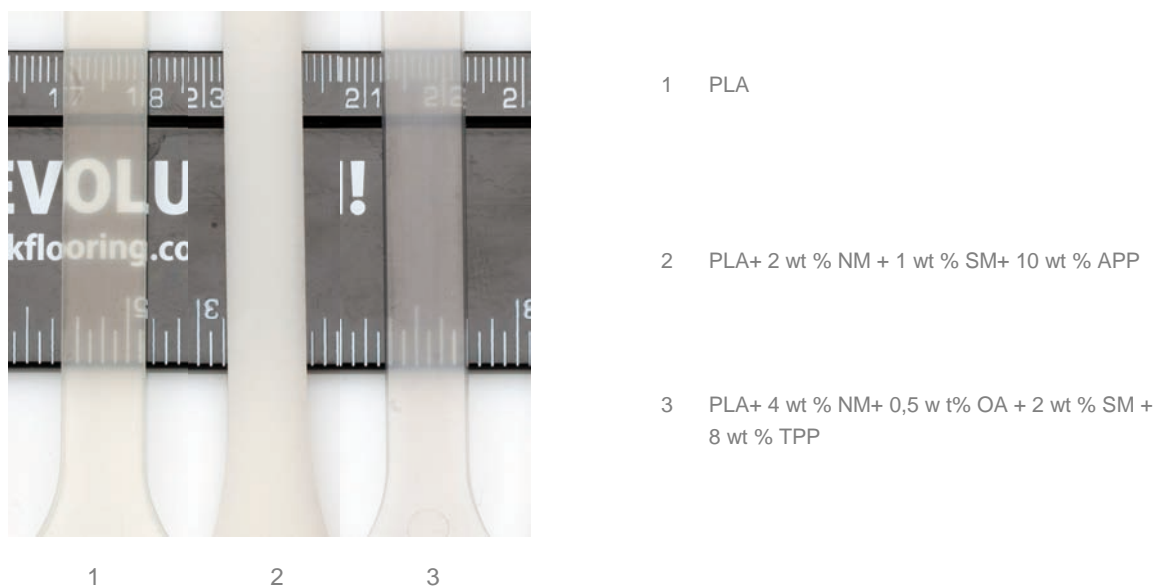


Abb. 53 Auswirkung von APP und weiteren Additiven auf die Lichtdurchlässigkeit von PLA (Dicke der Probekörper 4mm)

4.5.5 Versuche mit aromatischem Sulfonatsalz

Kalium-Diphenyl-Sulfon-Sulfonat ist ein aromatisches Sulfonatsalz, das als Flammhemmer bei transparenten Polycarbonat-Anwendungen eingesetzt wird. Das halogenfreie Flammschutzmittel der Type Arichem KSS-FR ist zur Herstellung von umweltfreundlichen Produkten geeignet [262]. Der Distributor Krahn Chemie empfiehlt eine Zugabe von 0,1-0,4 Gewichtsprozent. Dazu sollte das Flammschutzmittel nach Angaben der Firma Arichem mit einem Antitropfmittel wie z.B. Phenyl-Methyl-Siloxan (PMS) ergänzt werden [263]. Die Auswirkung siloxanhaltiger Verbindungen auf Mensch und Umwelt ist jedoch nicht eindeutig geklärt und wird gegenwärtig in zahlreichen Studien erforscht. Es existieren Richtwerte für zyklische Dimethylsiloxane in der Innenraumluft, die von der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumluft-Hygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und den obersten Landesgesundheitsbehörden untersucht wurden. Als alternatives Antitropfmittel soll daher Nanoclay, ein sogenanntes Schichtsilikat, getestet werden (siehe auch *Kapitel 4.5.2*)

Tabelle 21 Compoundierungsversuche mit dem Flammschutzmittel Kalium-Diphenyl-Sulfon-Sulfonat

Biokunststoff	Polylactid (Ingeo™ 3251D)		
Additive	Anteil bezogen auf Endprodukt [wt %]		
Flammschutzmittel			
Kalium-Diphenyl-Sulfon-Sulfonat (Arichem KSS-FR)	1	2	3
weitere Additive			
Nukleierungsmittel/ Thermostabilisator (SUKANO® PLA na S516) - Masterbatch)	2	3	4
Schlagzähigkeitsmodifizierer (Biomax® Strong)	4	3	3
optischer Aufheller (SUKANO® PLA ob S515-N - Masterbatch)	0,5	1	2
Nanoclay (Nanofil® SE 3000)	3	2	2

4.5.5.1 Auswirkung des Flammschutzmittels Kalium-Diphenyl-Sulfon-Sulfonat auf die Lichtdurchlässigkeit

Die aus dieser Versuchsreihe resultierenden Prüfstäbe sind entgegen der Erwartung opak. Eventuell könnte dies darin begründet sein, dass Schichtsilikate auch als Nukleierungsmittel fungieren. Das teilkristalline Polylactid kristallisiert während der Schmelzecompondierung nach und wird daher opak. Eine weitere Erklärung wäre, dass die Dosierung des Flammschutzmittels Kalium-Diphenyl-Sulfon-Sulfonat bei transparenten Polycarbonatanwendungen nach Angaben des Herstellers Arichem 0,1-0,3 Gewichtsprozent beträgt. Es wurden jedoch Dosierungen von 1 bis 3 wt % gewählt. Das Compound wurde aufgrund seiner Opazität im *Kapitel 5 Außenanwendungen* hinsichtlich des Brandverhaltens getestet. Dem *Kapitel 5.5* ist zu entnehmen, dass die gewählten Dosierungen nicht ausreichen. Das Polylactid bleibt leicht entflammbar und trägt zur Brand-

ausbreitung bei. Selbst wenn eine empfohlene Dosierung von 0,1-0,3 wt % zu einem transparenten Compound geführt hätte, wäre das Brandverhalten nicht zufriedenstellend.

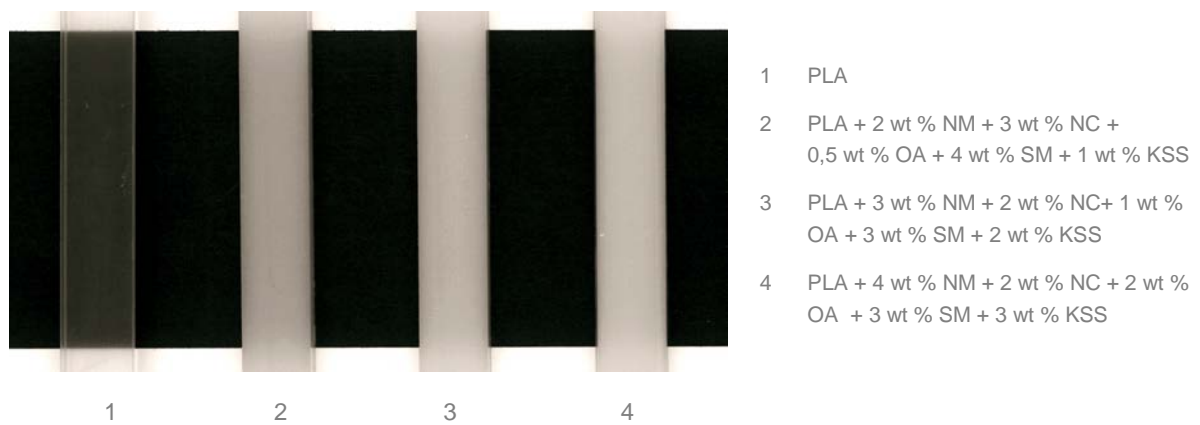


Abb. 54 Auswirkung von Kalium-Diphenyl-Sulfon-Sulfonat und weiteren Additiven auf die Lichtdurchlässigkeit von PLA (Dicke der Probekörper 4 mm)

4.5.5.2 Zusammenfassung: Auswirkung verschiedener Flammschutzmittel auf die Lichtdurchlässigkeit und das Brandverhalten von Polylactid

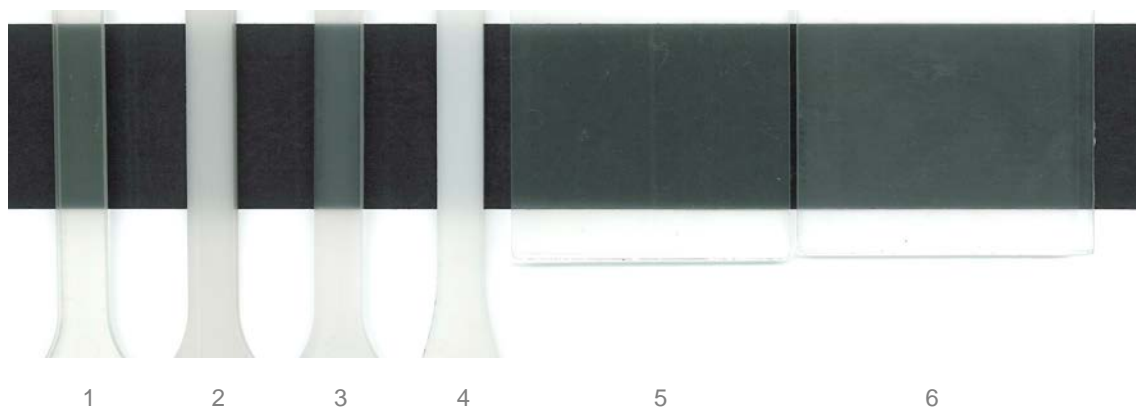


Abb. 55 Darstellung unterschiedlicher Transparenzgrade: mit Flammschutzmitteln modifiziertes Polylactid

Tabelle 22 Zusammensetzung der Probekörper aus Abbildung 55

Probekörper	1	2	3	4	5	6
Zusammensetzung	PLA	PLA + 2wt % NM + 1 wt % SM + 10 wt % APP	PLA + 4 wt% NM + 0,5 wt % OA + 8 wt % TPP	PLA + 3 wt % NM + 2 wt % NC + 1 wt % OA + 3 wt % SM + 2 wt % KSS	PLA	siehe Probekörper Nr. 3
Dicke Probekörper [mm]	4	4	4	4	2	2

NM= Nukleierungsmittel SM = Schlagzähigkeitsmodifizierer APP= Ammoniumpolyphosphat
 OA= Optischer Aufheller TPP= Triphenylphosphat NC = Nanoclay KSS= Kalium-Diphenyl-Sulfon- Sulfonat

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass von den getesteten Flammschutzmitteln nur Triphenylphosphat (TPP) die Lichtdurchlässigkeit des Compounds nicht beeinträchtigt (Abb. 55, Nr. 3 und Nr. 6). Die leichte Trübung im Vergleich zum nicht modifizierten Polylactid (Abb. 55, Nr.1) stammt vermutlich vom Nukleierungsmittel und dem Schlagzähigkeitsmodifizierer. Es hat sich gezeigt, dass für die Modifikation von Polylactid sieben Gewichtsprozent TPP ausreichen, um die auf Materialebene gewünschte Brandklasse UL 94 V-0 zu erreichen.

Sowohl Ammoniumpolyphosphat (APP) wie auch das aromatische Sulfonatsalz Kalium-Diphenyl-Sulfon-Sulfonat führen zu einem opaken Werkstoff (Abb. 55, Nr. 2 und 4). Die Versuchsreihen wurden mit Polylactid durchgeführt.

Die Versuche mit Cellulosediacetat (CDA) wurden nicht weitergeführt, da erst bei 20 Gewichtsprozent TPP ein vergleichbares Brandverhalten erzielt wurde wie bei Polylactid mit sieben Gewichtsprozent. Zudem ist der Anteil nachwachsender Ressourcen im Compound beim modifizierten CDA geringer als 50 %. Beim angepassten PLA liegt der Anteil bei über 90 %. Zudem ist der Grundpreis des Biokunststoffes CDA mehr als doppelt so hoch wie bei Polylactid.

4.6 Verbesserung der Wärmeformbeständigkeit von Polylactid

4.6.1 Wärmeformbeständigkeit

Unter der Wärmeformbeständigkeit von Kunststoffen versteht man die Fähigkeit eines Prüfkörpers, unter bestimmten Belastungsbedingungen seine Form bis zu einer bestimmten Temperatur beizubehalten [264]. Zur Ermittlung der Wärmeformbeständigkeit von thermoplastischen Kunststoffen kann die Vicat-Erweichungstemperatur ebenso die HDT (**H**eat **D**istorsion **T**emperature) herangezogen werden.

Die Wärmeformbeständigkeitstemperatur HDT wird nach der DIN EN ISO 75 ermittelt. Hierbei wird der Prüfkörper nach dem Dreipunktbiegeprinzip belastet. Die maximale Biegespannung beträgt im Prüfkörper je nach Verfahren 1,80 MPa (Verfahren A), 0,45 MPa (Verfahren B) oder 8 MPa (Verfahren C) [265]. Die HDT ist die Temperatur, bei der der Prüfkörper eine Randfaserdehnung von 0,2 % erreicht [266].

Thermoplastische Kunststoffe weisen keinen exakten Schmelzpunkt auf. Mit zunehmender Temperatur erweicht der Kunststoff langsam [267].

Bei der Vicat-Erweichungstemperatur wird ermittelt, bei welcher Temperatur eine Eindringspitze mit einer Fläche von 1 mm² 1 mm tief in die Oberfläche des Prüfkörpers eingedrungen ist [268].

Da Bekleidungselemente eher biegebelastete Bauteile sind, wurde die HDT der Vicat-Erweichungstemperatur vorgezogen.

4.6.2 Resultierende Wärmeformbeständigkeit des (modifizierten) Polylactids

Wie bereits im *Kapitel 3* beschrieben, existieren keine Angaben, welche Anwendungstemperaturen Kunststoffe aufweisen müssen, die im Innenraum aller Gebäudeklassen Anwendung finden. Zieht man Wärmeformbeständigkeiten konventioneller Kunststoffe, die als Sandwich-, Hohlkammer- oder Vollplatten eingesetzt werden, zur Orientierung hinzu, so sollte das transluzente Akustikmodul mindestens eine Wärmeformbeständigkeit von ca. 60 °C, besser 70 °C (HDT-B) aufweisen.

Die im experimentellen Teil zur Verbesserung des Brandverhaltens verwendete Cellulosediacetat-Type weist laut Datenblatt eine HDT-B von 86 °C auf. PLA (Ingeo 3251 D) hingegen nur eine HDT-B von 52 °C.

Beim modifizierten Polylactid sinkt die HDT-B bei einer Dosierung von sieben Gewichtsprozent TPP auf durchschnittlich 46,7 °C. Triphenylphosphat wirkt neben seiner Funktion als Flammschutzmittel auch als Weichmacher. Der Erweichungspunkt und somit auch der Schmelzbereich des PLA-Compounds sinken dadurch. Bei einer anfänglichen Zugabe von 15 wt % TPP kann nur noch eine Wärmeformbeständigkeit von 37 °C erreicht werden (siehe *Tabelle 23*).

Wie in *Kapitel 4.5.5.2* beschrieben, reichen bei Polylactid sieben Gewichtsprozent aus, um die auf Materialebene erforderliche Brandklasse V-0 nach UL 94 V zu erreichen. Die Wärmeformbeständigkeit muss jedoch verbessert werden.

Tabelle 23 HDT-B erdölbasierter und biobasierter (modifizierter) Kunststoffe im Vergleich:

	max. Anwendungstemperaturen		HDT-B [°C]	Datenquelle
	kurzzeitig [°C]	dauernd [°C]		
erdölbasierte Kunststoffe				
PETG		65	70- 72	[269]
PC	160	135	137	[270]
PMMA	85	70	100	[271]
PE-HD	90-120	75-90	86	[272]
PVC U	70	60	61	[273]
biobasierte (modifizierte)Kunststoffe				
PLA (ingeo 3251 D)			51,7	
CA (PLASTILOID® 22MGP)			86	[274]
PLA + 7 wt % TPP + 3 wt % NM + 0,5wt % OA			44,4	
PLA + 15 wt % TPP			37	
Parameter HDT- Verfahren B nach DIN EN ISO 75-2:	Rampe 120.00 °C/h, Starttemperatur 26°C, Vorheizzeit: 300s, Belastung 0.45 MPa			

4.6.3 Nukleierungsmittel als Kristallisationsbeschleuniger

Polylactid ist ein teilkristalliner Kunststoff. Beim Auskühlen und Erhärten amorpher Kunststoffe (z.B. Polycarbonat) richten sich die Molekülketten ungeordnet aus. Bei einer teilkristallinen Kunststoffschmelze ordnen sich die Molekülketten teilweise in einem Kristallgitter an, teilweise sind kristalline Bereiche jedoch von amorphen Bereichen umgeben. Die Transparenz teilkristalliner Kunststoffe hängt vom Kristallisationsgrad ab. Standard-Polylactid ist transparent. Teilkristalline Kunststoffe sind meist eingetrübt. Ursächlich sind die unterschiedlichen Lichtbrechungsindices von kristallinen und amorphen Bereichen. Die Lichtdurchlässigkeit nimmt mit zunehmender Kristallinität ab [275].

Kristalline Thermoplaste haben generell eine höhere Wärmeformbeständigkeit als amorphe Kunststoffe. Mit steigendem Kristallisationsgrad steigt die Wärmeformbeständigkeit.

Um die Wärmeformbeständigkeit zu verbessern, gilt es daher den Kristallisationsgrad im modifizierten Polylactid zu erhöhen. Dies kann durch Zugabe von Fasern, Füllstoffen wie Talkum oder beispielsweise mittels Zugabe von Nukleierungsmitteln erfolgen. Die beiden erstgenannten Maßnahmen führen in jedem Fall zu opaken Werkstoffen. Mit der Hilfe von Nukleierungsmitteln, die als Kristallisationsbeschleuniger fungieren, soll der Kristallisationsgrad so weit erhöht werden, dass die gewünschte Wärmeformbeständigkeit erreicht wird und der Werkstoff noch transluzent bleibt. Die Kristallisation erfolgt in einem Temperaturbereich unterhalb der Schmelztemperatur und oberhalb der Glasübergangstemperatur. Unterhalb der Glasübergangstemperatur ist die Beweglichkeit der Ketten zu gering [276].

Die Kristallisation bei Polylactid findet in einem Temperaturbereich von ca. 100 °C statt [277].

Die Compoundierungsversuche erfolgten an einer Leistritz MIC27 bei einer Temperatur von 180 °C. Die Temperatur an der Düse betrug 190 °C. Anschließend läuft der compoundierte Biokunststoffstrang durch ein Wasserbad bevor er granuliert wird. Zur Herstellung der Prüfstäbe mittels Spritzguss wird das modifizierte PLA-Granulat bei 185 °C aufgeschmolzen und bei einer für die Verarbeitung von Polylactid empfohlenen Werkzeugtemperatur (Kaltkanal) von ca. 25 °C zu Formteilen verarbeitet.

Folgende Tabelle zeigt die Wärmeformbeständigkeiten der Prüfstäbe, die zwei bis fünf Gewichtsprozent Nukleierungsmittel enthalten und bei einer Werkzeugtemperatur von 25 °C gefertigt wurden.

Tabelle 24 HDT-B bei einer Dosierung des Nukleierungsmittels (NM) von 2-5 wt %

	Werkzeugtemperatur 25°C
	HDT-B [°C]
PLA (Ingeo 3251 D)	51,7
PLA + 2wt% NM	51,5
PLA + 3wt% NM	51,9
PLA + 4wt% NM	51,4
PLA + 5wt% NM	51,2

Parameter HDT- Verfahren B nach DIN EN ISO 75-2:

Rampe 120.00°C/h, Starttemperatur 26°C, Vorheizzeit: 300s, Belastung 0.45 MPa

Wenn die Werkzeugtemperatur bei 25 °C liegt, ändert sich die Wärmeformbeständigkeit bei unterschiedlich hohen Dosierungen (2-5 wt %) nicht. Daher ist anzunehmen, dass die kurzzeitig hohen Temperaturen beim Compoundieren und Spitzgießen für die Kristallisation nicht ausreichen.

Ein längeres Verbleiben der Schmelze im Extruder ist nicht sinnvoll, da die Kristallisation erst bei Abkühlung und Erstarren der Schmelze einsetzt. Vor dem Abkühlen sollte die Schmelze eine Temperatur von 100 °C erreicht haben.

4.6.4 Steuerung der Prozessführung zur Erhöhung der HDT

In weiteren Versuchen werden daher beim Spritzgießen der Schulterstäbe die Werkzeugtemperatur sowie die Verweildauer im Werkzeug erhöht.

Die verschiedenen Granulate wurden vorab bei 35 °C 15 Stunden lang getrocknet. Mit einem Einspritzdruck von 60 bar wird in 1,96 Sekunden die Kunststoffschmelze mit einer Einspritzgeschwindigkeit von 20 cm³/s in das Werkzeug gespritzt. Die Nachdruckzeit beträgt 20 Sekunden. Sowohl auf Düsen- wie auch auf Auswerferseite herrschen Temperaturen von 100 °C.

Es erfolgt eine Variation der Kühlzeiten zwischen 120 und 240 Sekunden. Die Kühlzeit umfasst den Zeitraum der volumetrischen Formfüllung bis zum Öffnen des Werkzeugs [278].

Die anschließende Ermittlung der HDT-B (Wärmeformbeständigkeit) zeigt, dass die Ergebnisse der Einzelmessungen teilweise stark streuen. Dies ist bei teilkristallinen Kunststoffen oft der Fall, da unterschiedliche Kristallisationsgrade vorliegen. Nach einer Kühlzeit von 240 Sekunden ist der Werkstoff noch nicht vollständig kristallin. Durch Tempern lassen sich die Kristallisationsgrade erhöhen und angleichen, wodurch man höhere und auch gleichmäßigere HDT-B-Werte erzielen kann [279]. Je höher der Kristallisationsgrad, desto opaker wird der Werkstoff.

Die folgende Tabelle zeigt die Wärmeformbeständigkeit des mit dem Flammschutzmittel TPP compoundingierten Polylactids in unterschiedlichen Dosierungen der Additive und unter unterschiedlichen Bedingungen bei der Formgebung durch das Spritzgießen.

Tabelle 25 HDT-B von PLA-TPP-Compounds bei unterschiedlichen Formgebungsbedingungen

Zusammensetzung	Werkzeugtemperatur 25 °C HDT-B [°C]	Werkzeugtemperatur 100 °C, Kühlzeit 120 s HDT-B [°C]	Werkzeugtemperatur 100 °C, Kühlzeit 180 s HDT-B [°C]	Werkzeugtemperatur 100 °C, Kühlzeit 240 s HDT-B [°C]
PLA (Ingeo 3251 D)	51,7	-	-	-
6 wt % Triphenylphosphat (TPP)				
PLA + 6 wt % TPP + 4wt% NM + 0,75wt% OA	-	-	65,2	70,8
7 wt % Triphenylphosphat (TPP)				
PLA + 7 wt % TPP + 3 wt % NM+ 0,5 wt % OA	45,6	-	59,7	79,9
PLA + 7 wt % TPP + 4 wt % NM + 0,75 wt % OA	-	-	54,6	75,6
PLA + 7 wt % TPP + 5 wt % NM + 0,5 wt % OA, 2 w % SST	46,7	-	88,5	-
8 wt % Triphenylphosphat (TPP)				
PLA + 8 wt % TPP + 4 wt % NM + 0,5 wt % OA, 2 wt % SM	44,4	52,1	81,8	85,2

Parameter HDT- Verfahren B nach DIN EN ISO 75-2:

Rampe 120.00 °C/h, Starttemperatur 26 °C, Vorheizzeit: 300 s, Belastung 0.45 MPa

Es zeigt sich, dass eine Kühlzeit von 120 Sekunden und eine Werkzeugtemperatur von 100 °C zu gering sind, um die Wärmeformbeständigkeit ausreichend zu erhöhen. Bei einer Kühlzeit von 180 Sekunden schwanken die einzelnen HDT-Werte sowohl bei einer Dosierung von drei, vier und fünf Gewichtsprozent Nukleierungsmittel stark. Die Standardabweichung ist teilweise zu hoch. Es zeigt sich jedoch, dass bei einer Dosierung

des Flammschutzmittels von 7-8 Gewichtsprozenten und 4-5 Gewichtsprozenten Nukleierungsmittel ein durchschnittlicher HDT-B-Wert von über 80 °C erreicht werden kann. Bei einer Kühlzeit von 240 Sekunden schwanken die einzelnen HDT-Werte weniger stark.

4.6.4.1 Resultierende Lichtdurchlässigkeiten

Die erste Ansichtplatte der folgenden Abbildung wurde regulär gespritzt. Bei den Platten 2 und 3 wurde die Werkzeugtemperatur auf 100 °C erhöht und die Kühlzeit auf 180 Sekunden (Platte 2) und 240 Sekunden (Platte 3) ausgedehnt. Alle Platten weisen eine Materialstärke von 2 mm auf.



Abb. 56 Geringere Lichtdurchlässigkeit der Proben mit verbesserter Wärmeformbeständigkeit (Plattendicke 2 mm)

Bezüglich der Lichttransmission führen Kühlzeiten zwischen 180 bis 240 Sekunden zu scheinbar vergleichbaren Ergebnissen (siehe Abb. 56). Ergebnisse der Transparenzmessungen (siehe auch Tabelle 26) zeigen, dass die Lichtdurchlässigkeit bei einer Kühlzeit von 3 Minuten 2,9-3 % beträgt. Verlängert man die Kühlzeit um eine weitere Minute, so erhöht sich die Wärmeformbeständigkeit um durchschnittlich 20 °C, die Lichtdurchlässigkeit sinkt hingegen lediglich auf 2,7-2,8 %. Die Transparenzgrade im Außenbereich der Ansichtplatte sind höher als im Mittelfeld. Aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen dauert es länger, bis die Prozesswärme abgeleitet wird. Der Rand der gespritzten Ansichtplatte kühlt schneller ab, wodurch die Kristallisation dort etwas rascher abgebrochen wird als in der Plattenmitte.

Tabelle 26 HDT-B und Transparenzgrade je nach Werkzeugtemperatur und Dauer der Kühlzeit

Ansichtsplatte Abb. 56	Zusammensetzung	Herstellung	HDT-B [°C]	Transparenz [%]
1	PLA + 7 wt % TPP + 3 wt % NM+ 0,5 wt % OA	Werkzeugtemperatur 25 °C Kühlzeit 20 Sekunden	45,6	59-63
2	Siehe Ansichtsplatte 1	Werkzeugtemperatur 100 °C Kühlzeit 180 Sekunden	59,7	2,9-3,0
3	Siehe Ansichtsplatte 1	Werkzeugtemperatur 100°C Kühlzeit 240 Sekunden	79,9	2,7-2,8

Die Erhöhung der Kühlzeiten auf drei bis vier Minuten führt zu einer Erhöhung des Kristallisationsgrades. Wären die Werkstoffe auskristallisiert, so müssten die Platten 2 oder zumindest die Ansichtsplatte 3 (Abb. 56), die einer noch längeren Kühlzeit ausgesetzt war, opak sein. Es besteht die Gefahr, dass ein transparentes bis transluzentes Bauteil aus Polylactid während der Nutzungsphase über die Zeit nachkristallisiert.

Um das Ausmaß der Nachkristallisation einschätzen zu können, wurde vom 06.10.11 bis 30.04.13 eine fast 18-monatige Freibewitterung nach DIN EN ISO 877 (Erläuterung in Kap. 4.7.2 Freibewitterung nach DIN EN ISO 877) durchgeführt.



Abb. 57 Transparenzgrad nachkristallisierter Platten (Plattendicke 2 mm)

Es zeigt sich, dass die Proben, die durch längere Kühlzeiten bereits kristallisieren konnten (Abb. 57, Ansichtsplatten 2 und 3), weniger nachkristallisieren (siehe Nr. 3 gealtert der Abb. 57). Die Lichtdurchlässigkeit sinkt von 2,7-2,8 % auf 1,8- 2,1 %. Werden Spritzgussplatten bei einer Werkzeugtemperatur von 25 °C und üblichen Kühlzeiten hergestellt, so liegt die Lichtdurchlässigkeit, wie bereits in Tabelle Nr. 22 dargestellt, bei 59-63 % (Ansichtsplatte 1, Abb. 57). Die fast eineinhalb Jahre lange Freibewitterung führt jedoch zu einer sichtbaren Nachkristallisation. Die Lichtdurchlässigkeit liegt dann noch bei 7,5-10 %, statt der anfänglichen 59-64 % (siehe Ansichtsplatte 1 gealtert der Abb. 57).

Enthält das Compound Nukleierungsmittel, so kristallisiert es in der gleichen Zeit stärker nach als ohne. Nukleierungsmittel sind Keimbildner, die die Kristallisation beschleunigen. Jedoch kristallisieren teilkristalline Kunststoffe wie Polylactid auch ohne Füllstoffe und

Nukleierungsmittel unkontrolliert nach. Ausgelöst wird dieser Vorgang durch Wärme. Dies kann auch passieren, wenn das Bauteil im Innenraum in Fenster- oder Heizungs-nähe platziert wird.

Tabelle 27 Transparenzgrade von PLA und PLA-Compounds vor und nach der Freibewitterung

Probe-körper	Zusammensetzung	Herstellung	HDT-B [°C]	Transparenz [%] (Mess-gerät WTM-1000/ Landtec)	
Abb. 58 Nr.1	PLA	Werkzeugtemperatur 25 °C Kühlzeit 20 Sekunden	51,7	59-64	teilkristallin
Abb. 58 Nr.2	PLA	Werkzeugtemperatur 25 °C Kühlzeit 20 Sekunden; Alterung: Freibewitterung nach DIN EN ISO 877 vom 6.10.11-30.04.13		12,8-20,7	teilkristallin
Abb. 57 Nr.1	PLA + 7wt % TPP + 3 wt % NM + 0,5 wt % OA	Werkzeugtemperatur 25 °C Kühlzeit 20 Sekunden	45,6	59-64	teilkristallin
Abb. 57 Nr.1 gealtert	siehe Ansichtsplatte 1	Werkzeugtemperatur 25 °C Kühlzeit 20 Sekunden; Alterung: Freibewitterung nach DIN EN ISO 877 vom 6.10.11 - 30.04.13		7,5-10	teilkristallin
Abb. 57 Nr.2	siehe Ansichtsplatte 1	Werkzeugtemperatur 100 °C Kühlzeit 180 Sekunden	59,7	2,9-3,0	teilkristallin
Abb. 57 Nr.3	siehe Ansichtsplatte 1	Werkzeugtemperatur 100 °C Kühlzeit 240 Sekunden	79,9	2,7-2,8	teilkristallin
Abb. 57 Nr.3 gealtert	siehe Ansichtsplatte 1	Werkzeugtemperatur 100 °C, Kühlzeit 240 Sekunden; Alterung: Freibewitterung nach DIN EN ISO 877 vom 6.10.11 - 30.04.13		1,8-2,1	teilkristallin
Referenz					
	PMMA	extrudierte Platte		94,3-95,8	amorph
	PET-G	extrudierte Platte		90,6-91	amorph
	PC mit Flammschutz und UV-Schutz	extrudierte Platte		91,8-92,6	amorph
	PC mit Flammschutz und UV-Schutz	extrudierte Platte Alterung: Globalstrahlung hinter Fensterglas nach DIN EN ISO 4892-3, Verfahren B, Zyklus 5		91,5-92,5	amorph

Je höher der Transparenzgrad von teilkristallinen Kunststoffen wie beispielsweise Polylactid, desto stärker schwanken die Transparenzgrade innerhalb eines Probekörpers oder Bauteils. Dies betrifft auch die Einzelwerte zur Wärmeformbeständigkeit (HDT nach DIN EN ISO 75).

Amorphe Kunststoffe kristallisieren nicht nach. Die nahezu gleichen Transparenzgrade beim ausgewählten Referenzmaterial Polycarbonat vor und nach der künstlichen Alterung belegen dies auch.

Folgende Abbildung zeigt Polylactid vor (1) und nach der Freibewitterung (2) vom 06.10.11 bis 30.04.13. Die anfängliche Transparenz von 59-64 % liegt nach 18 Monaten bei 12,8-20,7 % (Messung ohne sichtbare Befestigungsstelle in der Mitte).

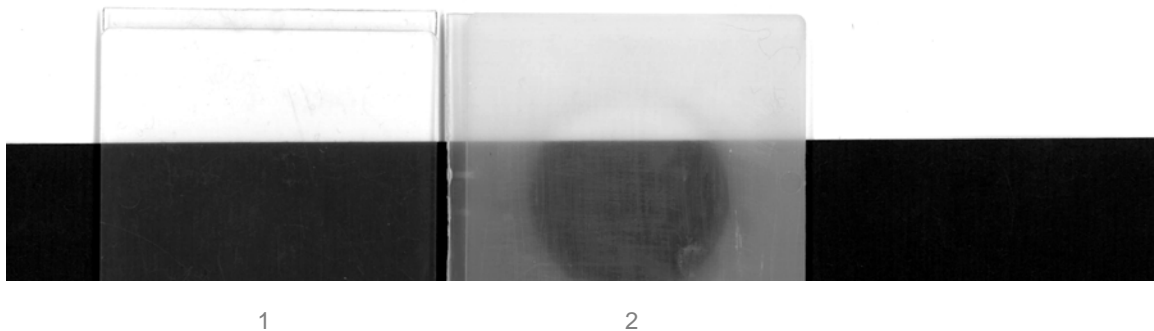


Abb. 58 Nachkristallisierung: Ansichtplatte aus Polylactid vor und nach der 18-monatigen Alterung (Plattendicke 2 mm)

Lässt man die verwendete Polylactid-Type ingeo 3251D kontrolliert mittels Wärmelagerung nachkristallisieren, so ergibt sich bei 4 mm dicken Zugstäben folgendes Bild:

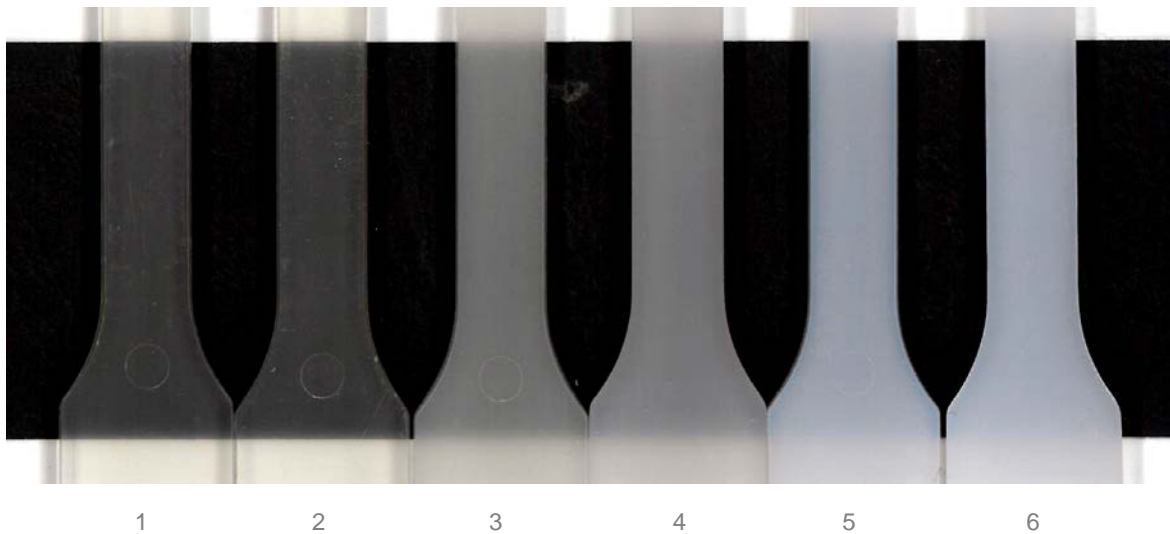


Abb. 59 Nachkristallisierung: Lichtdurchlässigkeit der Prüfstäbe nach Wärmelagerung (Tempern) (Dicke Probekörper 4 mm)

Prüfkörper 1 und 2 der Abb. 59 zeigen Polylactid vor und nach 504 Stunden Wärmelagerung bei 35 °C. Die Lichtdurchlässigkeit liegt in beiden Fällen bei 43-44 %. Prüfstäbe 3 und 4 enthalten zusätzlich 2 und 3 Gewichtsprozent Nukleierungsmittel. Diese kristallisieren bei 35 °C in 504 Stunden schneller nach. Bei Prüfstab 3 sinkt die Transparenz von 7-8 % auf 5-6 %. Gibt man 1 Gewichtsprozent Nukleierungsmittel mehr dazu, so sinkt die Lichtdurchlässigkeit bei gleichen Bedingungen von 5,5-7 % auf 3-4 % (Stab Nr. 4).

Die Stäbe 5 und 6 enthalten neben 4 wt % Nukleierungsmitteln acht Gewichtsprozent des Flammenschutzmittels TPP. Diese wurden bei 100 °C vier Minuten (Stab 5) und zehn Minuten (Stab 6) getempert. Nach einer vierminütigen nachträglichen Wärmebehandlung beträgt die Lichtdurchlässigkeit noch 0,9 %, nach weiteren sechs Minuten Wärmelagerung 0,5-0,7 %.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Faktoren Temperatur, Zeit und Nukleierungsmittel die Nachkristallisation und damit die Transparenz beeinflussen, wobei die Erhöhung der Parameter eine Beschleunigung der Nachkristallisation bedeuten.

Aussagen zum Kristallisationsgrad können beispielsweise mithilfe der Dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) getroffen werden.

Da im Rahmen des Forschungsprojekts *transparente und transluzente Leichtbauplatte aus vorwiegend nachwachsenden Rohstoffen mit Akustikfunktion* vor allem die Wärmeformbeständigkeit und die Lichtdurchlässigkeit entscheidend sind, musste aus Kostengründen auf diese Messungen verzichtet werden.

4.6.5 Tempern

Wie in *Kapitel 4.6.4* beschrieben, sollte eine Kühlzeit von 240 Sekunden gewählt werden, um zu gewünschten Materialeigenschaften des Formteils zu gelangen. Eine vierminütige Kühlzeit verlängert jedoch die Zykluszeit und minimiert die mögliche Stückzahl pro Maschinenstunde.

Alternativ könnte man die Akustik-Halbschalen bei einer für Polylactid üblichen Werkzeugtemperatur von 25 °C spritzgießen. Die Kühlzeit läge bei einer Materialstärke von 2 mm und einer Modulgröße von 25 x 25 cm bei ca. 20-25 Sekunden. Danach müsste man die Formteile tempern.

Beim Tempern erfolgt im Anschluss an die Herstellung des Kunststoff-Produktes eine Wärmelagerung. Durch das Tempern teilkristalliner Kunststoffe unterhalb des Schmelzbereiches von ca. 150-160 °C wird zum einen der Kristallisationsgrad des Werkstoffes erhöht und zum anderen werden Eigenspannungen reduziert, wodurch das Risiko für Spannungsrisse gesenkt wird [280].

Beim Tempern muss das Kunststoffformteil wieder weich werden, damit sich die Moleküle neu ordnen können (Kristallbildung). Dazu müssen die Formkörper eingespannt werden, sonst kann es zu Deformationen kommen (siehe *Abb. 60*). Hierfür ist ebenso eine Vorrichtung notwendig, die an die Formteile angepasst werden muss. Dabei entstehen auch Werkzeugkosten.



Abb. 60 Verzug beim Tempern ohne Tempervorrichtung (120-240 Minuten bei 75-100 °C getempert) Plat- tendicke 2 mm

Des Weiteren schwinden die Formteile. Dies gilt generell für Bauteile die nachkristallisieren. Dies muss bei der Formteilauslegung hinsichtlich Entformung wie auch gewünschter finaler Größe und Durchmesser der perforierten Deckschicht beachtet werden.

Zur akustischen Wirksamkeit ermittelt das Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Simulationen für die mikroperforierte Deckschicht des Akustik-Moduls einen Lochdurchmesser von mindestens 0,5 mm, allenfalls 0,6 mm in einem Lochraster von 6 mm [281].

Je höher der Kristallisationsgrad, desto höher die Schwindung. In eigenen Versuchen wurden 4 mm dicke Schulterstäbe der Größe 150 x 20 mm, 240 Sekunden bei 100 °C getempert. Nach 60 Sekunden wurde die Türe der Temperkammer geöffnet. Bei 75 °C Innentemperatur wurden die Stäbe dem Ofen entnommen. In Längsrichtung sind die Stäbe um 1,3 % geschrumpft, in der Breite um 5 %.

Bei kurzen Temperzeiten besteht die Gefahr eines unregelmäßig kristallisierten Formteils. Das Bauteil ist dann verzogen und eventuell unregelmäßig lichtdurchlässig. Längere Temperzeiten reduzieren diesen Nachteil, wobei auch die Lichtdurchlässigkeit reduziert wird.

Ob man eine Kühlzeit von 240 Sekunden (Abb. 61, Stab Nr. 2) während der Herstellung der 4 mm dicken Prüfstäbe oder ein nachträgliches Tempern von 300 Sekunden bei 100 °C (Abb. 61, Stab Nr. 3) wählt, der Transparenzgrad liegt in beiden Fällen, bei nahezu identischer Rezeptur (7-8 wt % TPP, 4-5 wt % Nukleierungsmittel), bei 1 bis 1,2 %. Prüfstab 3 enthält mehr optische Aufheller als Zugstab Nr. 2 und erscheint dadurch bläulicher. Prüfkörper Nr. 1 in Abb. 61 wurde ohne erhöhte Werkzeugtemperatur und ohne verlängerte Kühlzeit gespritzt.

Tempert man nach dem konventionellen Spritzgießen die Prüfstäbe fünf Minuten (Nr. 3 Abb. 61) nach, so kann man eine durchschnittliche Wärmeformbeständigkeit von ca. 73,3 °C erreichen. Erhöht man hingegen die Kühlzeit während des Spritzgussprozesses auf vier Minuten (Nr. 2, Abb. 61), so wird ein Mittelwert von 79,9 °C erreicht.



Abb. 61 Transparenz im Vergleich: Längere Kühlzeit oder nachträgliches Tempern (Probekörperdicke 4 mm)

Das nachträgliche Tempern bei vorheriger konventioneller Herstellung der Formteile mit kurzen Taktzeiten könnte eine wirtschaftliche Alternative sein, die Wärmeformbeständigkeit zu erhöhen.

4.7 UV-Beständigkeit von modifiziertem Polylactid

Die Akustik-Module sollen vor allem im Innenraum von Bürogebäuden oder in öffentlichen Gebäuden eingesetzt werden.

Handelsübliches Fensterglas ohne Sonnenschutzfolie lässt vor allem UV-A-Strahlen in den Innenraum passieren. Ungefähr die Hälfte der auf die Erde treffenden UV-A-Strahlung im Wellenlängenbereich von 315-400 Nanometer (langwelliges Licht) gelangt nach Versuchen von Anton Kraus vom Institut für angewandte Elektronik und Optik der Fachhochschule Köln ins Innere von Gebäuden [282]. Ultraviolettes Licht im Wellenlängenbereich von 280-400 nm kann alternd auf den Kunststoff wirken [283].

Dies ist der Fall, wenn der absorbierte Anteil der energiereichen Strahlung so hoch ist, dass Bindungen zwischen den Molekülen gespalten werden. Nach der DIN 50035 (Begriffe auf dem Gebiet der Alterung von Materialien – Polymere Werkstoffe) beschreibt die Alterung die „Gesamtheit aller im Laufe der Zeit in einem Material irreversibel ablaufenden chemischen und physikalischen Vorgänge“ [284]. Ausgelöst werden diese Vorgänge neben energiereicher Strahlung, durch Wärme, Temperaturwechsel, mechanische Belastungen, chemische Einflüsse oder deren Kombinationen [285]. Dabei ist es unerheblich, ob der Kunststoff biobasiert ist oder nicht.

Um die Auswirkungen ultravioletter Strahlung auf das modifizierte Polylactid-Compound zu testen, wurde sowohl eine Alterung im Zeitraffer als auch eine Bestrahlung durch Freibewitterung in Echtzeit ferner eine Innenraumlagerung unter nicht kontrollierten, standardisierten Bedingungen durchgeführt. Ziel der Freibewitterung nach DIN EN ISO 877-1 war jedoch, in 18 Monaten natürlicher Alterung ungefähr eine Alterung von 36 Monaten (3 Jahre) zu simulieren, da annähernd 50 % der für den Kunststoff schädlichen UV-Strahlung die Glasscheibe passiert und die künstliche Bestrahlung oft keine aussagekräftigen Ergebnisse liefert. Für Architekturanwendungen im sichtbaren Innen- und Außenraum ist neben der Information, wie sich die mechanische Performance im Laufe der Zeit verändert, auch die Aussage relevant, ob und wie sich die Materialien über die Zeit optisch wandeln. Daher werden diese Aspekte sowohl nach der künstlichen, als auch nach der natürlichen Alterung untersucht und dargelegt.

4.7.1 Künstliche Bewitterung: Globalstrahlung hinter Fensterglas

Das mit Triphenylphosphat und Nukleierungsmitteln modifizierte Polylactid wurde hinsichtlich seiner UV-Beständigkeit in Innenräumen an der Materialprüfanstalt (MPA) der Universität Stuttgart nach der DIN EN ISO 4892-3, Verfahren B, Beanspruchungszyklus 5, über eine Dauer von 341 und 1024 Stunden getestet.

Als Bewitterungsgerät wurde ein Global-UV-Testgerät der Firma Weiß Umwelttechnik verwendet.

Die Prüfbedingungen waren wie folgt:

Beanspruchungs- periode	Lampentyp	Bestrahlungs- stärke	Schwarzstand- temperatur	Relative Luftfeuchte
24 h trocken	Typ 1B UV-A-351	0,76 W/(m ² nm) bei 340 nm	50±3°C	Nicht geregelt

Die Prüfung erfolgt ohne Feuchtezyklen und ohne Tag-/Nachtzyklus. Alle Probekörper des modifizierten Polylactids sind nach 1024 Stunden zerfallen oder so brüchig, dass weder Gelbwerte noch LAB-Farbwerte ermittelt oder Zugversuche durchgeführt werden konnten.

Zu energiereiche Strahlung kann dazu führen, dass der Kunststoff bereits zu Beginn der Alterung zerstört wird. Daher ist es generell besser einen Zyklus zu wählen, der einer natürlichen Alterung näher kommt – das bedeutet in der Praxis, dass die Prüfzeit länger und die Strahlungsintensität geringer sein sollte.

Im Allgemeinen können bei der Laboralterung meist nicht alle realen Beanspruchungen simuliert werden.



Abb. 62 Probekörper vor und nach 341 Stunden Globalstrahlung hinter Fensterglas

Zusammensetzung	Poly lactid	PLA + 8 wt % TPP + 4 wt % NM + 0,5 wt % OA + 2 wt % SM	Cellulosediacetat + 10 wt % TPP
vor Alterung	Prüfstab 1	Prüfstab 3	Prüfstab 7
nach 341 h im Zyklus 5 nach DIN EN ISO 4892-3:2006	Prüfstab 2	Prüfstab 4	Prüfstab 8



Abb. 63 PLA-TPP-Compound nach 1024 Stunden Globalstrahlung hinter Fensterglas - Probekörperdicke 4 mm (1+2) und 2 mm (3+4)

Die Bestrahlungsstärke beträgt nach der DIN EN ISO 4892-3:2006 im Verfahren B, Zyklus 5 bei 340 Nanometern 0,76 Watt pro Quadratmeter.

Die Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland lag nach Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) im Jahr 2013 bei ungefähr 1050 kWh/ m² [286]. Die Strahlungsbelastung einer südlich orientierten Vertikalwand beträgt ca. 750 kWh pro Quadratmeter im Jahr [287]. Das sind 2700 MJ/ m². Die Globalstrahlung umfasst den Spektralbereich von 295 bis 3000 Nanometer [288]. Ultraviolette Strahlen im Wellenlängenbereich 295-400 nm haben an der vorrangig genannten Strahlung einen Anteil von 6 %. Es wurde bereits beschrieben, dass insbesondere dieser Bereich alternd auf Kunststoffe wirkt. Die künstliche Alterung wurde mit einer Lampe der Wellenlänge 340 Nanometer durchge-

führt. Licht dieser Wellenlänge hat einen Anteil an der Globalstrahlung von 0,535 %. Daraus folgt eine Strahlungsbelastung im Jahr 2013 von 1,44 MJ/m². Dies entspricht 1.444.500 Wattsekunden (Ws).

Legt man nun die folgende Grundformel zur Berechnung der Prüfzeit zugrunde, so würde man mit einer Bestrahlungsdauer von 528 Stunden ein Jahr in Mitteleuropa simulieren. Das bedeutet, die Alterung wurde über 16-fache beschleunigt, da 365 Tage 8760 Stunden entsprechen.

$$\text{Prüfzeit (h)} = \frac{\text{Bestrahlung H (Ws/m}^2\text{)}}{\text{Bestrahlungsstärke E (W/m}^2\text{)} * 3600 \text{ (s/h)}}$$

Abb. 64 Grundformel zur Berechnung der Prüfzeit bei künstlicher Alterung [289]

Mit einer Prüfzeit von 341 Stunden konnte man somit 235 Tage simulieren. Dies sind etwa 8 Monate. Geht man nun davon aus, dass maximal die Hälfte der für Kunststoffe schädlichen ultravioletten Strahlung mit einer Wellenlänge von 280-400 Nanometern im Innenraum ankommt, so hätte man ca. 16 Monate Innenraumlagerung simuliert.

Bei einer Bestrahlungszeit von 1024 Stunden konnte man somit den Zustand des Materials in 3,8 Jahre erzeugen.

Vergleicht man die mechanischen Eigenschaftsverluste nach 341 Stunden künstlicher Alterung, mit welcher man 16 Monate simulieren konnte, mit den Werten nach 18 Monaten Freibewitterung, die ungefähr einer Alterung von 36 Monaten entsprechen, so führt die Alterung unter Echtzeitbedingungen zu verlässlicheren Werten.

4.7.2 Freibewitterung nach DIN EN ISO 877:2010

Die folgende Abbildung zeigt Probekörper aus Polylactid mit dem Flammschutzmittel TPP und Referenzprobekörper vor und nach der eineinhalbjährigen Freibewitterung nach DIN EN ISO 877:2010 (Kunststoffe – Freibewitterung – Teil 1: Allgemeine Anleitung)



Abb. 65 Probekörper vor und nach Freibewitterung (Probekörperdicke 4 mm)

Tabelle 28 Zusammensetzung der Probekörper aus Abb. 65

Zusammensetzung	PLA	PLA + 8 wt % TPP + 4 wt % NM + 0,5 wt % OA + 2 wt % SM	PLA + 2 wt % KSS + 3 wt % NM + 1 wt % OA + 2 wt % Nanoclay + 3 wt % SM	CA + 10 wt % TPP
vor Freibewitterung	Prüfstab 1	Prüfstab 3	Prüfstab 5	Prüfstab 7
nach Freibewitterung (06.10.11-30.04.13)	Prüfstab 2	Prüfstab 4	Prüfstab 6	Prüfstab 8

Die Probekörper aus Polylactid (Abb. 65, Nr. 2) und Polylactid mit Flammschutzmittel und weiteren Additiven (Abb. 65, Nr. 4) kristallisieren nach. Dies lässt sich an der geringeren Lichtdurchlässigkeit erkennen. Diese sinkt bei Polylactid um 42 % auf durchschnittlich 25,5 %. Beim Probekörper 4 fällt diese von 38-40 % auf 1,9-2,5 % ab. Eine Vergilbung ist lediglich beim Verbund aus PLA mit aromatischem Sulfonatsalz und Nanoclay (Abb. 65, Nr. 6) sowie beim Compound aus Cellulosediacetat und TPP (Abb. 65, Nr. 8) zu erkennen, nicht aber beim ausgesuchten Prüfstab Nr. 3. Die Materialzusammensetzung des Prüfstabes 6 aus der Abb. 65 (Siehe auch *Tabelle 28 Zusammensetzung der Probekörper aus Abb. 65*), führt bereits nach 18 Monaten Freibewitterung zu einem brüchigen Werkstoff.

In der Abbildung sichtbare Flecken und Kratzer stammen vom Entfernen des Epoxidharzes, das zur Befestigung am Prüfstand verwendet wurde.

4.7.3 Veränderung der mechanischen Eigenschaften durch künstliche und natürliche Alterung

Die mechanischen Eigenschaften vor und nach einer Alterung durch künstliche oder natürliche Bestrahlung, durch Temperatur-, Feuchtigkeitslagerung und –wechsel ebenso deren Kombinationen wird in vorliegender Arbeit durch die Streckspannung und Streckdehnung angegeben. Die Streckspannung entspricht der Streckgrenze, welche auch als Fließgrenze bezeichnet wird. Sie bezeichnet die mechanische Spannung, bei der ein Werkstoff noch reversibel gedehnt werden kann. Beim Fließen wird der Kunststoff bleibend verformt [290]. Die Streckdehnung gibt die Dehnung in Prozent an der Streckgrenze an [291].

Polylactid und modifiziertes Polylactid präsentiert sich in allen Zugversuchen als zäher Werkstoff mit Streckpunkt. Da es in der Spannungs-Dehnungs-Kurve kein 2. Maximum gibt, entspricht die Zugfestigkeit der Streckspannung [292].

Tabelle 29 Veränderung der mechanischen Eigenschaften von (Bio)Kunststoffcompounds nach künstlicher und natürlicher Alterung

Zusammensetzung	Streckspannung vor Alterung [N/mm ²]	Künstliche Alterung		Freibewitterung		künstliche Alterung		Freibewitterung	
		Streckspannung nach künstlicher Alterung hinter Fensterglas 341h [N/mm ²]	Streckspannung nach künstlicher Alterung hinter Fensterglas 1024h [N/mm ²]	Streckspannung nach >18 Monaten Freibewitterung [N/mm ²]	Streckdehnung vor Alterung [%]	Streckdehnung nach 341h Alterung [%]	Streckdehnung nach >18 Monaten Freibewitterung [%]		
1 Polylactid (PLA)	60,5	56,1	16,1	42,5	2,5	0,7	2,1		
2 PLA + 3-4 wt % NM + 0,5 wt % OA + 1,5-2 wt % SM	60,5	nicht ermittelt	21,3	40,6	2,7	0,9	2,1		
3 PLA + 7 wt % TPP + 6 wt % NM + 0,5 wt % OA + 2 wt % SST	50,6	14,4	zerbrochen	42,5	2,3	0,7	1,7		
4 CA + 10 wt % TPP	35,1	nicht ermittelt	35,8	46,9	3,3	3,1	2,2		
5 PMMA (Evonik Röhm - Standard PMMA)	69	nicht ermittelt	85,2	nicht ermittelt	7,9	8,8	nicht ermittelt		
6 PC (Makrolon® 2405)	65 [293]	nicht ermittelt	64	nicht ermittelt	6	8	nicht ermittelt		

Die Streckspannung fällt nach künstlicher Alterung durch Globalstrahlung hinter Fensterglas bei Polylactid (Nr. 1, *Tabelle 29*) und den PLA-Compounds (Nr. 2 und 3) stark ab.

Dabei scheint das Flammschutzmittel TPP keinen für den Abbau ausschlaggebenden Einfluss zu spielen. Bei gleicher Alterung hat sich die Streckspannung beim Compound aus Cellulosediacetat und TPP (Nr. 4) nicht verändert. Dies trifft auch auf die getesteten Referenzproben (Nr. 5 und 6) zu. Ähnlich verhält es sich bei der Streckdehnung.

Betrachtet man im Vergleich dazu die Ergebnisse nach eineinhalb Jahren Freibewitterung, so haben sich die mechanischen Eigenschaften von Polylactid (Nr 1, *Tabelle 29*) um etwa 30 % verschlechtert.

Beim Compound aus Polylactid, Nukleierungsmittel, optischem Aufheller und Schlagzähigkeitsmodifizierer in unterschiedlichen Dosierungen (Nr 2, *Tabelle 29*) betragen die mechanischen Eigenschaften nach der Alterung noch durchschnittlich 67 %.

Gibt man zu den gleichen Compoundbestandteilen das Flammschutzmittel Triphenylphosphat (TPP) hinzu, so verschlechtert sich im gleichen Zeitraum die Streckspannung im Mittelwert um lediglich 16 % auf durchschnittlich 42,5 N/mm², die Streckdehnung um 26 % (Nr.3). Im Vergleich hierzu beträgt die Streckspannung von nicht gealtertem PET-G für beispielsweise profilierte Fassadenplatten ca. 45 N/mm² [294]. PVC-Freischäumplatten für Fassaden- und Innenraumanwendungen verfügen über eine Streckspannung von 16 N/mm² [295]. Wenn man davon ausgeht, dass ein Akustik-Modul aus getestetem Biokunststoff-Compound (Nr. 3, *Tabelle 29*) bei einer 36-monatigen Innenraumanwendung mindestens auch eine Streckspannung von 42,5 N/mm² aufweist, so müsste die Standsicherheit ebenfalls länger als 3 Jahre gewährleistet sein. Zudem herrschen im Innenraum mildere Bedingungen als im Freiraum.

Dass das PLA mit dem gewählten Flammschutzmittel Triphenylphosphat (TPP) in der Freibewitterung etwas langsamer altert als ohne das Flammschutzmittel, könnte eventuell an der wasserabweisenden Wirkung von TPP liegen. Nach Aussage von Dr. Heiko Tebbe der Lanxess AG weist das verwendete Flammschutzmittel Disflamoll® TP „sowohl polare Gruppen (Phosphate-Gruppe) als auch unpolare Gruppen (aromatische Substituenten) im Molekül auf“ (persönliche Kommunikation durch E-Mail, 04.03.2014). Es dominieren die unpolaren Bestandteile des Flammschutzmittels, wodurch Disflamoll® TP schlecht wasserlöslich ist. Compounds, die TPP enthalten, nehmen dadurch weniger Feuchtigkeit auf, wodurch der hydrolytische Abbau des Werkstoffes etwas verzögert werden kann (persönliche Kommunikation mit Dr. Heiko Tebbe/ Lanxess AG durch E-Mail, 04.03.2014).

Das muss jedoch nicht bedeuten, dass das Flammschutzmittel die Dauerhaftigkeit verbessert – insbesondere die künstliche Alterung im Wellenlängenbereich 340 Nanometer zeigt, dass das Flammschutzmittel TPP die UV-Beständigkeit senkt.

Generell präsentiert sich Polylactid weniger beständig gegenüber den Beanspruchungen durch Freibewitterung (Temperatur- und Feuchtigkeitswechsel, Globalstrahlung) und künstliche Alterung durch Globalstrahlung hinter Fensterglas als herkömmliche transparente Kunststoffe wie PMMA oder PC.

4.7.3.1 Veränderung der Eigenschaften nach Innenraumlagerung

Probekörper aller erstellten Chargen der Compoundierungs-Versuche lagerten 33 Monate unter nicht kontrollierten Bedingungen im Büroraum der Autorin. Die Schulterstäbe und Absichtsplatten lagen 2,5 m vom Fenster entfernt ausgebreitet auf einem Tisch. Die folgende Abbildung zeigt Probekörper nach fast 3 Jahren Innenraumlagerung.

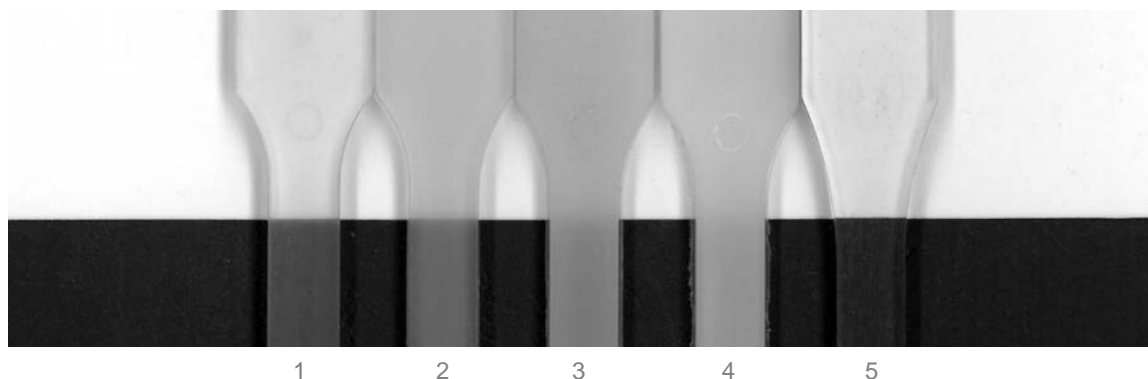


Abb. 66 Probekörper nach 33 Monaten im Innenraum gelagert (Probekörperdicke 4 mm)

Tabelle 30 Veränderung der mechanischen Eigenschaften von PLA und modifiziertem PLA nach 33 Monaten Innenraumlagerung

Nr. in Abb 66	Zusammensetzung	Streckspannung vor Alterung	Streckspannung nach Innenraum-Lagerung	Streckdehnung vor Alterung	Streckdehnung nach Innenraum-Lagerung
		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]
1	Polyactid	60,5	60,7	2,5	2,7
2	PLA + 7 wt % TPP + 6 wt % NM+ 0,1 wt % OA + 2wt% SST	50,6	50,9	2,4	2,7
3	Siehe Nr. 2 Formgebung: Kühlzeit verlängert auf 180s, Werkzeugtemperatur von 25 auf 100°C erhöht	50,2	37,8	1,9	1,7
4	PLA + 7 wt % TPP + 4 wt % NM + 0,75 wt % OA Formgebung: Kühlzeit verlängert auf 180s, Werkzeugtemperatur von 25 auf 100°C erhöht	48,9	36,6	2,5	1,7
5	Cellulosediacetat + 10wt% TPP	35,1	36	3,3	3,2

Die Streckspannung des Compounds mit PLA und TPP lag nach 18 Monaten Freibewitterung zur Simulation von ungefähr 36 Monaten Innenraumlagerung bei 42,5 N/mm² (Tabelle 29, Nr. 3). Unter realen Bedingungen liegt die Streckspannung nach 33 Mona-

ten Innenraumlagerung mit $50,9 \text{ N/mm}^2$ unwesentlich höher als der Ausgangswert von $50,6 \text{ N/mm}^2$ (Tabelle 30, Nr. 2). Auch die Streckdehnung ist etwas höher als vorher. Der Prüfstab ist nach 33 Monaten weder vergilbt noch brüchig (*Abb. 66 Probekörper nach 33 Monaten im Innenraum gelagert*, Nr. 2)

Anders verhält es sich bei Prüfstäben der gleichen Charge, die einer 75 °C höheren Werkzeugtemperatur und einer ungefähr sechsmal längeren Kühlzeit ausgesetzt waren (Tabelle 30, Nr. 3). Diese Maßnahmen wurden zur Verbesserung der Wärmeformbeständigkeit durchgeführt (Siehe auch 4.6.4). Die Streckspannung hat sich um etwa 23 % auf $37,8 \text{ N/mm}^2$ minimiert. Der Werkstoff ist gering spröder geworden. Die Streckdehnung verändert sich von 1,9 auf 1,7 %. Das Aussehen hat sich innerhalb 33 Monaten Innenraumlagerung nicht verändert. Prüfstäbe der Rezeptur Nr. 4 verschlechtern unter gleichen Bedingungen ihre Streckdehnung von 2,5 auf 1,7 %. Dies könnte bedeuten, dass die Wärmebehandlung bei der Formgebung einen Abbauprozess des Compounds initiiert.

Die Streckspannung und Dehnung bleiben beim Compound aus Cellulosediacetat und TPP nach 33 Monaten Innenraumlagerung unverändert (*Tabelle 30*, Nr. 3; *Abb. 66*, Nr. 5).

4.7.4 Veränderung der mechanischen Eigenschaften durch Feuchtigkeits- und Temperaturbeanspruchung

Im *Kapitel 4.7.2* wurden die Eigenschaftsverluste durch Freibewitterung dargestellt. Die Prüfkörper sind dabei UV-Strahlung (Globalstrahlung), Feuchtigkeits- und Temperaturwechseln ausgesetzt. Um zu erkennen, ob eine Werkstoffzusammensetzung insbesondere für ultraviolette Strahlung, Temperatur oder Feuchtigkeit anfällig ist, werden die Proben zusätzlich bei 90 % relativer Luftfeuchtigkeit und einer Temperatur von 60 °C (Klimalagerung) sowie bei normaler Luftfeuchtigkeit von 40 % und einer Temperatur von 60 °C (Temperaturlagerung) gelagert. Die Streckspannung sinkt nach einer Woche Klimalagerung um durchschnittlich 83 %. Bei einer Temperaturlagerung von 60 °C verbessert sich die Streckspannung und -Dehnung von Polylactid zunächst. Das Compound aus Polylactid (PLA) und dem Flammschutzmittel TPP weist nach 168 Stunden Klimalagerung (1 Woche) nur noch 6,7 % seines Ausgangswerts (Streckspannung) auf. Die Streckdehnung hat sich in der gleichen Zeit um 50 % verschlechtert. Wird das Compound einer 400-stündigen Temperaturlagerung bei 60 °C ausgesetzt, so sinkt die Streckspannung minimal, die Streckdehnung bleibt unverändert.

Werden Prüfkörper des Compounds aus PLA und TPP beim Formgebungsprozess (Spritzguss) mit einer Werkzeugtemperatur von 100 °C statt 25 °C sowie einer durchschnittlich 150 Sekunden längeren Kühlzeit gefertigt, so wurde eine schlechtere Streck-

dehnung nach Klima- und Temperaturlagerung ermittelt als bei der konventionellen Fertigung.

Die Streckspannung und Streckdehnung dieser Charge wurde vor der Klima- und Temperaturlagerung nicht ermittelt (Prüfkörpermangel). Dieses Ergebnis festigt die Vermutung, dass die Wärmebehandlung bei der Formgebung einen Abbauprozess des Compounds initiieren könnte. Die Zugabe von Prozess- und Hitzestabilisatoren (0,1-2 wt %) könnte diesen Effekt minimieren, da diese das Compound während der Herstellung, Formgebung und Nutzung vor Wärme schützen.

Tabelle 31 Veränderung der mechanischen Eigenschaften von PLA und modifiziertem PLA nach Klima- und Temperaturlagerung

Nr.	Zusammensetzung	Klima-lagerung		Temperatur-lagerung		Klima-lagerung		Temperatur-lagerung	
		Streckspannung vor Alterung [N/mm ²]	Streckspannung nach Klima-lagerung [N/mm ²]	Streckspannung nach Temperatur-lagerung [N/mm ²]	Streckdehnung vor Alterung [%]	Streckdehnung nach Klima-lagerung [%]	Streckdehnung nach Temperatur-lagerung [%]		
1	Polylactid	60,5	10,8	72	2,5	0,5	3		
2	PLA + 7wt% TPP + 6wt% NM + 0,5wt% OA + 2wt% SST	50,6	3,4	46,2	2,4	1,2	2,4		
3	Siehe Nr. 2 Formgebung: Kühlzeit verlängert auf 180s, Werkzeugtemperatur von 25 auf 100°C erhöht	Nicht ermittelt	3,8	31,5	Nicht ermittelt	0,2	1,5		
4	PLA + 10wt% APP	46,5	22,2	53	3,2	0,9	2,7		

Klimalagerung: 168 h bei 60°C und 90%rF Temperaturlagerung: 400 h bei 60°C

Die Klimalagerung zeigt, dass Abbauprozesse von Polylactid und Polylactid-Compounds vor allem durch die Kombination aus Feuchtigkeit (90 % rF) und Wärme (Lagerung bei 60 °C) in Gang gesetzt werden. Die mehr als 18-monatige Freibewitterung demonstriert, dass der Eigenschaftsverlust unter Echtzeitbedingungen geringer ist als bei den Simulationen. Das Akustikmodul ist bei einer Innenanwendung zudem längst nicht den Temperatur- und Feuchtewechsel-Bedingungen ausgesetzt wie im Freien.

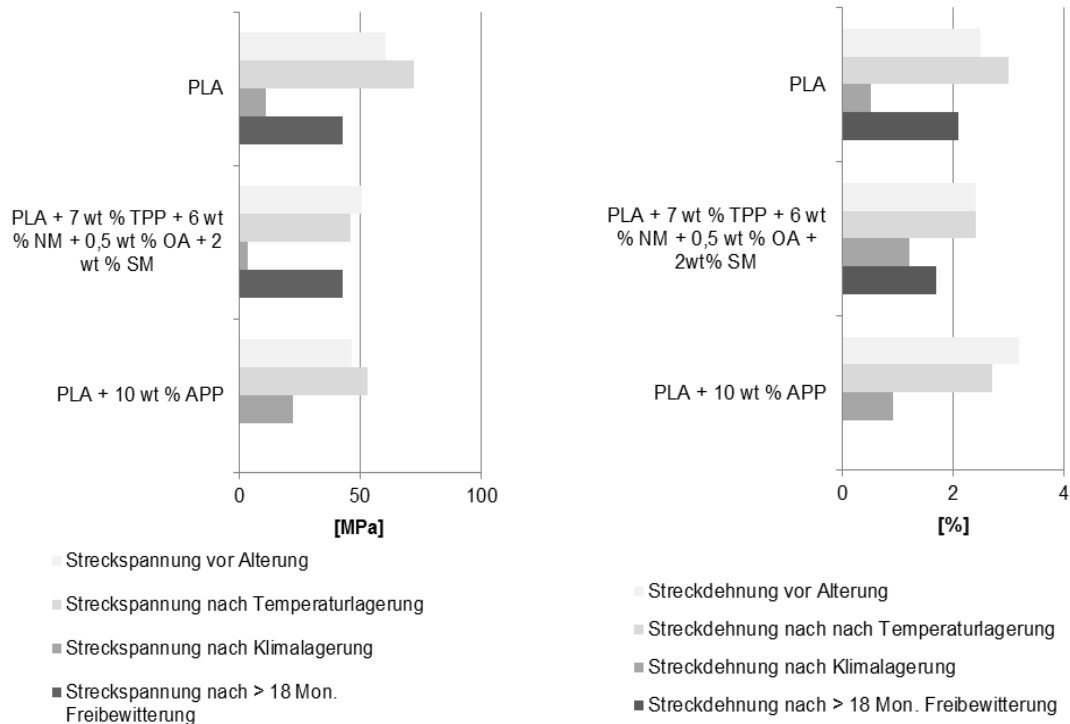


Abb. 67 Veränderung der Streckdehnung und Streckspannung nach Temperatur- und Klimalagerung

4.8 Weitere mechanische Eigenschaften von PLA

4.8.1 Schlagzähigkeit

Polylactid ist ein spröder Werkstoff. Die Zähigkeit ist gering. Ein Bruch kündigt sich nicht mit plastischer Verformung an, sondern bricht unmittelbar, oft auch mit Splittern. Bei den Compoundierungen mit Flammenschutzmitteln wurde auch ein Schlagzähigkeitsmodifizierer in den Konzentrationen 1,5-3 Gewichtsprozent hinzugefügt. DuPont empfiehlt beim verwendeten Schlagzähigkeitsmodifizierer Biomax® Strong 120 eine Zugabe von 2-5 Gewichtsprozent. Es konnte keine redundante Steigerung der Schlagzähigkeit ermittelt werden. Daher wurde dieser Aspekt in der vorliegenden Arbeit nicht weiter berücksichtigt, da eine Zugabe von fünf Gewichtsprozent die Lichtdurchlässigkeit deutlich senkt [296].

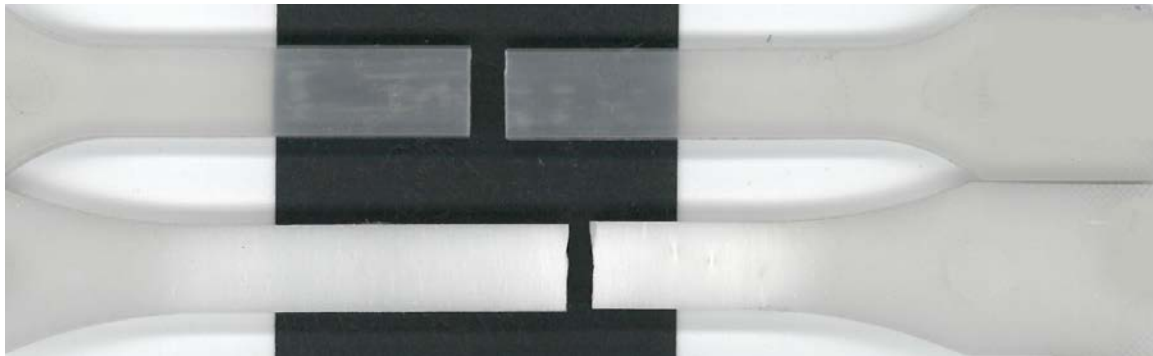


Abb. 68 Sprödbbruch beim Zugversuch: PLA und PLA-Compound mit 3 wt % Schlagzähigkeitsmodifizierer (Probekörperdicke 4 mm)

Die Bruchfestigkeit der Prüfstäbe bei der Einwirkung von Schlagbelastungen durch ein Pendelschlagwerk in einer 3-Punkt-Biegevorrichtung wurde nach der ISO 179 -1 ermittelt.

Tabelle 32 Ermittelte Schlagzähigkeit von PLA und PLA-Compounds im Vergleich zu PMMA, PC und PET

Nr.	Zusammensetzung	Schlagzähigkeit [kJ/m ²] Charpy ISO 179-1/1eU; Prüftemperatur: 23°C	Standard abweichung	Quelle
1	Polylactid	17,2	4,1	
2	PLA + 2 wt % NM + 1,5 wt % SM	20,7	0,8	
3	PLA + 4 wt % NM + 0,5 wt % OA + 8 wt % TPP + 2 wt % SM	14	2	
4	PLA + 5wt% NM+ 3wt% SM	19,3	1,1	
5	PLA + 4 wt % NM + 0,5 wt % OA + 8 wt % TPP	21,3	4,4	
6	PLA + 5 wt % NM + 0,5 wt % OA + 7 wt % TPP + 2wt% SST	16	1,2	
7	PMMA	nicht gebrochen		[297]
8	PC	nicht gebrochen		[298]
9	PET	> 50		[299]

Tabelle 32 zeigt, dass sich die Schlagzähigkeit durch die Zugabe von 1,5 bis 3 Gewichtsprozent (Nr. 2 bis Nr. 4) im Vergleich zu Polylactid (Nr. 1) nicht oder nur unwesentlich verbessert. Das Compound Nr. 5, welches keinen Schlagzähigkeitsmodifizierer enthält, präsentiert sich mit einer besseren Schlagzähigkeit als die Compounds die Schlagzähigkeitsmodifizierer enthalten. Das Flammenschutzmittel TPP wird auch als Weichmacher eingesetzt. Weichmacher erhöhen die Zähigkeit von Kunststoffen.

4.9 Neutralisierung der Gelbstichigkeit durch optische Aufheller

Polylactid weist einen leichten Gelbstich auf. Da es sich bei dem Bioakustik-Modul um ein Design orientiertes Produkt im höheren Preissegment handelt, nimmt die Ästhetik des Werkstoffes einen wichtigen Stellenwert ein. Der Gelbstich kann den Eindruck vermitteln, es handle sich um ein vergilbtes, bereits gealtertes Material.

Die leichte Gelbfärbung des Biokunststoffes kann durch einen optischen Aufheller ausgeglichen werden, so dass man ein leicht bläustichiges Weiß erhält (siehe Abb. 69).

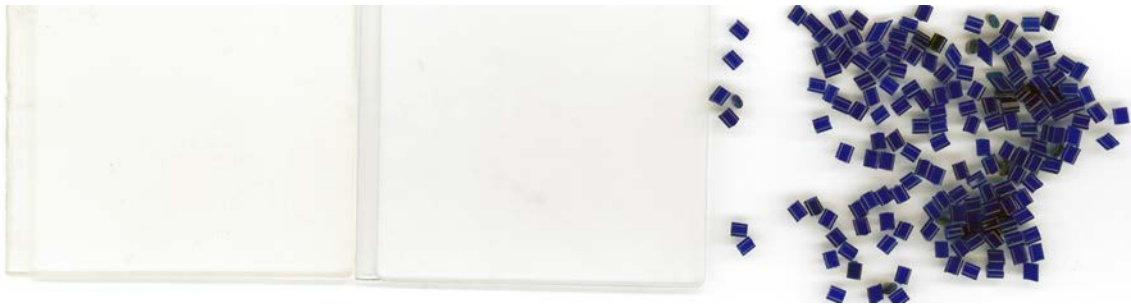


Abb. 69 Links: Polylactid mit Gelbstich, Mitte: PLA-Flammschutz-Compound mit 0,5 wt % optischem Aufheller (Granulat rechts) (Plattendicke 2 mm)

Hierzu wurde das Additiv *SUKANO® PLA ob S515-N* von der Sukano AG/ Schweiz eingesetzt. Das Masterbatch verwendet als Trägermaterial ein Standard-Polylactid von NatureWorks. Die empfohlene Zugabe beträgt 0,5-1 Gewichtsprozent. Das Granulat sollte vier Stunden bei 65 °C vorgetrocknet werden (Trockenluft).

Die vier Millimeter dicken Prüfstäbe der Abb. 70 zeigen die Farbunterschiede mit optischem Aufheller in den Konzentrationen 0,5 bis 1 Gewichtsprozent. Die Stäbe Nr. 3 und 4 demonstrieren den Einfluss der Schlagzähigkeitsmodifikation auf die Transparenz deutlich. Durch Zugabe von 0,75 bis 1 Gewichtsprozent optischen Aufheller konnte der Gelbstich vollständig beseitigt werden (siehe Abb. 70 Nr. 4, 6, 7). Bei 0,5 wt % (Stab Nr. 3) ist noch eine leichte Gelbfärbung zu erkennen.

Die Materialdicke in der Akustik-Modul-Deckschicht ist 2 mm dick, sodass die Farben noch angenehmer wirken als die 4 mm dicken Prüfstäbe der Abbildung. Die Stäbe 5-7 weisen eine steigende Konzentration an optischem Aufheller auf. Sie wurden zur Verbesserung der Wärmeformbeständigkeit mit erhöhter Werkzeugtemperatur und verlängerter Kühlzeit hergestellt.

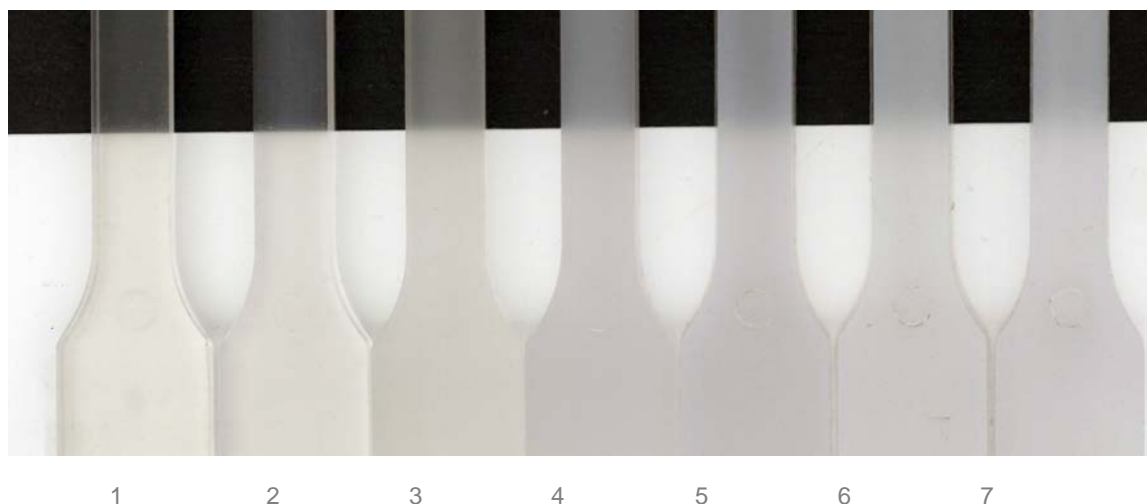


Abb. 70 PLA und PLA-Compounds mit optischem Aufheller (Probekörperdicke 4 mm)

Tabelle Zusammensetzung der Stäbe aus Abb.70

Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zusammensetzung	PLA	PLA + 8wt% TPP + 4wt% NM + 0,5wt% optischer Aufheller	PLA + 2wt% NM + 1,5wt% SM + 0,5wt% optischer Aufheller	PLA + 5wt% NM+ 3wt% SM + 1wt% optischer Aufheller	PLA + 8wt% TPP + 5wt% NM + 0,5wt% optischer Aufheller	PLA + 6wt% TPP + 5wt% NM + 0,75wt% optischer Aufheller	PLA + 8wt% TPP + 5wt% NM+ 1wt% optischer Aufheller
Herstellung	konventionell				Werkzeugtemperatur 100°C Kühlzeit 240 Sekunden		

Die *Abbildungen 71* und *72* zeigen die gewünschte Lichtdurchlässigkeit und Farbgebung, die im Projekt erreicht werden sollten. Die gewünschte Farbgebung konnte erreicht werden.

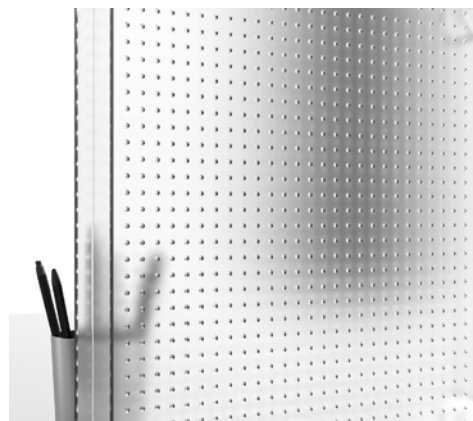
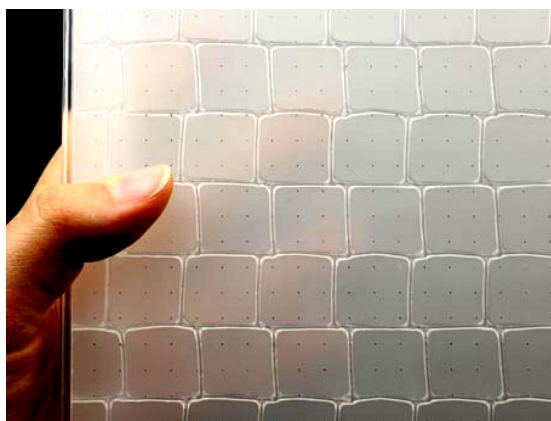


Abb. 71 Rossoacoustic CP 30 – Translucent mattes Akustikelement von Nimbus Group [300]

Abb. 72 Biobasiertes Akustikmodul, Rendering zum gewünschtem Transluzenzgrad, ©Nimbus Group

Die Abbildungen 73 und 74 präsentieren den prototypischen Endstand. Es wurden nur perforierte Platten gespritzt und keine perforierten Halbschalen.

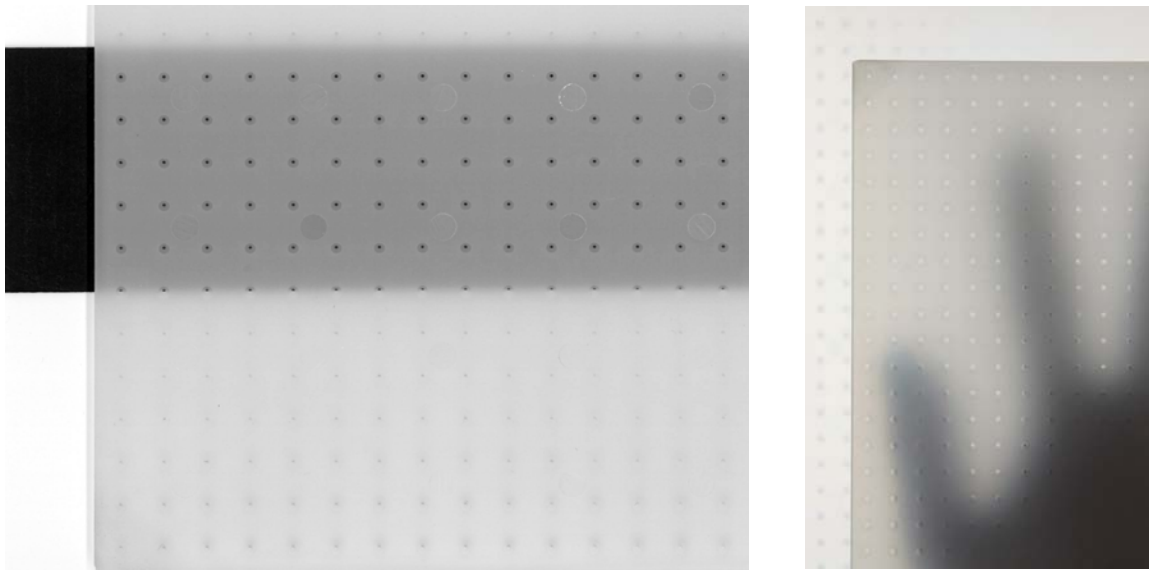


Abb. 73 Projektergebnis – prototypische, transluzente Akustik-Deckplatte aus modifiziertem PLA (2,5 mm dicke Spritzgussplatte)

Abb. 74 Lichtdurchlässigkeit des prototypischen Akustikmoduls: Zwei Akustik-Deckplatten (Plattendicke je 2,5 mm) liegen mit einem Abstand von 5 cm übereinander [301]

4.10 Fazit und Ausblick

4.10.1 Herausforderungen des Produktentwicklungsprozesses - Fazit

Die besondere Herausforderung der prototypischen Entwicklung eines transluzenten Akustikmoduls für die Anwendung als nicht tragende innere Wand in öffentlichen Innenräumen stellt die Verbesserung des Brandverhaltens samt der Wärmeformbeständigkeit von Polylactid unter Aufrechterhaltung der Lichtdurchlässigkeit zu einem marktfähigen Preis und einem hohem Bioanteil dar. Es resultieren folgende Vorzüge und Hemmnisse:

- Selbstverlöschendes Brandverhalten ohne brennende Tropfen (UL94-V0):

Das Brandverhalten von PLA konnte ohne Beeinträchtigung der Lichtdurchlässigkeit verbessert werden. Durch die Zugabe von sieben Gewichtsprozent Triphenylphosphat (TPP) erlischt der Werkstoff innerhalb 2 Sekunden nach Wegnahme der Brandquelle selbstständig. Zulässig wären zur besten Klassifizierung nach UL94-V0 zehn Sekunden. Es entstehen keine brennenden Tropfen. Ob der Werkstoff auch auf Bauteilebene selbst verlöschend ist, muss sich in Brandversuchen nach DIN 4102 oder EN ISO 13501 zeigen.

- Die Wärmeformbeständigkeit des modifizierten PLA konnte verbessert werden:

Bedingt durch die zusätzlich weich machende Wirkung des Flammschutzmittels sinkt die ohnehin geringe Wärmeformbeständigkeit von Polylactid zunächst. Durch Erhöhung der Werkzeugtemperatur von 25 °C auf 100 °C und einer Verlängerung der Kühlzeit von durchschnittlich 15-25 Sekunden auf 240 Sekunden konnte die HDT-B von durchschnittlich 45 °C auf 80 °C (je nach Dosierung von Flammschutz- und Nukleierungsmittel) erhöht werden (*Kapitel 4.6.4*). Eine Wärmeformbeständigkeit von mindestens 60 °C wäre ausreichend. Bei einer Kühlzeit von 180 Sekunden konnte eine HDT-B von 59,7 °C erreicht werden.

- Die Lichtdurchlässigkeit sinkt durch Verbesserung der Wärmeformbeständigkeit:
Zur Erhöhung der Wärmeformbeständigkeit (HDT) wird durch Beeinflussung der Werkzeugtemperatur und der Kühlzeit der Kristallisationsgrad erhöht. Mit zunehmendem Kristallisationsgrad nimmt die Lichtdurchlässigkeit ab, die Wärmeformbeständigkeit nimmt zu. Die durch diese Maßnahme erhöhte HDT führt zu einem akzeptablen Transparenzgrad (*Abb. 75*) (siehe auch 4.6.4.1).

Allerdings ist es stets möglich, dass das nicht vollständig auskristallisierte, modifizierte Polylactid im Laufe der Zeit nachkristallisiert und dadurch opaker wird. Dies ist vor allem dann möglich, wenn das Akustikmodul viel Sonne oder Heizungshitze ausgesetzt ist. Dieser Vorgang kann über Jahre dauern.

- Verbesserung der Schlagzähigkeit ohne Schlagzähigkeitsmodifizierer:
Als Nebeneffekt erhöht die weich machende Wirkung des Flammschutzmittels Triphenylphosphat (TPP) die Zähigkeit. Die Schlagzähigkeit konnte ohne Zugabe von Schlagzähigkeitsmodifizierern bei einer Dosierung von acht Gewichtsprozent TPP um 4 kJ/ m² (ISO 179-1/1eU) erhöht werden. Gibt man zu Polylactid 3 wt % Schlagzähigkeitsmodifizierer hinzu, kann der Wert lediglich von 17,2 kJ/m² auf 19,3 kJ/ m² erhöht werden. Eine höhere Dosierung des Additivs würde die Lichtdurchlässigkeit beeinträchtigen (*Kapitel 4.8.1 Schlagzähigkeit*). Die Schlagzähigkeitswerte von PLA und Standard-PMMA sind vergleichbar und sind für die Anwendung als Akustikmodul ausreichend, obgleich Polylactid spröder ist als Polycarbonat oder PET-G.
- Der Anteil nachwachsender Rohstoffe im Compound liegt bei etwa 92 %:
Sowohl das Nukleierungsmittel als auch der optische Aufheller der Firma Sukano werden als Masterbatch zugegeben, welches zu 85 Gewichtsprozent [302] auf nachwachsenden Rohstoffen basiert. Die prototypische Rezeptur setzt sich aus 88,25 wt % Polylactid, 7 wt % Flammschutzmittel (TPP), 4 wt % Nukleierungsmittel und 0,75 wt % optischen Aufheller zusammen. Sollte das prototypische biobasierte Akustikmodul zur Marktreife geführt werden, wäre eine Kennzeichnung des Produkts beispielsweise durch DIN CERTCO TÜV Rheinland oder VINÇOTTE sinnvoll, da der erzielte Anteil nachwachsender Rohstoffe über 80 % beträgt.

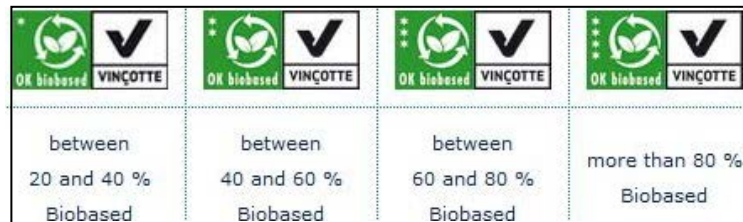


Abb. 75 DIN-Label zur Kennzeichnung von Produkten mit einem biobasierten Anteil über 85% [303]

Abb. 76 VINÇOTTE-Siegel für Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen [304]

- Der für Polylactid übliche Gelbstich konnte beseitigt werden (*Kapitel 4.9 Neutralisierung der Gelbstichigkeit durch optische Aufheller*).

- Der Granulatpreis des Compounds ist marktfähig:

Inklusive der Additive (Nukleierungsmittel, Flammhemmer, optischer Aufheller) ergibt sich beim modifizierten Polylactid-Compound ein grob kalkulierter Endpreis von ca. 3,90 Euro pro Kilogramm bei einer Abnahmemenge von mindestens 1000 Kilogramm (Stand 2012) [305].

- Die Zykluszeiten sind lang:

Die zur Verbesserung der Wärmeformbeständigkeit erhöhte Kühlzeit von 3-4 Minuten zur Kristallisation und Abkühlung des modifizierten Polylactid verteuert den Stückpreis, da pro Maschinenstunde weniger Halbschalen produziert werden können. Bei einer Zykluszeit von drei Minuten betragen die Herstellungskosten einer Halbschale der Abmessung 25 x 25 x 2,5 cm 3,45 Euro (Stand 2012). Bei einer für PLA üblichen Taktzeit von 20 Sekunden ergeben sich Fertigungskosten von 1,57 € pro Halbschale [306].

- Dauerhaftigkeit:

Die Ergebnisse der künstlichen Alterung hinter Fensterglas lassen sich nicht eindeutig interpretieren. Die natürliche Alterung durch Freibewitterung zeigt, dass sich die Streckspannung nach 18 Monaten um 16 % auf 42,5 MPa und die Streckdehnung um 26 % auf 1,7 % verschlechtert haben. Da im Innenraum durch Fensterglas maximal 50 % der schädlichen UVA-Strahlung ankommt und dort generell mildere Bedingungen existieren, ist davon auszugehen, dass die mechanischen Kennwerte nach 36 Monaten ungefähr dieselben sind. Die genannte Streckspannung von 42,5 MPa entspricht in etwa dem Wert von nicht gealtertem PET-G, welches auch in Innen- und Außenräumen eingesetzt wird (*Kapitel 4.7.3. Veränderung der mechanischen Eigenschaften durch künstliche und natürliche Alterung*).

Die zur Validierung der Ergebnisse durchgeführte dreijährige Innenraumlagerung im Büro demonstriert, dass die Probekörper optisch unverändert bleiben. Die Streckspannung und Streckdehnung des modifizierten Polylactids haben sich ge-

ringförmig verbessert. Die Probekörper der gleichen Rezeptur, die zur Verbesserung der Wärmeformbeständigkeit mit einer höheren Werkzeugtemperatur und einer längeren Verweildauer im Werkzeug produziert werden, wurden spröder. Die Streckspannung sinkt um 23 %. Daher liegt die Vermutung nahe, dass die Dauer und Temperatur der Wärmebehandlung einen Abbauprozess initiiert und diese Maßnahme zur Erhöhung der HDT nicht geeignet ist.

Es hat sich gezeigt, dass es technisch möglich ist, Biokunststoffe, in diesem Fall Polylactid, für die beschriebene Innenraumanwendung zu modifizieren. Die Maßnahmen zur Verbesserung der Wärmeformbeständigkeit machen das biobasierte Akustikmodul jedoch unwirtschaftlich. Die Dauerhaftigkeit des Werkstoffes wurde für ca. 3 Jahre simuliert. Wie lange die Standsicherheit über diesen Zeitpunkt hinaus gewährleistet werden könnte, müsste ermittelt werden. Durch die Zugabe von Hitzestabilisatoren kann man den Werkstoff vor Prozesstemperatur schützen, so dass kein vorzeitiger Abbau initiiert wird [307]. Weiterhin werden bei der Compoundierung von Thermoplasten üblicherweise UV-Stabilisatoren oder Antioxidantien hinzugefügt, um die Dauerhaftigkeit zu verlängern (*Kapitel 5.7.2 Weitere mögliche Modifikationen zur Verbesserung der Performance für Außenanwendungen*). Diese Additive wurden in den eigenen Versuchen nicht berücksichtigt.

4.10.2 Mögliche Lösungswege zur Realisierung des Akustikmoduls und Ausblick

- Tempern der konventionell gefertigten Akustik-Halbschalen:

Alternativ könnte man die Akustik-Halbschalen bei einer für Polylactid üblichen Werkzeugtemperatur von 25 °C ohne verlängerte Kühlzeit spritzgießen. So ergibt sich, wie bereits im *Kapitel 4.6.5 Tempern* beschrieben, eine Zykluszeit im Sekundentakt, wodurch mehr Teile pro Maschinenstunde produziert werden können. Die Wirtschaftlichkeit des anschließenden Temperns zur Verbesserung der Wärmeformbeständigkeit muss jedoch überprüft werden.

- Einsatz von (Hochtemperaturbeständigem) Polylactid ohne Flammschutzmittel:

Für die Anwendung der Akustik-Module als nicht tragende innere Wand, als Raum-im-Raum-System oder Ähnlichem sollten die Elemente normal oder schwer entflammbar sein. Würde man kein Flammschutzmittel verwenden, bleibt der Werkstoff leicht entflammbar. Allerdings ist das Brandverhalten aufgrund des hohen Sauerstoff-Index günstig (vgl. *4.4.1 Entzündbarkeit von PLA und CA – Der Sauerstoffindex*). Die Anwendung des Akustikmoduls als Raumgliederungselement, welches nach der DIN EN 1023 zu den Büromöbeln zählt, ist auch mit der Baustoffklasse DIN 4102-B3 möglich (siehe beispielsweise *Abb. 78*). Man könnte die im Kapitel 4 beschriebene niedrigviskose Polylactid-Type verwenden. Eine Platzierung der Akustikelemente in Fenster- oder Heizungsnahe wäre dann zu

vermeiden, da die Wärmeformbeständigkeit bei ca. 55 °C liegt. Bei Stereokomplexen Polylactiden (*Kapitel 2.5.4, 4.3.2.1*), die erst seit dem Projektende im Jahr 2012 verfügbar sind, liegt die Wärmeformbeständigkeit bei etwa 120 °C. Da diese Typen opak sind, müsste geprüft werden, wie lichtdurchlässig das Akustikmodul bei jeweils einer Deckplattenstärke von 2 mm, die durch einen fünf Zentimeter dicken Luftraum von voneinander getrennt sind, noch wäre.



Abb. 77 Anwendungsstudie des biobasierten Akustik-Moduls als Raumgliederungselement
© Nimbus Group

- Verwendung anderer, bereits verfügbarer Biokunststoffe.

Zum einen weist Cellulosediacetat mit einer HDT-B von 86 °C eine ausreichende Wärmeformbeständigkeit auf (*Kapitel 2.5.2 Celluloseacetat (CA)*). Zum anderen sind die Eigenschaftsverluste durch künstliche Alterung, Freibewitterung und Innenraumlagerung geringer als bei einem Compound aus Polylactid und Triphenylphosphat (siehe auch *Tabelle 29 Veränderung der mechanischen Eigenschaften von (Bio)Kunststoffcompounds nach künstlicher und natürlicher Alterung* und *Tabelle 30: Veränderung der mechanischen Eigenschaften von PLA und modifiziertem PLA nach 33 Monaten Innenraumlagerung*). Man müsste gegenwärtig einen doppelt so hohen Preis und einen geringeren Anteil nachwachsender Rohstoffe in Kauf nehmen (*Tabelle 2 Übersicht und Vergleich ausgewählter biobasierter Kunststoffe mit PC und PMMA*).

- Interessante, sich im Entwicklungsstand befindende Alternativen:

Mögliche Alternativen wären in den kommenden Jahren Drop-In-Lösungen wie biobasiertes PVC, welches auf Ethylen basiert (*Kapitel 2.5.7*). Ethylen wird bereits aus nachwachsenden Rohstoffen synthetisiert. Biobasiertes Polyethylen wird seit 2010 vertrieben. PVC mit biobasiertem Weichmacher ist ebenfalls verfügbar, sodass ein biobasiertes PVC sicherlich in den nächsten Jahren auf den Markt stoßen wird.

Die Marktpräsenz von PET, welches nahezu vollständig auf nachwachsenden Rohstoffen basiert (PEF), wird ab 2016 erwartet (siehe auch 2.5.6 Poly-Ethylen-Furanoat (PEF) / Bio-Polyethylenterephthalat (Bio-PET)).

Bio-PMMA soll ab 2022 verfügbar sein (siehe auch 2.5.10 Biobasiertes Polymethylmethacrylat (Bio-PMMA), 2.6 Übersicht und Vergleich ausgewählter (Bio)Kunststoffe).

5 Außenanwendungen – Beispielhafte Entwicklung

Ziel der Arbeit ist weiterhin, zu untersuchen, mit welchen Modifikationen ein biobasierter thermoplastischer Kunststoff für eine Außenanwendung optimiert werden kann. Beschichtungen oder Kaschierungen, die beispielsweise die UV-Beständigkeit verbessern, sind nicht erstrebenswert, da sie das Recycling von Produktionsabfällen und die Weiterverarbeitungsmöglichkeiten als universelles Halbzeug erschweren.

Das Zurückgreifen auf einen thermoplastischen Werkstoff ermöglicht beliebig bearbeitbare Halbzeuge, die direkt oder auch frei geformt durch anschließendes Tiefziehen eingesetzt werden können und somit der Einzigartigkeit jeder Bauaufgabe Rechnung tragen. Biobasierte thermoplastische Kunststoffe verknüpfen die Vorzüge von nachhaltigen Werkstoffen mit der freien Formbarkeit von Kunststoffen. Bisher sind keine vergleichbaren Bauprodukte verfügbar.

Das Granulat der in diesem Kapitel vorgeschlagenen Rezeptur könnte zu Vollplatten extrudiert werden, die dann in der Funktion einer Fassadenbekleidung, beispielsweise als Bestandteil von vorgehängten, hinterlüfteten Fassaden eingesetzt werden könnten.

5.1 Verwendung erdölbasierter Kunststoffe in Fassaden

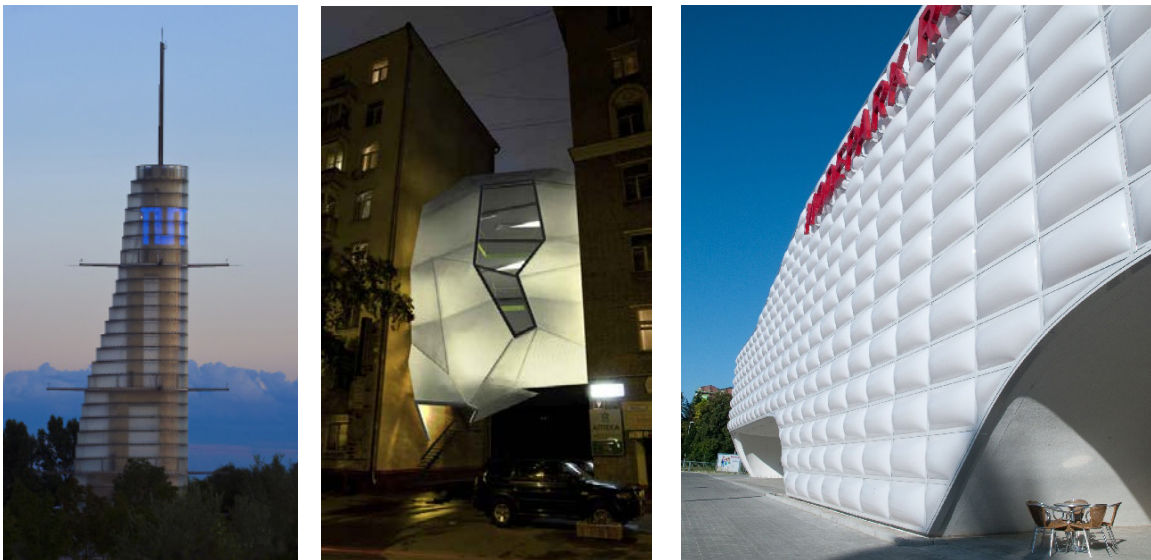


Abb. 78 PMMA Fassade: Wasserturm von Deubzer, König & Rimmel; © A. Heddergott/TU München

Abb. 79 Polycarbonat Fassade: Parasite Office in Moscow, za bor Architects; © Peter Zaytsev

Abb. 80 PETG Fassade Modepark Röther Augsburg; © Lamilux

Kunststoffe finden meist dann Anwendung in Fassaden, wenn transluzente, hinterleuchtete oder frei geformte Bekleidungsteile realisiert werden sollen oder auch dann, wenn

die schlechte Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffes zur Vermeidung von Kältebrücken gefragt ist.

5.2 Stand der Technik – Biokunststoffe in Außenanwendungen

Bei Bauprodukten für Fassadenanwendungen, die einen Anteil nachwachsender Rohstoffe proklamieren, stammt dieser Bioanteil gegenwärtig in den allermeisten Fällen aus der Faserverstärkung, während die Matrix in der Regel erdölbasiert ist. Fassadenplatten aus Holzfaserkunststoffen (WPC) weisen durch ihren Holzmehlanteil, der bis zu 80 % betragen kann, trotz erdölbasierter Matrix, einen hohen Anteil nachwachsender Rohstoffe auf. Bedingt durch den Holzanteil ist der Werkstoff dunkelbraun.

Diese Materialanmut trifft auch für Fassadenplatten der Firma Resysta zu (Abb. 81). Sie bestehen aus 60 % Reishülsen, 22 % Steinsalzen sowie 18 % Mineralöl und sind daher auch überwiegend biobasiert [308].

Fassadenplatten der Firma UPM greifen in ihrer Faserverstärkung auf ligninfreie Etikettenabfälle zurück, wodurch ein Vergrauen der Fassade verhindert wird. Der Etikettenanteil liegt bei mindestens 50 %, als Kunststoff wird Polypropylen verwendet [309]. (Abb. 82)

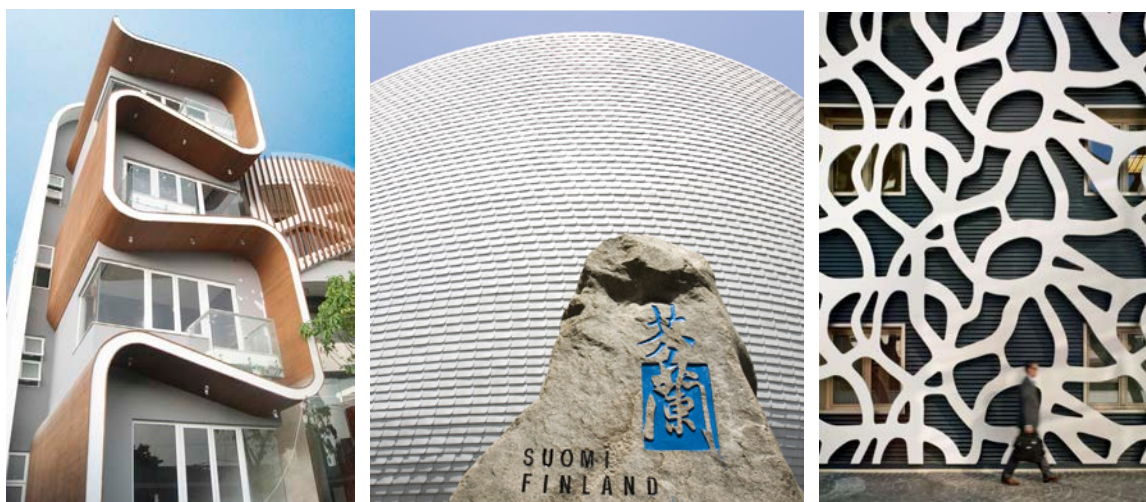


Abb. 81 Reishülsen als Hauptbestandteil der Fassadenprofile von Resysta © Resysta

Abb. 82 Fassadenschindeln aus Lignin freiem Holz-Kunststoff-Verbund der Firma UPM, Finnischer Pavillon auf der World Expo Shanghai 2010 © Lucas Schifres/ Finpro

Abb. 83 Ornamentale Fassadenbekleidung aus Mandelschalen und duroplastischem Harz © Duralmond

Gittermodule sowie Platten aus gemahlenden Mandelschalen und einem duroplastischen Harz werden von der spanischen Firma Duralmond für Fassadenanwendungen angeboten (Abb. 83). Es können zahlreiche Formen und Strukturen realisiert werden [310].

Eine der weltweit ersten Fassadenbekleidungen, die nahezu vollständig aus nachwachsenden Rohstoffen gefertigt wurden, findet sich an der Gasempfangsstation in den Niederlanden, geplant durch das Studio Marco Vermeulen, wieder (Abb. 84). Duroplastisches Bioharz und Hanfvliese werden hierzu von der Firma NPSP Composites in Haarlem mittels Vakuuminfusion zu Fassadenplatten laminiert [311].

Im EU-Projekt *BioBuild* des 7. Forschungsrahmenprogramms werden Bioverbundwerkstoffe für Innen- und Außenanwendungen entwickelt. Unter anderem entstand dabei ein Fassadenmodul (Abb. 85, Abb. 86) aus Naturfasergewebe mit biobasiertem Furanharz auf der Basis von Bagasse. Die selbsttragenden Fassadenmodule sind etwa vier Meter groß.

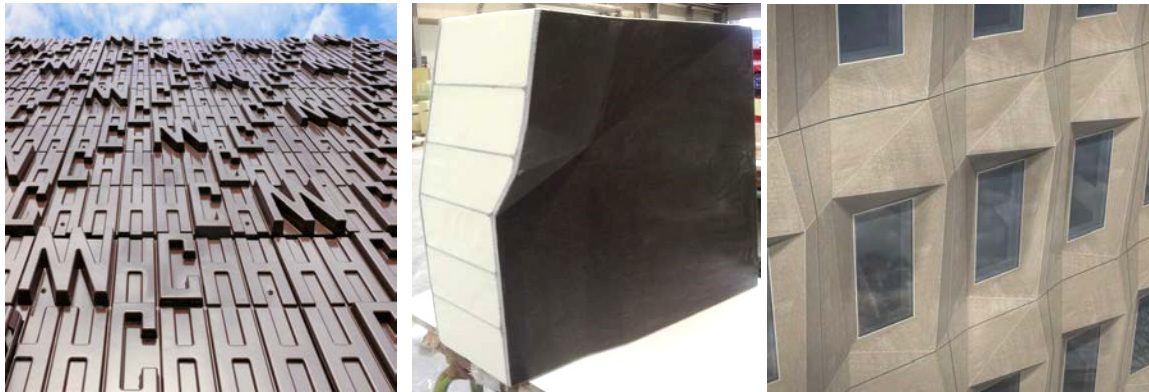


Abb. 84 Bioharz-Hanf-Verbund für die Fassade einer Gasempfangsstation © Studio Marco Vermeulen

Abb. 85 Fassadenmodul mit einer Bekleidung aus einem © Fiber-Tech Constructon

Abb. 86 Anwendungsstudie des EU Projektes Biobuild © Arup

Beide vorangehend genannten Biocomposites führen zu braunen Fassadenelementen. Oftmals werden von Planern und Bauherren auch weiße bzw. helle oder transparente Werkstoffe gewünscht. Hier gibt es bisher keine entsprechenden Bauprodukte.

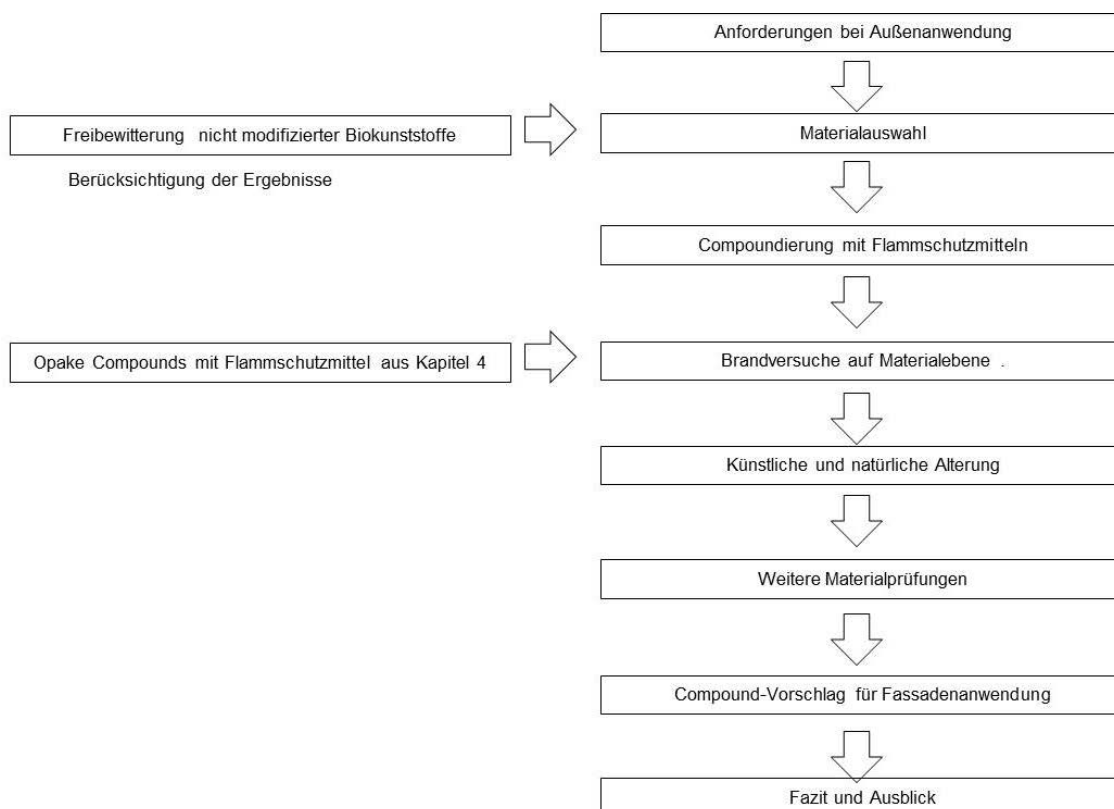
Für den Einsatz als warme Kante für Mehrscheibenisoliervglas wurde der Abstandhalter NIROTEC EVO entwickelt, der beispielsweise auch im Schüco-Fassadensystem FW 50+.SI Green Anwendung findet. Er setzt sich ebenfalls als Verbundsystem aus einer dünnen Edelstahlfolie und einem thermoplastischen Blend aus Polylactid und weiteren Biopolyestern zusammen, wobei der Biowerkstoff nicht sichtbar ist [312] [313].

5.3 Vorgehen

Unter Berücksichtigung der Anforderungen sowie den Ergebnissen der Freibewitterung, die eineinhalb Jahre vorher ablief, wird Polylactid als Basismaterial für die Anpassung an eine Fassadenanwendung gewählt. Überdies liegt es nahe, den in Kapitel 4 modifizierten Biokunststoff Polylactid unter einem erweiterten Anforderungsspektrum zu betrachten, da das Material zu den preisgünstigsten biobasierten Kunststoffen gehört und gut verfügbar ist.

PLA wird mit verschiedenen Flammschutzmitteln compoundiert. Das resultierende Brandverhalten wird in Brandversuchen auf Materialebene (nach UL94-V) ermittelt. Hierbei werden auch die opaken Compounds aus Kapitel 4 berücksichtigt. Danach werden zur Ermittlung der Dauerhaftigkeit unterschiedliche Alterungssimulationen und eine Freibewitterung durchgeführt und Eigenschaftsverluste dargestellt.

Es folgen weitere Materialprüfungen (Feuchtigkeitsaufnahme, Ermittlung der HDT-B), wobei im Anschluss ein Compound (Rezeptur) vorgeschlagen wird. Dieser Aspekt beinhaltet auch die Darstellung möglicher weiterer Modifikationen zur Erzielung notwendiger Performance für Außenanwendungen.



5.4 Materialauswahl unter Berücksichtigung der Anforderungen und den Ergebnissen der Alterung

5.4.1 Ergebnisse der Witterungsbeständigkeit nicht modifizierter Biokunststoffe

Zunächst wird eruiert, wie sich biobasierte Kunststoffe ohne Additive wie Flammschutzmittel oder UV-Stabilisatoren optisch verändern, wenn sie im Freien gelagert werden. Vom 22.02.2010 bis zum 13.04.2013 wurde eine über dreijährige Freibewitterung nach DIN EN ISO 877:2010 durchgeführt.

Die notwendige Zugabe von Flammhemmern wird mit hoher Wahrscheinlichkeit die Witterungsbeständigkeit verschlechtern. Da man zugunsten des NaWaRo-Anteils möglichst wenig Additive hinzufügen möchte, ist es sinnvoll ein Biokunststoff zu verwenden, der bereits eine gute Performance mitbringt.

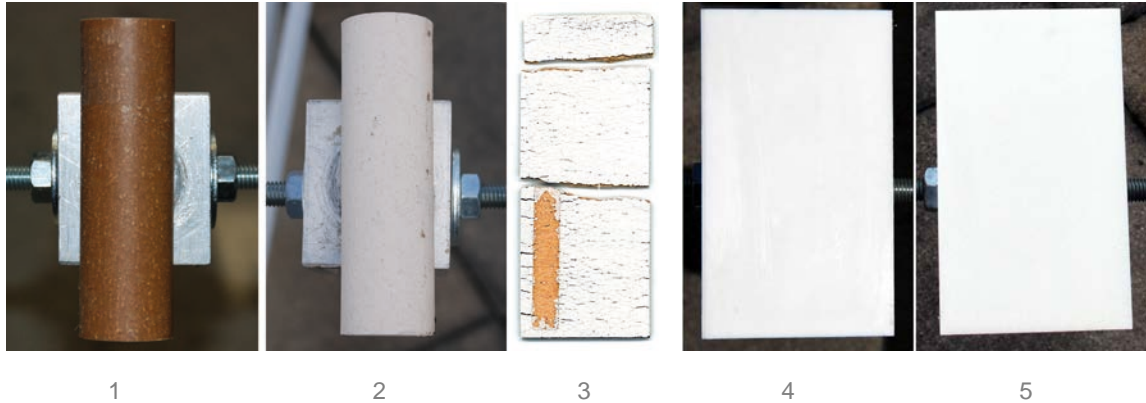


Abb. 87 PLA-Lignin-Cellulose-Compound vor (Nr.1) und nach 18 Monaten Freibewitterung (Nr.2)

Abb. 88 PLA-Lignin-Cellulose-Compound nach 18 Monaten Freibewitterung, Platte 3 mm dick (Nr.3)

Abb. 89 Polylactid vor (Nr. 4) und nach 38 Monaten Freibewitterung (Nr. 5)

Bioverbundwerkstoffe aus Lignin und Cellulosefasern – diese sind auch die Hauptbestandteile im Holz - vergrauen bereits in 18 Monaten Freibewitterung stark (Abb. 87, Prüfkörper Nr. 2) und sind daher als nicht witterungsbeständig einzustufen. Ultraviolette Strahlung baut das Lignin ab. Es entsteht ein wasserlösliches Zerfallsprodukt, welches durch Regen ausgewaschen wird. Zurück bleibt die weißliche Zellulose, auf deren Oberfläche sich Mikroorganismen ansiedeln, die als grauer Überzug sichtbar werden [314]. Auch die Festigkeit des Verbundwerkstoffes ist nicht mehr gegeben. Drei Millimeter dicke Platten sind bereits nach 18 Monaten zerbrochen (Abb. 88). Polylactid zeigt sich nach über drei Jahren (38 Monate) Außenlagerung optisch nahezu unverändert. Die Veränderung der optischen und mechanischen Eigenschaften bei einer künstlichen Alterung nach DIN EN ISO 4892:2011 wird in *Kapitel 5.6* dargestellt.

5.4.2 Materialauswahl unter Berücksichtigung der Anforderungen und der Freibewitterung

Um alle Gebäudeklassen bedienen zu können, sollten Fassadenplatten aus biobasierten Werkstoffen schwer entflammbar sein (DIN EN 13501-1:2007 B oder C). Normal entflammbare Materialien können in Gebäuden mit maximal sieben Meter Höhe und höchstens zwei Nutzungseinheiten, die kleiner als 400 m² sind, eingesetzt werden. Außenwandbekleidungen sollten Grenztemperaturen von – 20 °C und + 80 °C standhalten können [315]. Die Standsicherheit muss über einen wirtschaftlich angemessenen Zeitraum – das sind bei Fassadenbekleidungen durchschnittlich 30 Jahre, gewährleistet werden [316].

Wie bereits beschrieben, ist es sinnvoll Polylactid, welches bereits in Kapitel 4 als Basispolymer verwendet wurde, aufgrund des geringen Preises, der geringen mechanischen Eigenschaftsverluste durch Alterungssimulationen (*Kapitel 4.7.3 Veränderung der mechanischen Eigenschaften durch künstliche und natürliche Alterung*) und der Verfügbarkeit für Außenanwendungen zu untersuchen. Zudem zeigen sich die Probekörper aus Polylactid, wie vorangehend in *Kapitel 5.4.1* oder auch *4.7.2* beschrieben, nach dreijähriger Freibewitterung optisch unverändert.

Wie bereits in *Tabelle 12 Für Innenraumanwendungen zu optimierende Eigenschaften von Polylactid und Celluloseacetat* erläutert, muss bei Polylactid insbesondere das Brandverhalten wie auch die Wärmeformbeständigkeit verbessert werden. Dies gilt gewiss ebenfalls für die Außenanwendung von Gebäuden.

5.5 Verbesserung des Brandverhaltens von Biokunststoffen zur Anpassung für Fassadenanwendungen

Bei der Auswahl eines Flammschutzmittels für Polylactid stand die Unbedenklichkeit im Vordergrund. Die resultierende Lichtdurchlässigkeit des modifizierten Werkstoffes ist nicht relevant.

5.5.1 Experimenteller Teil: Compoundierung von Polylactid mit Flammschutzmitteln

Polylactid wird mit folgenden, halogenfreien Flammschutzmitteln compoundiert:

- Ammoniumpolyphosphat (APP)
(siehe *4.5.4 Versuche mit mikroverkapseltem Ammoniumpolyphosphat (APP)*)

Versuche mit APP und aromatischem Sulfonatsalz wurden bereits zur Entwicklung des transluzenten Akustikmoduls in Kapitel 4 getätigt. Da beide Formulierungen zu opaken Werkstoffen führen, werden sie im jetzigen Kapitel weiter berücksichtigt.

- Aromatisches Sulfonatsalz Kalium-Diphenyl-Sulfon-Sulfonat (KSS)
(siehe *4.5.5 Versuche mit aromatischem Sulfonatsalz*)
- Roter Phosphor (RP)
(siehe *5.5.1.1 Versuche mit rotem Phosphor*)
- Expandierbarer Graphit/ Blähgraphit (EG)
(siehe *5.5.1.2 Versuche mit Blähgraphit*)

5.5.1.1 Versuche mit rotem Phosphor

Roter Phosphor ist speziell als Flammschutzmittel für Polyamid 6.6 bekannt, man benötigt aufgrund des hohen LOI-Index von PA eine geringe Dosierung [317]. Die mechanischen Eigenschaften bleiben erhalten. Weiterhin wird es als Brandschutzformulierung für Polyethylen, Schaumstoffen aus Polyurethan sowie Epoxidharz und ungesättigtem Polyesterharz eingesetzt [318].

An Schnittflächen der Kunststoffbauteile kann roter Phosphor freigesetzt werden, welcher mit Wasser zu Phosphorsäuren reagiert [319]. Ein Gesundheitsrisiko von giftigem Phosphin an den Kunststoffschnittflächen kann aufgrund der geringen Schnittstellenmenge vernachlässigt werden. Roter Phosphor wird vom Umweltbundesamt als umweltfreundliche Alternative zu halogenhaltigen Flammschutzmitteln deklariert [320].

Es wurde Swiss Exolit RP 690 von Clariant eingesetzt. Gemäß der Dosierungsempfehlung von 8-25 Gewichtsprozent wurde zunächst 25 wt % hinzugefügt.

Tabelle 33 Compoundierungsversuche mit dem Flammschutzmittel roter Phosphor (RP):

Biokunststoff	Polylactid (Ingeo™ 3251D)
Additive	Anteil bezogen auf Endprodukt [%]
Flammschutzmittel	
Roter Phosphor (Swiss Exolit RP 690/Clariant)	25
weitere Additive	
Nukleierungsmittel/ Thermostabilisator (Biomax® Thermal)	5
Schlagzähigkeitsmodifizierer (Biomax® Strong)	5

Das Flammschutzmittel führt aufgrund seiner roten Farbe zu einem dunkelroten Werkstoff. Dies schränkt die Einsatzbreite im Vergleich zu weißen oder transparenten Materialien ein, es werden jedoch durchaus rotbraune bis rote Fassadenmaterialien realisiert.



Abb. 90 Ergebnis der Compoundierungsversuche aus Polylactid mit rotem Phosphor vor und nach Brandversuchen

Abb. 91 Nebuta Museum in Aomori/ Japan © S.Forsythe / molo design

Abb. 92 Wohnhaus im Weinberg [321]

5.5.1.2 Versuche mit Blähgraphit

Blähgraphit wird seit über 30 Jahren als halogenfreies, umweltfreundliches Flamm- schutzmittel eingesetzt. So beispielgebend auch im Forschungsprojekt '*Entwicklung von elektrischen Baugruppen auf Verdrahtungsträgern aus nachwachsenden Rohstoffen*' (Projektlaufzeit 2003 – 2005) [322]. In Kombination mit einer Kunststoffmatrix aus Lignin wird Graphit, welcher aus hexagonalem Kohlenstoff besteht, der geschichtet ist (Flo- ckengraphit), eingesetzt [323]. Graphit wird beispielsweise auch in Bleistiften verwendet. Für die Herstellung von Blähgraphit wird Flockengraphit mit Säuren (z.B. Essigsäure) und Oxidationsmitteln (z.B. Kaliumpermanganat) behandelt. Dadurch bilden sich in den Schichtgittern wasserunlösliche Salze und leicht flüchtige Substanzen, die dann im Brandfall durch Wärme das Expandieren auslösen und eine Dämmschicht bilden (Intu- meszenz), sodass der Brandherd isoliert wird. Es wurde Nord-min® KP 251 von Nord- mann, Rassmann verwendet. Der Blähgraphit expandiert ab einer Temperatur von 150 °C [324].

Tabelle 34 Compoundierungsversuche mit dem Flammschutzmittel Blähgraphit

Biokunststoff	Polylactid (Ingeo™ 3251D)
Additive	Anteil bezogen auf Endprodukt [%]
Flammschutzmittel	
Expandierbarer Graphit (Nord-min® KP 251)	12,5
weitere Additive	
Nukleierungsmittel/ Thermostabilisator (Biomax® Thermal)	5
Schlagzähigkeitsmodifizierer (Biomax® Strong)	4

Die Zugabe des Graphits führt zu einem schwarzen Werkstoff. Dunkle Baustoffe wie Schiefer, schwarzer Klinker oder andere werden auch in Fassaden eingesetzt.



Abb. 93 Ergebnis der Compoundierungsversuche aus Polylactid mit expandierbarem Graphit vor und nach Brandversuchen

Abb. 94 Schieferfassade Schulzentrum Ailingen, Hildebrand + Schwarz © Baunetzwissen

Abb. 95 Schwarze Klinkerfassade – Institut Hochspannungstechnik TU München, Hild und K. © Foto: M. Heinrich

5.5.2 Ergebnisse der Brandtests

Die Brandklassen wurden bei einer Probendicke von 4 mm nach der Norm UL 94 in Vertikalbrennprüfungen auf Materialebene ermittelt.



Abb. 96 Prüfstäbe nach den Brandprüfungen nach UL94-V (Probekörperdicke 4 mm)

PLA-Prüfstäbe mit dem Flammschutzmittel Kalium-Diphenyl-Sulfon-Sulfonat (KSS), welches herkömmlicherweise für das petrochemisch basierte Polyester Polycarbonat verwendet wird, brennen bis zur Halteklammer ab, wenn nicht vorher gelöscht wird (siehe *Tabelle 35* Nr. 2 und 3). Die Abbildung 96 zeigt Prüfstäbe, die gelöscht wurden (Nr. 2, Nr. 3). Die Dosierung lag um ein Zehnfaches höher als empfohlen. Weitere Tests machen daher keinen Sinn, da der Preis für das Flammschutzadditiv dann zu hoch wäre.

Das Flammschutzmittel Ammoniumpolyphosphat (APP) führt auf Materialebene zu einem schwer entflammaren Werkstoff (UL 94-V0). Unmittelbar nach Wegnahme der Brandquelle erlischt der Brand am Prüfstab sofort, auch bei der 2. Beflammung (siehe Prüfstab Nr. 4 Abb. 96, *Tabelle 35* Nr. 4). In einem weiteren Schritt könnte man untersuchen, ob die Dosierung von zehn Gewichtsprozent reduziert werden kann.

Auch mit rotem Phosphor (RP) lässt sich ein schwer entflammbarer Polylactid-Werkstoff herstellen. Die Nachbrennzeit ist in etwa viermal länger als beim Compound aus PLA und APP, sie liegt jedoch im Rahmen der Bedingungen zur Einstufung in die Brandklasse UL94-V0 (siehe auch *Tabelle 35* Nr. 5). Es bildet sich eine verkohlte Oberflächenschicht (siehe Stab Nr. 5, Abb. 96), die isolierend wirkt und somit die Brandausbreitung verhindert (Intumeszenz).

Die Dosierung von 12,5 wt % expandierbarem Graphit ist für das Erreichen der Brandklasse V0 nicht ausreichend. Die Prüfstäbe sind leicht entflammbar. Der Brand erlischt nach durchschnittlich 180s und brennt fast bis zur Halteklammer ab. Der Prüfstab Nr. 6 der Abb. 96 wurde vorher gelöscht. Man erkennt die isolierende, verkrustete Ascheschicht.

Die Brandschutzwirkung von Blähgraphit kann in Kombination mit Ammoniumpolyphosphat (APP) oder Zinkborat, die hier synergistisch wirken, vermutlich verbessert werden [325]. Des Weiteren müsste man eine höhere Dosierung des expandierbaren Graphits testen.

Tabelle 35 Brandklassen (UL94-V) von PLA-Compounds mit unterschiedlichen Flammschutzmitteln

	Probekörper	Nachbrennzeit 1. Beflam-mung in Sekunden	Abbrand bis zur Halteklammer	Nachbrenn- und Glüh-dauer nach der 2. Beflam-mung	Entzün-dung der Watte	Abtropfen ohne Ent-zündung der Watte	Rauch-bildung	Brenn-barkeits-klasse nach UL 94 V
1	PLA	10	nein	18	ja	nein	ja	V-2
2	PLA +1 wt % KSS + 2 wt % NM + 0,5 wt % OA+ 4 wt % SM + 3 wt % NC	brennt, muss gelöscht werden	ohne vorheriges Löschen: Ja	keine 2. Beflam-mung	ja	nein	nein	V-2
3	PLA +3 wt % KSS + 4 wt % NM + 2 wt % OA + 3 wt % SM + 2 wt % NC	brennt, muss ge-löscht werden	ohne vorheriges Löschen: Ja	keine 2. Beflam-mung	ja	nein	nein	V-2
4	PLA + 10 wt % APP + 2 wt % NM + 1 wt % SM	0	nein	0 bis 2	nein	ja, bei 2. Beflam-mung	nein	V-0
5	PLA + 25 wt % RP + 5 wt % NM + 5 wt % SM	4 bis 5	nein	6 bis 8	nein	kein Ab-tropfen	nein	V-0
6	PLA + 12,5 wt % EG + 5 wt % NM + 4 wt % SM	180 s Brand	ohne vorheriges Löschen: Ja	keine 2. Beflam-mung	ja	nein	nein	V-2

Kalium-Diphenyl-Sulfon-Sulfonat = KSS
Ammoniumpolyphosphat = APP

roter Phosphor = RP
Nanoclay = NC

expandierbarer Graphit = EG

Die Brandversuche auf Materialebene zeigen, dass folgende Flammschutzmittel in Kombination mit dem Basispolymer Polylactid zu schwer entflammabaren Materialien führen:

- Ammoniumpolyphosphat (APP) Dosierung: 10 wt %
- roter Phosphor (RP) Dosierung: 25 wt %

In einem weiteren Schritt könnte man untersuchen, ob die Ergebnisse bei geringerer Flammschutzmittelkonzentration vergleichbar sind.

Im Anschluss müssen Tests nach der DIN 4102 oder DIN EN 13501 durchgeführt werden, um die Baustoffklasse auf Bauteilebene zu ermitteln. Diese Prüfungen sind nicht Bestandteil der Dissertation.

5.6 Bewitterung modifizierter PLA-Compounds

Die Witterungsbeständigkeit von Polylactid wurde bereits eruiert (*Kapitel 4.7*). Im vorliegenden Kapitel wird untersucht, ob sich die Dauerhaftigkeit durch Zugabe der gewählten Flammschutzmittel ändert.

5.6.1 Künstliche Bewitterung

Die künstliche Bewitterung wurde nach der DIN EN ISO 4892-3:2006, Tabelle 4, Verfahren A, Zyklusnummer 3 [326] durch das MPA Otto-Graf-Institut der Universität Stuttgart durchgeführt. Die Prüfbedingungen waren wie folgt:

Tabelle 36 Beanspruchungsbedingungen der künstlichen Alterung nach DIN EN ISO 4892-3, Zyklus 3

Beanspruchungsperiode	Lampentyp	Bestrahlungsstärke	Schwarzstandtemperatur	Relative Luftfeuchte
5h trocken	Kombination aus Lampen vom Typ 1 A	Kontinuierlich	50 ± 3 °C	< 15 %
1h beregnen		45 W/m ² (290 – 400nm)	25 ± 3 °C	Nicht geregelt

Die Prüfdauer erstreckt sich über 855 Stunden.

Wie bereits im *Kapitel 4.7.1 Künstliche Bewitterung: Globalstrahlung hinter Fensterglas* dargelegt, betrug die Globalstrahlung in Deutschland im Jahr 2013 ca. 1050 kWh/m² und die Strahlungsbelastung einer südlich orientierten Vertikalwand ca. 750 kWh (2700 MJ) pro Quadratmeter. Die künstliche Bestrahlung erfolgte im Spektralbereich 295 – 400 nm mit einer Bestrahlungsstärke von 45 W/m². Der Anteil des Wellenlängenbereichs an der Globalstrahlung beträgt hierbei 6 %, woraus sich eine Strahlungsbelastung von 163,5 MJ, das sind 163.500.000 Wattsekunden, ergibt.

Nach der Formel zur Berechnung der Prüfzeit (siehe auch *Abb. 64 Grundformel zur Berechnung der Prüfzeit bei künstlicher Alterung [278]*) simuliert man mit dieser Strahlungsbelastung in 1009 Stunden ein Jahr in Mitteleuropa. Bei der gewählten Strahlungsdauer von 855 h konnten somit in etwa 309 Tage simuliert werden. Der Beschleunigungsfaktor liegt bei ca. 8,7.

Es zeigt sich, dass das Polylactid aufgrund seines teilkristallinen Charakters auch ohne Nukleierungsmittel nachkristallisiert (*Abb. 97, Prüfstab 2*). In der Prüfkammer herrschen zyklusweise Temperaturen bis 50 °C (siehe auch Tabelle 36). Der leichte Graustich des Compounds aus Polylactid mit dem Flammschutzmittel Ammoniumpolyphosphat (APP) (*Abb. 97, Prüfstab 3*) verschwindet während der künstlichen Alterung. Die Probekörper erscheinen weißer als vorher (*Prüfstab 4*).

Prüfstäbe aus Cellulosediacetat und TPP vergilben leicht (Prüfkörper Nr. 6), die Oberfläche erscheint trüb.

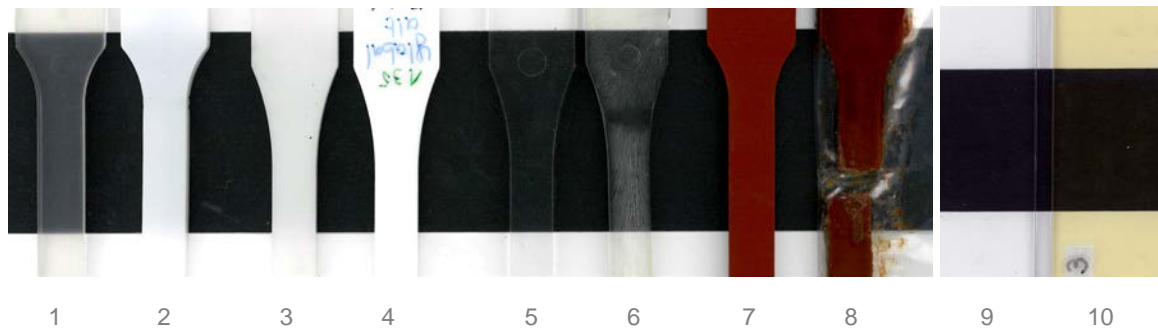


Abb. 97 Proben vor und nach künstlicher Bewitterung nach DIN EN ISO 4892-3; Verf. A, Zyklus 3

Tabelle 37 Proben vor und nach 855 Stunden künstlicher Alterung nach DIN EN ISO 4892-3:2006, Zyklus 3

Zusammen- setzung	PLA	PLA + 10 wt % APP + 2 wt % NM + 1 wt % SM	CA + 10 wt % TPP	PLA + 25 wt % RP + 5 wt % NM + 5 wt % SM	PC mit UV- und Flamm- schutz
vor künstlicher Alterung	Prüfstab 1	Prüfstab 3	Prüfstab 5	Prüfstab 7	Prüfstab 9
nach künstlicher 855h künstlicher Alterung	Prüfstab 2	Prüfstab 4	Prüfstab 6	Prüfstab 8	Prüfstab 10

Polylactid altert in Kombination mit rotem Phosphor (RP) schneller. Das Material wird dunkelrotbraun und brüchig. Die gealterten Prüfkörper wurden in Beuteln aus Polyethylen (LDPE) gelagert und weisen nach etwa 1-2 Monaten eine schmierige Oberfläche auf (siehe Abb. 97 Nr. 8). Dies ist vermutlich Phosphorsäure oder Phosphin.

Prüfkörper aus dem Referenzmaterial Polycarbonat enthalten UV-Stabilisatoren und Flamm-schutz. Hier ist nach 855 Stunden Bestrahlung eine Gelbfärbung zu beobachten (Abb. 97 Nr. 10).

Wie sich die mechanischen Eigenschaften durch die Alterung verändert haben, wird in Kapitel 5.6.3 *Veränderung der mechanischen Eigenschaften nach Alterung* behandelt.

Kapitel 5.6.1.1 stellt die optische Veränderung der Prüfkörper nach der künstlichen Alterung mit Hilfe des Farbabstandes nach DIN 5033-1 dar.

5.6.1.1 Farbänderung nach DIN 5033-1

Mithilfe des Farbabstandes wird eine subjektive Einschätzung der Farbänderung durch die künstliche Alterung quantifiziert. Nach der DIN 5033-1:2009-05 beschreibt der Farbabstand ΔE^*_{ab} die 'Größe des empfindungsgemäßen Unterschiedes zwischen zwei Farben' [327]. Hierbei wird der CIELAB-Farbenraum nach der DIN 6174 herangezogen. Die LAB-Farbwerte wurden mit einem Gerät der Type color-guide sphere der Firma BYK-Gardner ermittelt.

Tabelle 38 Farbabstand von PLA, CA und PLA-Compounds nach künstlicher Alterung durch Globalstrahlung

	PLA	PLA + 10 wt % APP + 2 wt % NM + 1 wt % SM	CA + 10 wt % TPP	PLA + 25 wt % RP + 5 wt % NM + 5 wt % SM	PC mit Flamm- und UV-Schutz
Farbabstand ΔE^*_{ab}	10,3	11,7	2,5	11,1	14,7
Nr. in Abb. 98	1+2	3+4	5+6	7+8	9+10

Werte ab 10 bedeuten, dass eine andere Farbe als vor der Alterung wahrgenommen wird. Bei Werten von 2-4 empfindet man einen Farbunterschied [328]. Polycarbonat hat sich optisch am stärksten verändert. Das Compound aus Cellulosediacetat und TPP erscheint UV-beständiger.

5.6.1.2 Veränderung des Glanzes nach DIN 67530

Weiterhin wurde ermittelt, wie sich die Oberfläche der Prüfkörper hinsichtlich des Glanzvermögens verändert hat. Mit Hilfe eines Reflektormeters *kann nach der DIN 67530:1982 Reflektometer als Hilfsmittel zur Glanzbeurteilung an ebenen Anstrich- und Kunststoff-Oberflächen 'das Glanzvermögen, das ist der Anteil, den die Oberfläche aufgrund ihrer Reflexionseigenschaften zur Entstehung des Glanzeindrucks beiträgt'*, ermittelt werden [329]. Aus der Praxis haben sich die Einstrahlwinkel 20° für hochglänzende Prüfkörper, 60° für überwiegend mittelglänzende Oberflächen und 85° für matte Prüfkörper bewährt [330] [331]. Zunächst wird im 60°-Winkel gemessen. Wird ein Wert über 70 ermittelt, sollte nochmals im 20°-Winkel gemessen werden. Bei einem 60°-Reflektometerwert unter 30 wird empfohlen, bei 85° erneut die reflektierte Strahlung zu bewerten.

Tabelle 39 Reflektometerwerte

Zusammensetzung	Nr. in Abb.98	Winkel	vor Alterung	nach Alterung	Differenz
PLA	1+2	20	16	18	2
		60	71	92	21
PLA + 10 wt % APP + 2 wt % NM + 1 wt % SM	2+3	60	36	26	10
		85	39	31	8
CA + 10 wt % TPP	4+5	20	14	17	3
		60	69	68	1
PLA + 25 wt % RP + 5 wt % NM+ 5 wt % SM	6+7	60	36	11	25
		85	72	18	54
PC mit Flamm- und UV-Schutz	8+9	20	172	131	41
		60	145	122	23

APP = Ammoniumpolyphosphat RP = Roter Phosphor NM= Nukleierungsmittel TPP= Triphenylphosphat
SM= Schlagzähigkeitsmodifizierer

Am meisten haben sich das hochglänzende Polycarbonat, welches viel matter geworden ist und das mittelglänzende Compound aus PLA und rotem Phosphor (RP) verändert. Die Reflektometerwerte oder auch GU (Gloss Unit) genannt, sinken hier am stärksten.

5.6.2 Freibewitterung nach DIN EN ISO 877

Die Prüfkörper werden vom 06.10.2011 bis 30.04.2013 einer direkten Bewitterung ausgesetzt. Der nach Süden ausgerichtete Freibewitterungsstand befindet sich auf dem Dach des Kollegiengebäudes KI der Universität Stuttgart, 250 m über dem Meeresspiegel. Die Prüfkörper wurden in einem 45 °-Winkel zur Horizontalen angeordnet. Während der >18 Monate dauernden Außenlagerung von 2011-2013 lag die Tiefsttemperatur bei - 13 °C (Dezember 2012) [332] und die Höchsttemperatur im Schatten bei + 35,6 °C (August 2012).

Die Polylactid-Prüfkörper wurden trüb (*Abb. 98, Nr. 2*). Der teilkristalline Kunststoff Polylactid kristallisiert vermutlich an heißen Sonnentagen nach. Dadurch sinkt die Lichtdurchlässigkeit (*Abb. 98, Nr. 2*). Das Compound aus PLA und APP wird etwas weißer (vergleiche *Abb. 98 Nr. 3 und 4*). Prüfkörper aus Polylactid und dem Flammschutzmittel roter Phosphor verändern sich innerhalb 18 Monaten Freibewitterung stark. Der Werkstoff wirkt matt und fleckig braun (*Abb. 98, Nr.8*). Das mit TPP compoundingierte Cellulose-diacetat vergilbt leicht (*Abb. 98, Nr.6*).

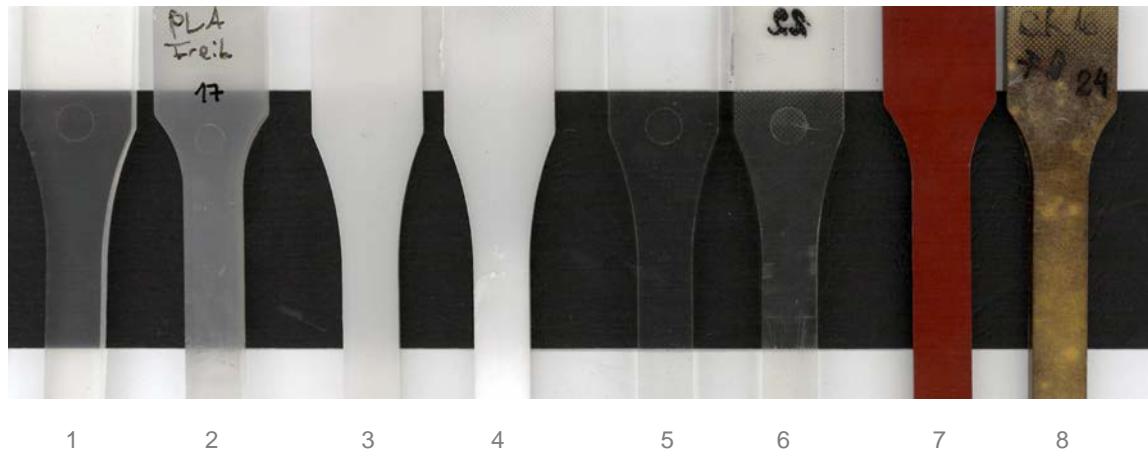


Abb. 98 Proben vor und nach >18 Monaten Freibewitterung (Probenkörperdicke 4mm)

Tabelle 40 Proben vor und nach >18 Monaten Freibewitterung nach DIN EN ISO 877:2010

Zusammensetzung	PLA	PLA + 10 wt % APP + 2 wt % NM + 1 wt % SM	CA + 10wt% TPP	PLA + 25 wt % RP + 5 wt % NM + 5 wt % SM
vor Freibewitterung	Prüfstab 1	Prüfstab 3	Prüfstab 5	Prüfstab 7
nach Freibewitterung (06.10.11-30.04.13)	Prüfstab 2	Prüfstab 4	Prüfstab 6	Prüfstab 8

5.6.3 Veränderung der mechanischen Eigenschaften nach Alterung

In der folgenden Tabelle wird vergleichend dargestellt, wie sich die Streckspannung und –Dehnung durch die künstliche und natürliche Alterung verändert hat.

Tabelle 41 Veränderung der mechanischen Eigenschaften nach künstlicher Alterung (Globalstrahlung) und Freibewitterung

Zusammensetzung	Streckspannung vor Alterung [N/mm ²]	Streckspannung nach 855h künstlicher Alterung - Globalstrahlung nach DIN EN ISO 4892-3 Zyklus 3 [N/mm ²]	Streckspannung nach >18 Monaten Freibewitterung nach DIN EN ISO 877 [N/mm ²]	Streckdehnung vor Alterung [%]	Streckdehnung nach 855h künstlicher Alterung - Globalstrahlung nach DIN EN ISO 4892-3 Zyklus 3 [%]	Streckdehnung nach >18 Monaten Freibewitterung nach DIN EN ISO 877 [%]
1 PLA	60,5	14,89	42,6	2,5	0,7	2,2
2 PLA + 25 wt % RP + 5 wt % NM + 5 wt % SM	49,2	7,3	44	2,5	0,3	2,5
3 PLA + 10 wt % APP + 2 wt % NM + 1 wt % SM	46,5	15,3	61	3,2	0,7	2,8
4 PC mit Flammenschutz und UV-Stabilisator	65	68,9	-	6	1,8	-
5 CA + 10wt% TPP	35	34,9	45	3,3	3,2	2,2

APP = Ammoniumpolyphosphat RP = Roter Phosphor NM= Nukleierungsmittel TPP= Triphenylphosphat
SM= Schlagzähigkeitsmodifizierer

Es zeigt sich, dass der biobasierte Polyester Polylactid durch die beschleunigte Alterung zur Simulation von etwa 309 Tagen Globalstrahlung am stärksten altert. Streckspannung und Streckdehnung sinken bei allen PLA-Compounds wie auch bei PLA ohne Additive rapide ab (*Tabelle 41, Zeilen 1-3*). Ähnlich verhält es sich mit Polycarbonat, einem erdölbasierten Polyester. Die Streckdehnung minimiert sich während der künstlichen Alterung von 6 % auf 1,8 % (*Tabelle 41, Zeile 4*), wohingegen die Streckspannung fast unverändert bleibt.

Beim Verbund aus Cellulosediacetat und TPP verändern sich die mechanischen Kennwerte sowohl bei der künstlichen, wie auch der natürlichen Alterung unwesentlich. Lediglich die Streckdehnung sinkt während der eineinhalbjährigen Freibewitterung um 33 %.

Die Freibewitterung zeigt, dass die mechanischen Eigenschaften nach 18 Monaten besser sind als in der künstlichen Alterung, die rund 10 Monate simuliert. Die Streckdehnung von PLA und dem Compound aus PLA und APP sinkt um je 12 %.

Die Probekörper aus PLA und rotem Phosphor bleiben hinsichtlich der Streckdehnung unverändert, wohingegen die Streckspannung um 11 % sinkt. Bei diesem Verbund ist die optische Veränderung am größten (*Abb. 98, Nr. 8*).

Bei PLA nimmt die Streckspannung um 30 % ab, beim Compound aus PLA und dem Flammenschutzmittel Ammoniumpolyphosphat (APP) steigt diese jedoch innerhalb des

Freibewitterungszeitraumes um ca. 30 % an. Dies liegt vermutlich an der Nachkristallisation durch das Nukleierungsmittel. Die Streckspannung wird bei längerer Freibewitterung auch sinken. Das Compound altert langsamer als der Verbund aus Polylactid mit dem Flammschutzmittel roter Phosphor (RP).

5.6.4 Veränderung der mechanischen Eigenschaften durch Feuchtigkeits- und Temperaturbeanspruchung

Sowohl bei der künstlichen Alterung nach DIN EN ISO 4892-3 im Zyklus 3, als auch bei der Freibewitterung nach DIN EN ISO 877 werden die Probekörper mit Globalstrahlung, Temperatur- und Feuchtewechseln belastet. Wie bereits in Kapitel 4.7.4 erläutert, wird durch eine zusätzliche Lagerung bei Feuchtigkeit und Wärme (Klimalagerung) und einer Temperaturlagerung, in beiden Fällen ohne UV-Bestrahlung, eruiert, ob die Compounds begünstigt durch Ultraviolette Strahlung, durch Temperatur bzw. Temperaturwechsel, Feuchtigkeit, Feuchtigkeitswechsel oder deren Kombination altern.

Die Ergebnisse der Zugprüfungen nach DIN EN ISO 527:2012 im Anschluss an die 16-tägige Temperaturlagerung bei 60 °C zeigen, dass Streckspannung und Streckdehnung bei fast allen Compounds ansteigen. Das Compound aus PLA und APP wird allerdings spröder, die Streckdehnung sinkt um ca. 15 %.

Diese Ergebnisse waren zu erwarten, da sowohl das teilkristalline PLA, wie auch die PLA-Compounds mit Nukleierungsmittel nachkristallisieren. Dadurch verbessert sich zunächst auch die Streckspannung, da die mechanischen Eigenschaften durch einen höheren Kristallisierungsgrad besser sind. Bei längerer Temperaturlagerung werden die Compounds spröder werden.

Die Klimalagerung demonstriert bei einer Luftfeuchtigkeit von 90 % relativer Feuchte und einer gleichbleibenden Temperatur von 60 °C, dass sich PLA und PLA-Compounds bei feuchtwarmen Bedingungen schneller abbauen als bei der Freibewitterung oder der künstlichen Alterung durch Globalstrahlung und Feuchtigkeitswechsel. Die Streckspannung und Streckdehnung von Polylactid beträgt nur noch etwa 20 % des Ausgangswertes. Die PLA-Compounds mit rotem Phosphor (RP) und Ammoniumpolyphosphat (APP) weisen nur noch ein Drittel ihrer ursprünglichen Streckdehnung auf, die Streckspannung sinkt jeweils um etwa 50 % im Vergleich zu den Ausgangswerten.

Tabelle 42 Veränderung der mechanischen Eigenschaften nach Klima- und Temperaturlagerung

Zusammensetzung	Streckspannung vor Alterung [N/mm ²]	Streckspannung nach 168h Klimalagerung bei 60°C, 90% rH [N/mm ²]	Streckspannung nach Temperaturlagerung 400h bei 60°C [N/mm ²]	Streckdehnung vor Alterung [%]	Streckdehnung nach 168h Klimalagerung bei 60°C, 90% rH [%]	Streckdehnung nach Temperaturlagerung 400h bei 60°C [%]
Polylactid (PLA)	60,5	10,8	72	2,5	0,5	3
PLA +25 wt % RP + 5 wt % NM + 5 wt % SM	49,2	16,6	50,6	2,5	0,7	2,6
PLA + 10 wt % APP + 2 wt % NM + 1 wt % SM	46,5	22,1	53	3,2	0,9	2,7

Um den hydrolytischen Abbau bei feuchtwarmen Bedingungen zu minimieren, können Hydrolyse-Stabilisatoren eingesetzt werden. Carbodiimide sind Säureblocker [333]. Sie lagern sich an Carboxygruppen des Polylactids an und minimieren somit die Reaktion der funktionellen Säuregruppen mit Wasser [334]. Hydrolyse beständige Polylactid-Typen sind bereits auf dem Markt [335].

5.6.5 Wasseraufnahme des Compounds

Für Fassadenanwendungen muss geklärt werden, wie viel Feuchtigkeit ein Werkstoff aufnimmt, da dieser auch mit einer hohen Luftfeuchtigkeit oder Regenwasser in Kontakt kommen kann.

Angelehnt an DIN EN ISO 62:2008 Kunststoffe – *Bestimmung der Wasseraufnahme* [336] wurden Probekörper unterschiedlicher Zusammensetzung zehn Tage lang in destilliertem Wasser gelagert. Die Dauer der Wasserlagerung kann willkürlich festgelegt werden.

Nach 96 und 240 Stunden wurde jeweils das Gewicht der Probekörper ermittelt, um die Wasseraufnahme zu eruieren.

Abweichend von den Vorgaben der Norm waren die Probekörper unterschiedlich groß und dick, sie wurden jedoch alle vor der Wasserlagerung gewogen. Die Waage wies wie vorgeschrieben eine maximale Fehlergrenze von $\pm 0,1$ mg auf. Der Großteil der Probekörper waren jedoch spritzgegossene Schulterstäbe mit einer Schulterbreite von 2 cm und einer Prüfkörperdicke von 4 mm. Die vorgeschriebene Dicke für die Prüfkörper ist 1 mm [337]. Weiterhin betrug die Anfangstemperatur des Wassers 23 °C, der Behälter war jedoch nicht wie vorgeschrieben mit einer Heizung ausgestattet, um die Wassertemperatur konstant zu halten [338]. Die Wassertemperatur schwankte zwischen 21 °C und 23 °C. Probekörper aus PETG, Cellulosetriacetat, Compounds aus PLA und TPP sowie

PLA und APP haben nach vier und zehn Tagen Wasserlagerung kein Wasser aufgenommen.

Probekörper des Lignin-Cellulose-Compound, sowie die Probekörper aus Polylactid mit Holzfasern wiesen nach 96 Stunden bereits einen zusätzlichen Masseanteil von 37 % und 25 % auf. Der Naturfaseranteil ist nicht bekannt, da diese Probekörper nicht selbst hergestellt wurden. Die Prüfstäbe aus Polylactid und Holzfasern wurden zugeschnitten, das bedeutet, die hygroskopischen Naturfasern die an der Schnittfläche liegen, können das Wasser direkt aufsaugen. Spritzguss-Probekörper des Lignin-Cellulosecompounds wurden nicht zugeschnitten. Alle Prüfkörper der genannten Compounds sind durch die Wasseraufnahme aufgequollen, wurden rissig und brüchig. Alle anderen Prüfkörper haben sich optisch nicht verändert (*Abb. 100 Probekörper vor und nach zehntägiger Wasserlagerung*).

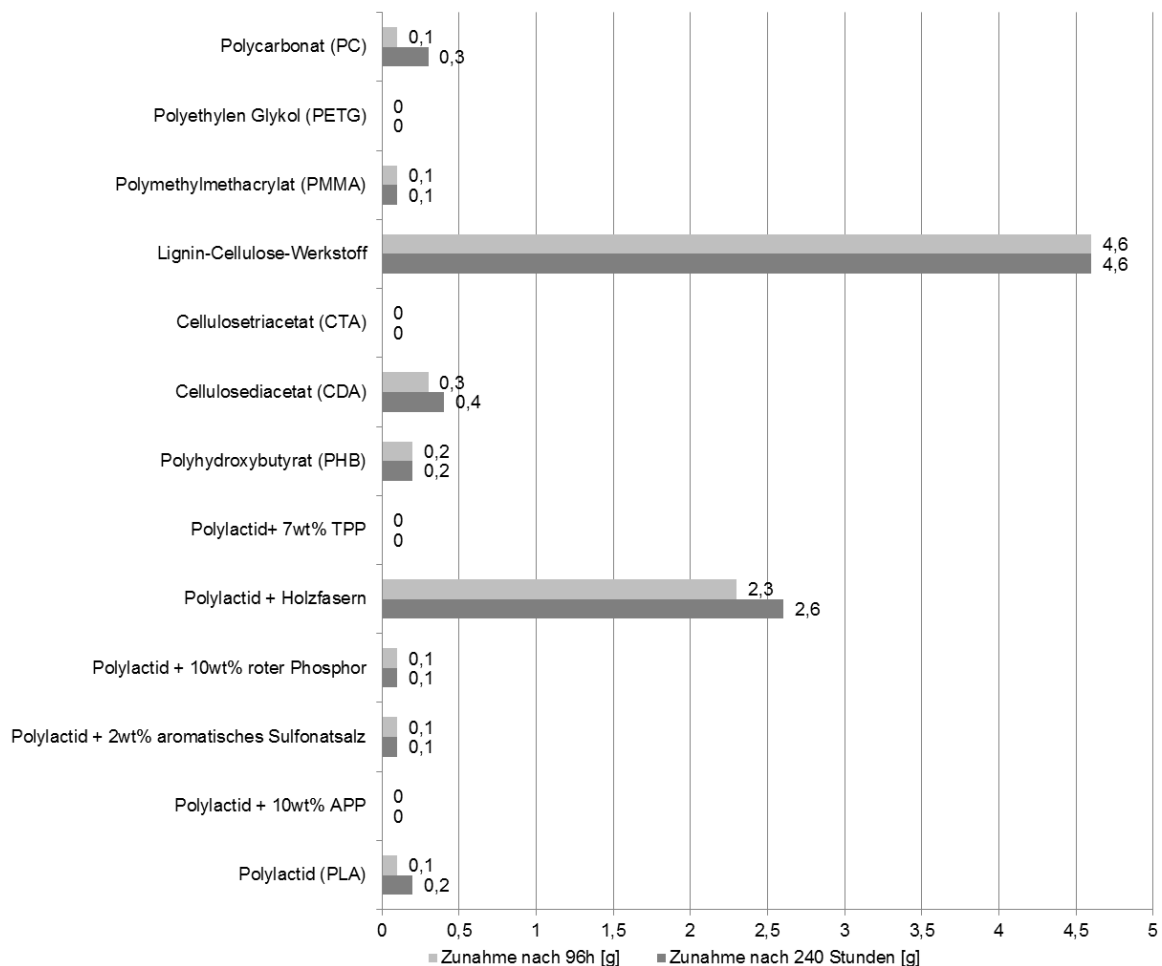


Abb. 99 Feuchtigkeitsaufnahme nach 4 (nach DIN EN ISO 62:2008) und 10 Tagen Wasserlagerung



Abb. 100 Probekörper vor und nach zehntägiger Wasserlagerung

Tabelle 43 Proben vor und nach Wasserlagerung

Zusammensetzung	PLA + Holzfasern	Lignin-Cellulose-Compound	PLA + 10 wt % APP + 2 wt % NM + 1 wt % SM	PLA + 25 wt % RP + 5 wt % NM + 5 wt % SM
vor Wasserlagerung	1	-	4	6
nach 240h Wasserlagerung	2	3	5	7

5.6.5.1 Veränderung mechanischer Eigenschaften nach Wasserlagerung

Vor Durchführung der Zugversuche nach DIN EN ISO 527:2012 wurden die Probekörper 73 Stunden in einer Wärmekammer bei 23 °C getrocknet.

Die Streckspannung und Streckdehnung von Polylactid ist nach der Wasserlagerung unwesentlich höher (Tabelle 44, Zeile 1).

Der Verbund aus Polylactid (PLA) mit dem Flammschutzmittel Ammoniumpolyphosphat (APP) zeigt nach der 240-stündigen Wasserlagerung eine um etwa 3 N/mm² höhere Streckspannung, die Streckdehnung steigt um 34 % (Tabelle 44, Zeile 2). Vermutlich kommt es hier zur Reaktion mit Wasser, wodurch die Polymerketten teilweise gespalten werden und die Beweglichkeit der Ketten vergrößert wird.

Bei Probekörpern aus PLA und rotem Phosphor sinkt die Streckspannung um 17 % und die Streckdehnung um 12 % (Tabelle 44, Zeile 3)

Die lange Wasserlagerung von zehn Tagen ist für die Baupraxis nur in so weit relevant, dass sich evtl. Regen- oder Kondenswasser in Fugen, Bohrlöchern etc. ansammelt.

Tabelle 44 Veränderung der Streckspannung und Dehnung nach Wasserlagerung (240h)

	Zusammensetzung	Streckspannung vor Alterung	Streckspannung nach 240h Wasserlagerung	Wasseraufnahme	Streckdehnung vor Alterung	Streckdehnung nach 240h Wasserlagerung
		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[%]
1	Polylactid (PLA)	60,5	62 60,7 (F Bruch)	1	2,5	2,7
2	PLA + 25 wt % RP + 5 wt % NM + 5 wt % SM	49,2	40,8	1	2,5	2,2
3	PLA + 10 wt % APP + 2 wt % NM + 1 wt % SM	46,5	49,2	0	3,2	4,3
4	PLA-Holz-Werkstoff (Keine eigene Rezeptur, fertige Prüfkörper)	42 [339]	zerbrochen	28	12,9 [318]	zerbrochen

5.7 Fazit – Auswahl eines Compounds

5.7.1 Auswahl eines Compounds zur Außenanwendung

Die Ergebnisse der Materialprüfungen, die in den Kapiteln 5.5.1 bis 5.6.5 dargestellt wurden, zeigen, dass von den untersuchten Werkstoffzusammensetzungen das Compound aus Polylactid mit dem Flammenschutzmittel Ammoniumpolyphosphat (APP) für die Außenanwendungen von Gebäuden geeignet erscheint, da es sowohl bei den Brandversuchen, der Freibewitterung und der Überprüfung der Wasseraufnahme positiv abschneidet:

- Selbstverlöschendes Brandverhalten ohne brennende Tropfen (UL 94 V-0):

Der Brand erlischt bei der ersten und der zweiten Beflammung innerhalb 0-2 Sekunden nach Wegnahme der Brandquelle. Auf Materialebene erreicht das Compound, das 10 wt % APP enthält, die Brandklasse UL 94 V-0 und ist somit schwer entflammbar. Brandversuche zur Bauteilklassifizierung müssen noch durchgeführt werden.

- Dauerhaftigkeit:

Die Streckspannung erhöht sich in über 18 Monaten Freibewitterung um 31 %, wohingegen die Streckdehnung um 12 % sinkt (*Kapitel 5.6.3*).

Nach 855 Stunden künstlicher Alterung durch Globalstrahlung, mit welcher man ca. zehn Monate Außenlagerung simuliert hat, weist das PLA-APP-Compound ohne Flammenschutz eine 78 % geringere Streckdehnung auf. Bei Polycarbonat, das sowohl Flamm-, als auch UV-Schutz enthält sinkt die Streckdehnung um 70 % (*Kapitel 5.6.3*). Die Zugabe von UV-Stabilisatoren zum PLA-APP-

Compound würde vermutlich unter gleichen Alterungsbedingungen zu einer ähnlichen Streckdehnung führen wie beim Polycarbonat, welches auch für Außenanwendungen geeignet ist.

Die gemessene Farb- und Glanzänderung ist geringer als bei Polycarbonat (vergleiche *Kapitel 5.6.1.1* und *5.6.1.2*).

- Wasseraufnahme nach DIN EN ISO 62:

Die Wasseraufnahme nach zehn Tagen Wasserlagerung bei 21-23 °C beträgt Null Prozent (*Kapitel 5.6.5*). Sowohl die Streckdehnung wie auch die Streckspannung sind gestiegen.

5.7.1.1 Wärmeformbeständigkeit des ausgewählten PLA-APP-Compounds

Die nach der ISO 75-2 [340] ermittelte Wärmeformbeständigkeit beträgt durchschnittlich 79,17 °C (HDT-B). Vor dem Spritzgießen der Prüfkörper wurde das Granulat 24 Stunden im Vakuum bei 25 °C getrocknet. Die Zugstäbe wurden nach der DIN EN ISO 3167 [341] hergestellt. Die maximale Temperatur in der Heizzone betrug dabei 220 °C. Es wurde die empfohlene Werkzeugtemperatur von 25 °C verwendet [342].

Im Anschluss wurden die Probekörper vier Minuten bei 50 °C getempert. Das im Compound enthaltene Nukleierungsmittel (siehe auch *Tabelle 45*) trägt zur schnelleren Kristallisierung des PLA-APP-Verbunds bei. Die Wärmeformbeständigkeit wäre für Außenanwendungen ausreichend, man könnte jedoch auch den Anteil des Nukleierungsmittels um 1-2 wt % erhöhen, um so eine schnellere Kristallisierung zu erzielen.

Wie im *Kapitel 4.6.4 Steuerung der Prozessführung zur Erhöhung der HDT* beschrieben, könnte man bei der Herstellung von Formkörpern durch Spritzguss auch durch Erhöhung der Werkzeugtemperatur und einer verlängerten Kühlzeit die Wärmeformbeständigkeit während des Formgebungsprozesses erhöhen.

Sollen mittels Extrusion Vollplatten für Fassadenanwendungen hergestellt werden, so könnte man diese langsam abkühlen lassen. Meist wird aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit ein Wasserbad zur Kühlung eingesetzt, damit die Prozesswärme schneller abgeleitet wird. Darauf könnte man verzichten, woraus jedoch eine geringere Produktionsmenge pro Maschinenstunde resultiert.

Die Nachbearbeitung der konventionell extrudierten Platten durch das Vakuumverformen stellt eine weitere Möglichkeit dar. So lassen sich zum einen Fassaden für frei geformte Gebäude realisieren (*Kapitel 6.2 Gestaltungsmöglichkeiten*), zum anderen erhöht sich durch die thermische Behandlung des Umformprozesses die Wärmeformbeständigkeit durch eine Nachkristallisation.

Ohne diese Maßnahmen läge die HDT-B des Verbunds bei ca. 55 °C [343].

Tabelle 45 Zusammensetzung und Wärmeformbeständigkeit des ausgewählten Compounds:

Zusammensetzung	HDT-B [°C]
PLA + 10wt% APP + 2wt% Nukleierungsmittel + 1wt% Schlagzähigkeitsmodifizierer	79,17

HDT- Verfahren B nach DIN EN ISO 75-2: Rampe 120.00 °C/h, Starttemperatur 26°C, Vorheizzeit: 300s, Belastung 0.45 MPa

5.7.1.2 Anteil nachwachsender Rohstoffe des PLA-APP Compounds

Das mit dem Flammschutzmittel Ammoniumpolyphosphat (APP) compoundierte Polylactid (PLA) basiert gemäß der in *Tabelle 45* angegebenen Zusammensetzung, zu rund 88 Gewichtsprozent auf nachwachsenden Rohstoffen. Das Nukleierungsmittel von Sukano wird als Masterbatch eingesetzt und weist einen Anteil nachwachsender Rohstoffe von etwa 85 % [344] auf. Das Flammschutzmittel wird nicht aus nachwachsenden Rohstoffen (NaWaRos) hergestellt.

5.7.1.3 Granulatkosten des PLA-APP-Compounds

Das PLA-APP-Granulat würde inklusive aller Additive ca. 4,30 Euro pro Kilogramm (ab Werk) bei einer Abnahme von etwa fünf Tonnen kosten (Stand 2011):

Für Polylactid wird derzeit ca. 2 €/ Kilogramm berechnet [345] und es ist damit in etwa zu vergleichbaren Preisen zu erwerben wie Polycarbonat [346].

Das Brandschutzadditiv Ammoniumpolyphosphat kostet bei einer Abnahmemenge von 500 Kilogramm 19 Euro pro Kilogramm [347]. Das Nukleierungsmittel wird bei einer Liefermenge von 100 Kilogramm ebenfalls mit 19 Euro pro Kilogramm berechnet [348].

In allen Versuchen wurde eine Spritzgusstype verwendet. Für die Herstellung von Vollplatten für Fassadenanwendungen müsste man eine Extrusionstype mit höherer Viskosität verwenden. Die Preise sind jedoch vergleichbar.

5.7.2 Weitere mögliche Modifikationen zur Verbesserung der Performance für Außenanwendungen

Im *Kapitel 5.7.1* wurde dargestellt, dass sich das Compound aus Polylactid, Ammoniumpolyphosphat und Nukleierungsmittel für Außenanwendungen von Gebäuden eignet. Da in *Kapitel 5* die Verbesserung des Brandverhaltens von PLA im Fokus stand, sollen hier weitere Modifikationsmöglichkeiten beschrieben werden, die Ausgang für weitergehende Versuche darstellen könnten, um beispielsweise die Wärmeformbeständigkeit oder andere folgend genannten Eigenschaften weiter zu optimieren:

- Verbesserung der Wärmeformbeständigkeit und der mechanischen Eigenschaften:

Naturfasern oder andere Füllstoffe wie Talkum wirken als Keimbildner, wodurch die Kristallisation von Polylactid beschleunigt wird. Je kristalliner der Kunststoff, desto besser ist die Wärmeformbeständigkeit und die Steifigkeit des Werkstoffs. Der Elektronikkonzern NEC Corporation konnte bereits 2006 gemeinsam mit UNITICA Ltd. in Japan ein Handy mit einem Kenaf-Kurzfasern (Abb. 103, 104) verstärkten Polylactid-Gehäuse auf den Markt bringen [349] (Abb. 102). Durch Integration von 15 Gewichtsprozent Naturfasern wurde die Wärmeformbeständigkeit von etwa 60 °C auf 100 °C erhöht. Auch das Biege E-Modul verbessert sich von ca. 4 GPa auf annähernd 8 GPa.

Möglich wäre auch die Integration bakterieller Nanocellulose (BNC). Diese wird unter Einsatz von Essigsäurebakterien in einem biotechnologischen Verfahren aus Zucker hergestellt [350]. Die Fasern weisen einen Durchmesser von etwa 10 µm auf und sind transparent. Mit einem E-Modul von 150 GPa und einer Zugfestigkeit von 10 GPa können sie Polylactid und andere (Bio)Kunststoffe verstärken [351]. Je nach Konfiguration könnten die Composite auch transparent sein. Bau-stahl erreicht im Vergleich hierzu ein E-Modul von 210 GPa und eine Zugfestigkeit von 1,28 GPa.



Abb. 101 Handygehäuse aus einem PLA-Kenaf-Verbund, N701i ECO © NEC [352]

Abb. 102 Kenaf [353]

Abb. 103 Kenaffasern [354]

Abb. 104 Film aus bakterieller Nanocellulose als künstliche Haut für die Wundversorgung [355]

Bereits längere Zeit auf dem Markt verfügbar sind Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT). Schmelzgesponnene Polylactid-Fasern, die 0,5 Gewichtsprozent mehrwandige Kohlenstoffnanoröhrchen (MWNT) enthalten, weisen einen E-Modul von 8 GPa und eine Zugfestigkeit von 175 MPa auf [356].

- Verbesserung der Schlagzähigkeit:

Bereits im Kapitel 2.5.3 *Celluloseregnerat (CR)* wurde aufgeführt, dass sich durch Zugabe von Celluloseregneratfasern die Schlagzähigkeit von Polylactid weiter ver-

bessern lässt und somit eine Alternative zu Schlagzähigkeitsmodifizieren darstellen könnte.

- Verbesserung der Dauerhaftigkeit

UV-Stabilisatoren wandeln ultraviolette Strahlung in Wärme um. Es können zum Beispiel Oxalanilide [357] und Hydroxyphenyltriazine, welche eine besonders lange Funktionsdauer aufweisen oder auch Zimtsäureester /Cinnamate eingesetzt werden. Sie absorbieren vor allem in dem für den Kunststoffabbau relevanten Spektralbereich zwischen 280 und 400 nm [358].

Wie zuvor in *Kapitel 5.6.4 Veränderung der mechanischen Eigenschaften durch Feuchtigkeits- und Temperaturbeanspruchung* beschrieben, neigt Polylactid, ein biobasierter Polyester, aufgrund seiner funktionellen Carboxylgruppen zum hydrolytischen Abbau. Hydrolyse-Stabilisatoren wie Carbodiimide blockieren diesen Vorgang [359]. Polyester, dazu gehören beispielsweise auch PET und Polycarbonat, sind generell anfällig für den hydrolytischen Abbau.

Antioxidantien und Thermostabilisatoren schützen vor autooxidativen Reaktionen, die bereits bei der Herstellung und der Formgebung wie auch während der Gebrauchsphase durch das Vorhandensein von Prozesswärme, bzw. Wärme im Allgemeinen und Sauerstoff ablaufen können [360]. In ihrer Aufgabe als Radikalfänger oder Protonen-Donatoren blockieren sie Kettenreaktionen, die zum Abbau führen [361]. Nachteilig ist jedoch, dass diese Systeme nicht dauerhaft funktionieren.

Wie vorangehend in *Kapitel 4.7.3.1 Veränderung der Eigenschaften nach Innenraumlagerung* dargelegt, altern die Compounds gleicher Rezepturen schneller, welche längere Zeit einer höheren Temperatur zur Verbesserung der Wärmeformbeständigkeit ausgesetzt waren. Die oben genannten Thermostabilisatoren würden hier für Abhilfe schaffen.

Die Stabilisatoren werden je nach Hersteller und Art des Additivs in den Dosierungen 0,1 bis 2 Gewichtsprozent hinzugefügt [362]. Deren Einsatz ist auch für erdölbasierte Kunststoffe wie beispielsweise Polyester, üblich.

6 Einsatzmöglichkeit biobasierter Kunststoffsysteme in Architekturanwendungen

6.1 Zusammenfassung aus beispielhafter Innen- und Außenanwendung und Ausblick

6.1.1 Zusammenfassung

Es wurde demonstriert, dass ein möglichst lichtdurchlässiges Akustikmodul aus biobasierten Kunststoffen, das gleichzeitig flammgeschützt ist und eine ausreichende Wärmeformbeständigkeit besitzt, herstellbar ist.

Der Rohstoffpreis für den verwendeten Biokunststoff Polylactid lässt sich zwar mit dem Granulatpreis für Polycarbonat vergleichen, doch die Maßnahmen zur Verbesserung der Wärmeformbeständigkeit führen durch längere Zykluszeiten zu einem höheren Stückpreis.

Die ohnehin geringe Wärmeformbeständigkeit (HDT-B) von PLA mit ca. 55-57°C wird durch die zusätzlich weich machende Wirkung des Flammschutzmittels weiter gesenkt.

Wie bereits im *Kapitel 4.10.2 Mögliche Lösungswege zur Realisierung des Akustikmoduls und Ausblick* aufgeführt wurde, werden in den nächsten Jahren andere biobasierte Kunststoffe auf den Markt kommen, die für die beschriebene Innenanwendung eher geeignet erscheinen. An Celluloseacetaten mit biobasierten Weichmachern wird derzeit gearbeitet, so dass der Anteil nachwachsender Rohstoffe dann etwa 20-30 % höher sein wird. Die HDT-B ist ausreichend hoch, auch die Eigenschaftsverluste durch Alterung fallen geringer aus als bei Polylactid (*Kapitel 4.7.3 Veränderung der mechanischen Eigenschaften durch künstliche und natürliche Alterung*). Der doppelt so hohe Polymerpreis könnte sich durch die fast zehnfach kürzere Taktzeit bei der Formgebung amortisieren.

Biobasiertes PVC ohne die Weichmacher DEHP und Phthalate kann aus biobasiertem Polyethylen und Chlor aus Kochsalz hergestellt werden (siehe auch *Kapitel 2.5.7 Biobasiertes Polyvinylchlorid (Bio-PVC)*). PVC ist unabhängig von der Rohstoffherkunft aufgrund des hohen Chloranteils selbstverlöschend [363]. Im Brandfall entsteht dagegen dichter Rauch sowie Salzsäure, die Verätzungen verursachen kann. Eine Anwendung im öffentlichen Innenraum ist daher nicht ratsam.

Biobasiertes Polyethylen (Bio-PE-HD) weist eine geringe Lichtdurchlässigkeit auf. Die mechanischen Eigenschaften sind im Vergleich zu PLA eher gering.

Vielversprechend hingegen erscheint biobasiertes PET, dessen Markteinführung 2016 geplant ist. Das Polyethylenfuranoat (PEF) verfügt als *Drop-In-Kunststoff* (siehe *Kapitel 2.1.1*) über gleiche oder bessere Eigenschaften wie das erdölbasierte Pendant, da die Synthesewege und das Ergebnis gleich sind. Die Wärmeformbeständigkeit (HDT-B) müsste nicht verbessert werden.

Das 2022 erwartete biobasierte „*Plexiglas*“ (PMMA) ist für die in Kapitel 4 beschriebene Anwendung ebenso interessant. Die HDT-B liegt bei etwa 94 °C [364].

Sowohl das PEF wie auch das Bio-PMMA müsste vermutlich mit geeigneten Flamm-
schutzmitteln modifiziert werden, sofern eine Anwendung im öffentlichen Innenraum der Gebäudeklassen IV und V konzipiert wird.

Bei der Modifikation eines Biokunststoffes für Fassadenplatten vorgehängter hinterlüfteter Fassaden wurde auf Materialebene ein selbstverlöschendes Compound hergestellt. Ob aus Polylactid mit dem Flammenschutzmittel APP gefertigte Halbzeuge auch auf Bauteilebene schwer entflammbar sind, muss an Versuchsaufbauten nach der DIN 4102 oder der DIN EN ISO 13501 untersucht werden.

Der Anteil nachwachsender Rohstoffe ist mit 88 Gewichtsprozent vergleichsweise hoch. Auch die Wärmeformbeständigkeit ist für Außenanwendungen ausreichend. Der Granulatpreis ist konkurrenzfähig.

Nach 18 Monaten Freibewitterung sind die Prüfkörper des PLA-APP-Compounds frei von Vergilbungserscheinungen. Die Streckspannung steigt an, die Streckdehnung reduziert sich von 3,2 % auf 2,8 %. Es müssen noch weitere Alterungstests und eine längere Freibewitterungsphase durchgeführt werden, um verlässlichere Aussagen über die Dauerhaftigkeit und somit auch die Standsicherheit treffen zu können. Hierbei gilt zu beachten, dass bisher weder Antioxidantien, noch Thermo-, UV- sowie Hydrolysestabilisatoren, wie bei konventionellen Kunststoffen für Außenanwendungen üblich, hinzugefügt wurden.

6.1.2 Ausblick

Mittlerweile sind hochtemperatur- und hydrolysebeständige [365] sowie flammgeschützte Polylactid-Typen [366]) auf dem Markt verfügbar. Welche Biokunststoffe in Zukunft vielversprechend sein werden, wurde bereits in *Kapitel 2.6 Übersicht und Vergleich ausgewählter Kunststoffe* dargestellt. Zu nennen wäre hier insbesondere das Polyethylenfuranoat (PEF) (*Kapitel 2.5.6*), Polyhydroxyalkanoate (PHA) (*Kapitel 2.5.8*) oder auch Bio-PMMA (*Kapitel 2.5.10*).

Die Einsatzmöglichkeiten biobasierter Kunststoffe hängen von den jeweiligen Anforderungen angedachter Anwendungen ab.

Polyactid (PLA) als Filament für den 3D-Druck ist bereits seit längerem eine beliebte Alternative zu ABS, da der Biokunststoff bereits bei geringeren Temperaturen schmilzt. Gleichzeitig limitiert diese Eigenschaft gewisse Anwendungen. Am Industrial Technology Research Institute (ITRI) in Taiwan wurden 2014 erstmals Polyactid-Filamente, die bis 100°C wärmeformbeständig sind, verarbeitet [367]. Dies konnte durch Zugabe von Nukleierungsmitteln für eine schnellere Kristallisation erreicht werden. So wäre das Drucken, hochtemperaturbeständiger Bauteile aus biobasierten Kunststoffen vorstellbar (Abb. 105).

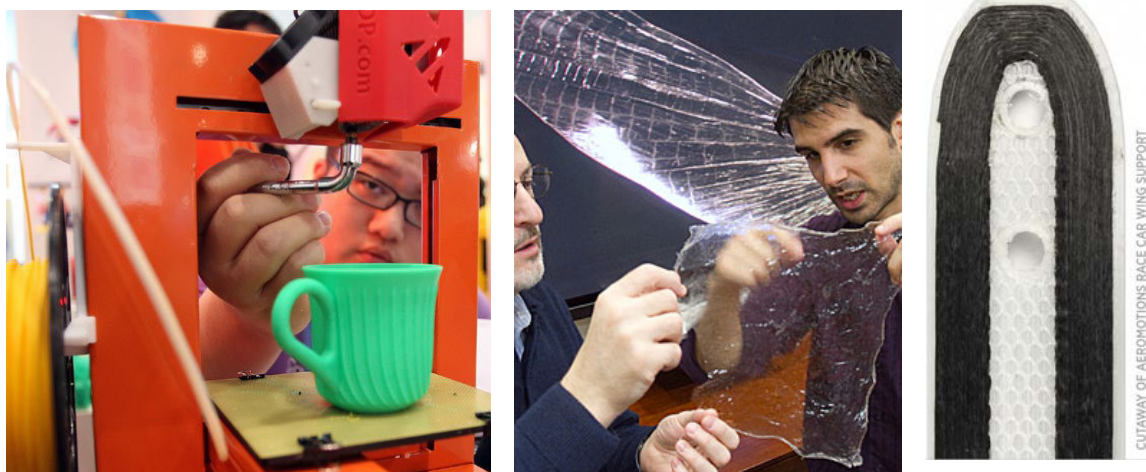


Abb. 105 Wärmebeständiges Polyactid für den 3D-Druck, ITRI/ Taiwan [368]

Abb. 106 Transparenter Verbund aus Chitin und Seidenproteinen – Shrikh © Harvard/ USA [369]

Abb. 107 Kohlefaserverstärkter Rennwagen-Flügel mit Verkleidung aus Polyamid und Wabenstruktur [370]

Harvard-Wissenschaftler des Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering haben einen Verbund aus geschichtetem Chitin, das aus Schalenresten von beispielsweise Garnelen stammt und zu den häufigsten natürlich vorkommenden Biopolymeren zählt, mit Fibroin, einem Spinnseidenprotein, entwickelt [371]. Der Verbundwerkstoff ist transparent und erreicht in etwa die Festigkeit und Zähigkeit von Aluminium bei einer ca. 50 % geringeren Dichte (Abb. 106). Entscheidend für die Eigenschaften sind die Schichtung, bzw. die Orientierung und die jeweilige Konzentration bei den Komponenten wie auch der Feuchtigkeitsgehalt. Das Composite ist flexibler, wenn es nass ist.

So könnte man beispielsweise einen Gradientenwerkstoff mit flexiblen Bereichen, die eine Gelenk- oder Klappfunktion innehaben, drucken und Bauteile herstellen, die sich etwa bei Regen oder hoher Luftfeuchtigkeit öffnen oder schließen.

Auf dem Markt existieren bereits 3D-Drucker, die in der Lage sind Carbon-, Glas-, - Nylon oder andere Spezialfasern in eine Kunststoffmatrix einzubetten (Abb. 107) [372]. Interessant wären daher elastische Fasern aus PHBV (Kapitel 2.5.8 Polyhydroxyalkanoat (PHA)), gereckte hochfeste PHB oder PLA-, wie auch Celluloseregenratfasern oder deren Kombinationen.

Im Zuge des Fabbings wäre es vorstellbar, funktionale Schichten zu drucken. So könnte man durch Beimengen von Kohlenstoffnanoröhrchen oder elektrisch leitfähige halbleitende Schichten etc. generieren und so dem 3D-Formteil ein funktionales Coating verleihen.

Ein weiteres innovatives Fertigungsverfahren stellt das tailored LFT-D-Fließpressen dar [373] [374]. In einem Direktverfahren werden Langfasern, eine thermoplastische Matrix und Additive direkt gemischt. Hierbei können auch biobasierte Fasern und Biokunststoffe verwendet werden. Das resultierende Plastifikat wird in der gleichen Maschine mittels Fließpressen zu einem Formteil verarbeitet. Gleichzeitig können die Formteile unidirektional dem Kräfteverlauf der Anwendung entsprechend lokal durch eingelegte Endlosfasern wie Naturfasergarne oder Celluloseregeneratfaser etc. verstärkt werden, wodurch hochbelastbare Bauteile, beispielsweise Fassadenmodule entstehen können.

Die Funktionsintegration bei der Formgebung durch die Struktur selbst (z. B. Mikroperforation) oder durch die Zugabe von Pigmenten, Fasern etc. wird auch zur Abgrenzung von natürlich vorkommenden Werkstoffen wie Holz oder Strohplatten beitragen.

Die Kombination innovativer Fertigungsverfahren mit marktfähigen biobasierten Kunststoffen und Fasern ermöglicht in naher Zukunft die Realisierung maßgeschneiderter High-Tech-Bauteile aus Biomassereststoffen.

6.2 Gestaltungsmöglichkeiten

Biokunststoffe vereinen die Vorteile von Kunststoffen, genannt sei hier die Formbarkeit, mit denen von natürlich vorkommenden Werkstoffen, die besonders ressourceneffizient und nachhaltig sind. Biobasierte Kunststoffe lassen sich mittels Spritzgießen, Tiefziehen, Schmelzspinnen etc. in unterschiedlichste Formen und Erscheinungen bringen.

Im Vergleich zu Holz können aus biobasierten Kunststoffen auch lichtdurchlässige Bauteile hergestellt werden. Bei der Bauteilkonzeption erscheint es daher sinnvoll, diese Vorzüge zu fokussieren, um Alleinstellungsmerkmale zu generieren.

- Transparente und transluzente Bauteile

Polylactid, Celluloseregenerat, Biobasiertes PET (PEF), Bio-PMMA und andere biobasierte Kunststoffe können zu Vollplatten, Formteilen, Hohlkammer- oder Sandwichplatten verarbeitet werden. Getrocknete Naturfasern oder andere Pflanzenbestandteile lassen sich zur Gestaltungsvielfalt integrieren.

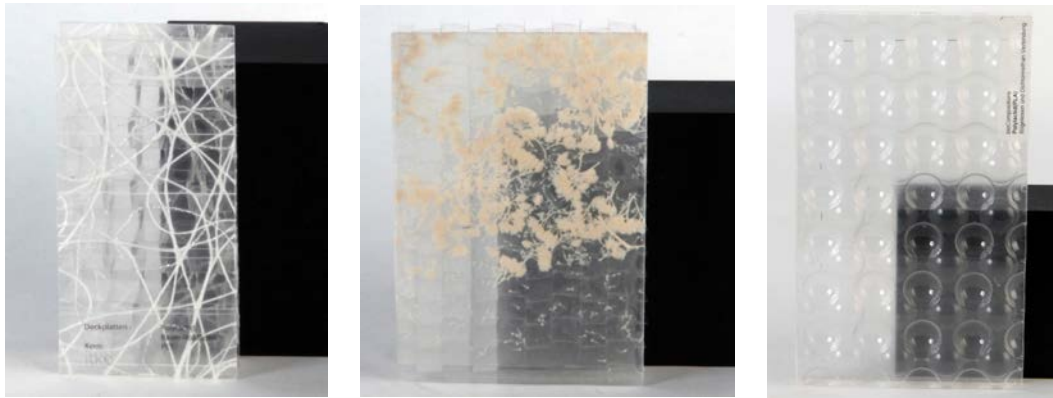


Abb. 108 Sandwichplatte mit thermogepressten Deckschichten aus Polylactid mit Naturfaserinlays

Abb. 109 Sandwichplatte mit thermogepressten Deckschichten aus Polylactid mit Blüteninlays

Abb. 110 Sandwichplatte aus PLA, Seminar biocompositions SS 09 © Seung Yong Byeon

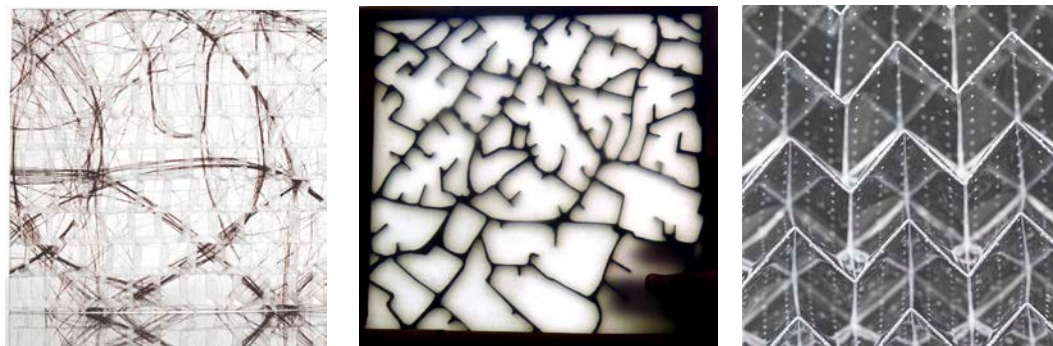


Abb. 111 Sandwichplatte mit thermogepressten Deckschichten aus Polylactid mit Naturfaserinlays

Abb. 112 Sandwichplatte aus PLA und Bioharz, Seminar biocompositions SS 99 © J. Petersmann

Abb. 113 Gefalteter Kern aus mikroperforierter Polylactidfolie ©Foldcore

Abb. 112 zeigt eine Sandwichplatte mit thermogepressten Deckschichten aus Polylactid und einer Gießstruktur aus Bioharz. Die aus jeweils drei PLA-Folienstücke gepressten Deckplatten wurden langsam in der Laminierpresse abgekühlt, um das Nachkristallisieren für eine transluzente Optik zu erreichen.

Der Sandwichkern aus mikroperforierten Polylactidfolien (Abb. 113) für transparente Akustikmodule wurde mit freundlicher Unterstützung der Firma Foldcore gefaltet. Die schalldämpfende Funktion wurde hier durch die Formgebung in das Bauteil integriert.

- Opake Bauteile

Den Gestaltungsmöglichkeiten bei opaken Bauteilen sind kaum Grenzen gesetzt. Es lassen sich Papiere, getrocknete Blätter, Naturfasern etc. integrieren. Farbmasterbatches für Biokunststoffe ermöglichen das Einfärben in beliebigen Farben. Weiterhin lassen sich gedruckte Dekorfolien auf die Oberflächen laminieren.

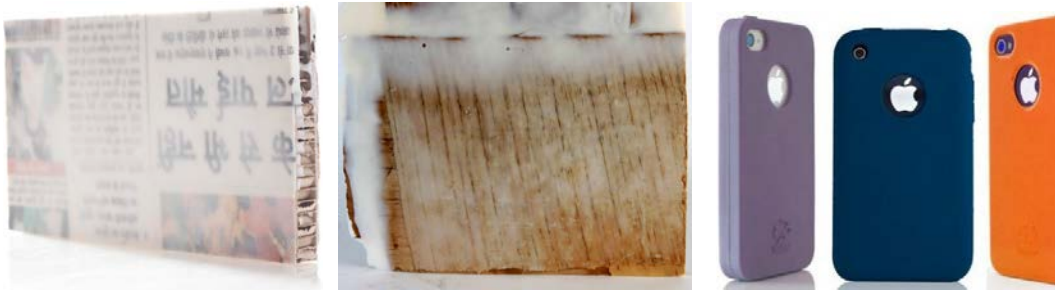


Abb. 114 Sandwichplatte mit transluzenter PHB-Deckschicht, Zeitungspapier und Pappkern

Abb. 115 Sandwichplatte mit transluzenter PHB-Deckschicht und Bananenblättern

Abb. 116 iPhone Case aus PLA demonstriert Gestaltungsmöglichkeiten hinsichtlich Farbe [375]

- Formteile zur Materialisierung von Freiformflächen durch Tiefziehen von Halbzeugen (Vollplatten)

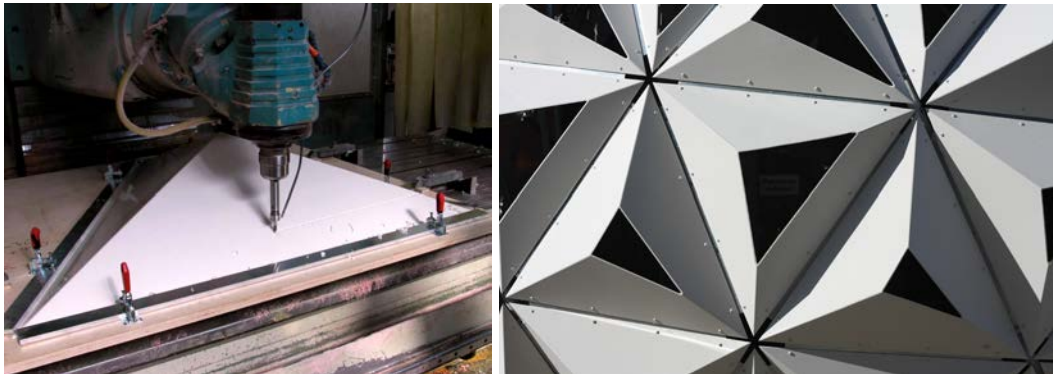


Abb. 117 Konturfräsen eines Pyramidenformteils aus Biokunststoff Bild© BAUER THERMOFORMING

Abb. 118 Ausschnitt Fassaden-Mock-Up ArboSkin aus Biokunststoffen Bild© Manfred R. Hammer/ITKE

Anhand des im Oktober 2013 realisierten Mock-Ups *ArboSkin*, im Rahmen des EFRE-Forschungsprojektes 'Biokunststoff-Fassade', konnte gezeigt werden, dass ein bis zwei unterschiedlich große pyramidale Werkzeuge ausreichen, um eine Freiformfläche mit über 380 unterschiedlichen Fassadenformteilen zu bestücken [376]. Üblicherweise sind bei der Realisierung von Freiformflächen meist so viele unterschiedliche Werkzeugformen relevant, wie ungleiche Formteile benötigt werden. Von der Firma Tecnaro modifiziertes Arboblend® wurde zu Platten extrudiert und anschließend zu Pyramiden tiefgezogen.

Die ohnehin notwendige Nachbearbeitung durch CNC-Fräsen zur Entfernung des Tiefziehrandes (Abb. 119) ermöglicht unzählige Formteilvariationen, indem gleiche Tiefziehformteile durch unterschiedliche Fräspfade ungleich beschnitten werden. Dabei fällt viel Plattenmaterial an, das jedoch wieder granuliert und der Plattenextrusion als Mahlgut zugefügt werden kann (Abb. 120, Abb. 121).



Abb. 119 Pyramidenformteil aus ArboBlend® mit Tiefziehrand Bild © BAUER THERMOFORMING

Abb. 120 Plattenabfälle durch das Konturfräsen Bild© Bauer Thermoforming

Abb. 121 Regranulierung der Plattenabfälle aus ArboBlend® Bild © Tecnar



Abb. 122 Fassaden-Mock-Up ArboSkin aus Biokunststoffen Bild © Manfred R. Hammer/ ITKE

Aufgrund seiner Innovationskraft erhielt das Forschungsprojekt 'Biokunststoff-Fassade', welches von der Autorin konzipiert wurde, im Jahr 2013 eine Auszeichnung von der Initiative Deutschland - Land der Ideen.

Polypropylen, das mit dem Flammenschutzmittel Ammoniumpolyphosphat (APP) compoundiert wurde, kann beispielsweise bis zu acht Mal recycelt werden. Die Brandklasse, Farbe und die Viskosität bleiben davon unberührt [377]. Das in dieser Arbeit entwickelte Compound für Außenanwendungen mit dem Flammenschutzmittel APP könnte auf gleiche Weise, wie soeben beschrieben, verarbeitet werden.

- Weiterbearbeitung von Halbzeugen oder Formteilen durch CNC-Fräsen zur Realisierung von offenen Strukturen und/ oder hinterleuchteten Bauteilen

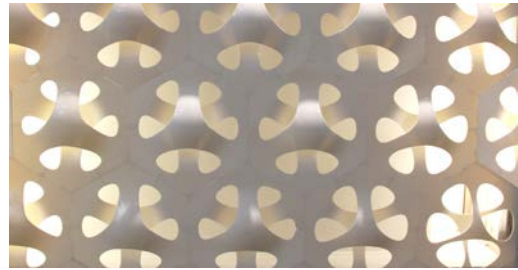
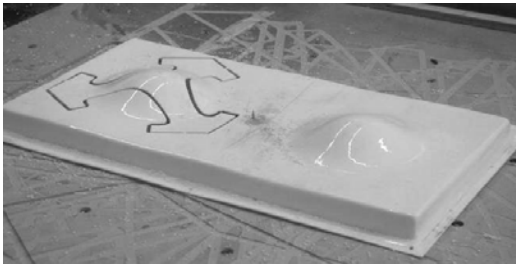


Abb. 123 Biokunststoff-Formteil mit gefrästem Element © P. Siedler/ITKE

Abb. 124 Hinterleuchtete Wand aus CNC-gefrästen Biokunststoff-Elementen © ITKE [378]

Für Abb. 123 und Abb. 124 gelten gleiche Arbeitsschritte, wie vorangehend beschrieben. Die unterschiedlich bearbeiteten Formteile wurden verschweißt und als Vorderwand der Ausstellungstheke auf der Hannover Messe 2013 im Rahmen der Industrial GreenTech eingesetzt.



Abb. 125 Messestand des Konsortiums 'Biokunststoff-Fassade' auf dem Gemeinschaftsstand von Baden-Württemberg auf der Industrial GreenTech der Hannover Messe 2013 Bild © Manfred R. Hammer/ ITKE

Bei der Biokunststoffplatte in der folgenden Abbildung wurde auf der Rückseite des Halbzeugs durch das CNC Fräsen partiell Kunststoff abgetragen und ist somit an manchen Stellen aufgrund der geringeren Materialstärke lichtdurchlässiger. Die unterschiedlichen Lichteffekte der Abb. 127 rühren vom Hinterleuchten der Fassadenformteile, die als Kegel konzipiert wurden.

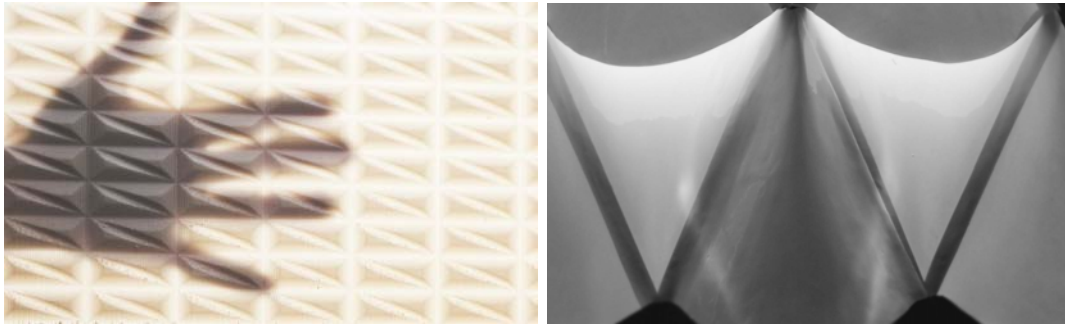


Abb. 126 CNC gefräste, hinterleuchtete Biokunststoffplatte, Seminar biocompositions SS 99 [379]

Abb. 127 Tiefgezogene Fassadenmodule, Seminar biomaterialise WS 10/11 [380]

- Oberflächenstrukturen durch Tiefziehen von Halbzeugen (Vollplatten)



Abb. 128 Tiefgezogene Oberflächenstrukturen auf Biokunststoffplatte [381]

Integration von Oberflächenstrukturen oder Schriftzüge lassen sich durch das Vakuumverformen umsetzen. Matte Oberflächen lassen sich durch das Sandstrahlen des Tiefziehwerkzeuges realisieren. Je nach gewünschter Oberfläche müssen Positiv- oder Negativwerkzeuge gewählt werden.

- Integration von Funktionen durch die Form oder Zugabe weiterer Komponenten
Das in einer Lehrveranstaltung konzipierte Verschattungsmodul für Museen entsteht durch Lasern zwei Millimeter dicker Folien aus einem flexiblen PLA-PHBV-Blend (Abb. 129)

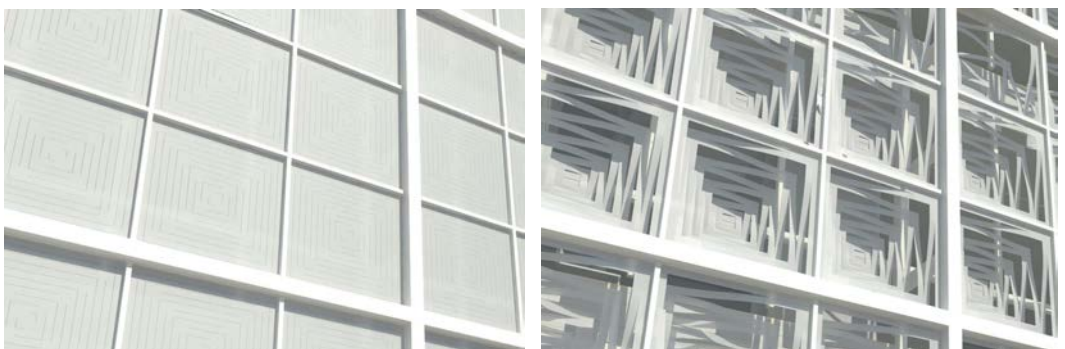


Abb. 129 Verschattungsmodul, Seminararbeit Sustainable Composites WS 09/10 [382]

Die mit Moos bestückten Fassadenformteile aus ressourceneffizienten Biokunststoffen demonstrieren eine Anwendungsmöglichkeit thermoverformbarer Halbzeuge auf Basis nachwachsender Rohstoffe. Das dreidimensionale Element sieht Vertiefungen für das Moos vor und entsteht durch das Vakuumverformen einer Platte. Beim Umformprozess kann an definierten Stellen eine Oberflächenstruktur realisiert werden, die einen Haftgrund für Moosvliese bildet. Das Moos nimmt Feinstaub aus Autoabgasen als Dünger auf.



Abb. 130 Demonstrator Moos-Fassade Hannover Messe 2013, Formteil aus Arboblend® [383]

Abb. 131 Einzelnes Moos-Modul, Entwurfsarbeit push the envelope WS 12/13 © Yordan Domuzov

Abb. 132 Demonstrator Moos-Fassade Hannover Messe 2013, Formteil aus Arboblend® [362]



Abb. 133 Messestand des Konsortiums 'Biokunststoff-Fassade auf dem Gemeinschaftsstand von Baden-Württemberg auf der Industrial GreenTech (Hannover 2013) Bild © Manfred R. Hammer/ITKE

Die dargestellten Beispiele hinsichtlich Farbe, Form, Struktur oder Funktion sind Optionen für unzählige Gestaltungsmöglichkeiten, die sich mit (biobasierten) Kunststoffen bieten.

Anhang

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift

A.1 Abbildungsverzeichnis

Alle Abbildungen ohne Quellenverzeichnis im Text wurden von der Autorin erstellt.

<i>Abb. 1 Flasche aus kompostierbarem Kunststoff</i>	
<i>Abb. 2 Gyy Netbook von iUnika, Gehäuse aus biobasiertem Kunststoff</i>	<i>19</i>
<i>Abb. 3 Rohstoffherkunft und biologische Abbaubarkeit ausgewählter Biokunststoffe</i>	<i>19</i>
<i>Abb. 4 Weltweite Produktionskapazitäten für Biokunststoffe</i>	
<i>Abb. 5 Weltweite Produktionskapazitäten für Biokunststoffe nach Materialtyp im Jahr 2017</i>	<i>20</i>
<i>Abb. 6 Biobasierte Kunststoffe aus Nachwachsenden Rohstoffen</i>	<i>23</i>
<i>Abb. 7 Organosolv-Lignin nach Fällung und Filtration auf der Filterpresse © Fraunhofer CBP</i>	
<i>Abb. 8 Wandbekleidung aus Lignin: Kokosnuss-Mosaik Ekobe © reformafacil/ brasil</i>	<i>23</i>
<i>Abb. 9 Schutzscheibe aus Cellulose-Acetat</i>	
<i>Abb. 10 PC-Maus mit einen biobasierten Werkstoffanteil von 45% -Fujitsu M440 ECO © Fujitsu</i>	
<i>Abb. 11 NeCycle™ , Celluloseacetat aus Cashewnuss-Schalen © NEC Corporation</i>	<i>24</i>
<i>Abb. 12 Endlos-Cellulosereneratfasern © ITCF Denkendorf</i>	
<i>Abb. 13 Folien aus Cellulosehydrat – Verpackung aus Cellophan®.....</i>	<i>26</i>
<i>Abb. 14 Wasserflasche aus Polylactid © Biota</i>	
<i>Abb. 15 Touch Screen-Gehäuse der Firma Kuender/ Taiwan aus Polylactid © Corbion Purac</i>	
<i>Abb. 16 Autositzbezug aus Polylactid-Gewebe für den Mazda Premacy Hydrogen RE Hybrid © Tejin.....</i>	<i>27</i>
<i>Abb. 17 Intrazelluläre Einlagerung von PHA in Bakterienzellen © Metabolix</i>	
<i>Abb. 18 Biologisch abbaubares Zelt aus PHA – One Nights Stand © Straw Dog B.V.</i>	
<i>Abb. 19 Stehlampe aus PHA - Miss Sissi bio-on Lamp von Philippe Starck</i>	<i>30</i>
<i>Abb. 20 Biobasiertes Polycarbonat – Granulat ©Mitsubishi Chemical Corporation</i>	
<i>Abb. 21 Durabio™ (links) zeigt keine Newtonsche Ringe(Polarisationseffekte) im Vergleich zu herkömmlichem Polycarbonat (rechts) ©Mitsubishi Chemical Corporation.....</i>	<i>32</i>
<i>Abb. 22 Rossoacoustic CP 30 Raumteiler aus Sandwichplatten mit mikroperforierter Deckschicht © Nimbus</i>	
<i>Abb. 23 Clear-PEP® Color - Farbige Sandwichplatten aus Polycarbonat © Design Composite</i>	<i>57</i>
<i>Abb. 24 und Abb. 25 MARVEL BIORESIN® - Biokunstglasplatten aus Polylactid © Marvel GmbH</i>	
<i>Abb. 26 ThermHex von EconCore- Wabenplatten aus Polylactid © EconCore N.V./ Belgium..</i>	<i>57</i>
<i>Abb. 27 Moniflex von Isoflex AB - TWD aus Cellulosediacetat © Isoflex AB/ Schweden</i>	
<i>Abb. 28 TiMax® CA – TWD aus Celluloseetriacetat © Wacotech GmbH & Co. KG</i>	
<i>Abb. 29 Biotex Flachs/ PLA - Prepreg aus Flachsgewebe und PLA © Netcomposites</i>	
<i>Abb. 30 Re-Y-Stone® von Resopal - Platten aus Zuckerrohr-Harz und Altpapier © Dekodur ..</i>	<i>58</i>
<i>Abb. 31 Biofliese aus Leinölepoxid, Naturfasern und Mehl fossiler Kieselalgen ©Fraunhofer IWM</i>	
<i>Abb. 32 Kokoboard – gepresstes Reisstroh mit Ligninmatrix, Bibliothek Ubon Ratchathani, Thailand</i>	
<i>Abb. 33 Wandbekleidungen aus gepresster Bambuspulpe ©3DWalldekor/ Niederlande</i>	<i>59</i>
<i>Abb. 34 Akustikplatte zur flexiblen Raumgliederung – rossoacoustic® © nimbus</i>	
<i>Abb. 35 Rossoacoustic CP 30, Transluzent matt © nimbus</i>	
<i>Abb. 36 Prinzipskizze Aufbau der Akustikplatte als Wabenplatte mit mikroperforierter Deckschicht © nimbus</i>	<i>63</i>

Abb. 37 Tiefgezogenes Formteil aus PLA mit Werkzeug, Seminar biocompositions SS 09 Stefan Schädel © Foto Pixelcatcher	
Abb. 38 Falzkern aus perforierten PLA-Folien, Herstellung durch Foldcore © Foto Pixelcatcher	
Abb. 39 Tiefziehversuch mit einer Cellulosetriacetatfolie © Foto Pixelcatcher	64
Abb. 40 Perforierte und kaschierte Folie nach dem Tiefziehversuch © Foto: Pixelcatcher	
Abb. 41 Wabenplatte aus Cellulosediacetat – Seminarergebnis ITKE Biocompositions SS 09 © S. Ischka.....	64
Abb. 42 Hohlkammer-Sandwichkern aus PLA (Twin-Sheet), Herstellung: Hombach KT © Foto: Pixelcatcher	
Abb. 43 Sandwichkern aus PLA, Herstellung: Firma Koziol ©Foto: Pixelcatcher	
Abb. 44 Schaumkern aus duroplastischem Bioharz, ITKE.....	65
Abb. 45 Spritzguss-Konzeptmodell für die Halbschale des Akustik-Moduls © Nimbus Group	
Abb. 46 3D-Druck: Aus zwei Halbschalen zusammengestecktes Akustikmodul, Nimbus © Foto: Pixelcatcher.....	66
Abb. 47 Vortrocknen der Additive Abb. 48 Biokunststoffstrang nach dem Compoundieren, Abkühlen im Wasserbad vor dem Granulieren Abb. 49 Säcke mit Granulat verschiedener Rezepturen.....	73
Abb. 50 Auswirkung von TPP und weiteren Additiven auf die Lichtdurchlässigkeit von PLA und CA (Stabdicke 4mm).....	75
Abb. 51 Auswirkung von Nukleierungsmittel und Schlagzähigkeitsmodifizierer auf die Transparenz (Plattendicke 2mm).....	75
Abb. 52 Probekörper nach den Vertikalbrennprüfungen nach UL94 (Dicke der Probekörper 4mm)	79
Abb. 53 Auswirkung von APP und weiteren Additiven auf die Lichtdurchlässigkeit von PLA (Dicke der Probekörper 4mm).....	80
Abb. 54 Auswirkung von Kalium-Diphenyl-Sulfon-Sulfonat und weiteren Additiven auf die Lichtdurchlässigkeit von PLA (Dicke der Probekörper 4mm)	82
Abb. 55 Darstellung unterschiedlicher Transparenzgrade: mit Flammschutzmitteln modifiziertes Polylactid	82
Abb. 56 Geringere Lichtdurchlässigkeit der Proben mit verbesserter Wärmeformbeständigkeit (Plattendicke 2mm).....	88
Abb. 57 Transparenzgrad nachkristallisierter Platten (Plattendicke 2mm)	89
Abb. 58 Nachkristallisierung: Ansichtsplatte aus Polylactid vor und nach der 18-monatigen Alterung (Plattendicke 2mm).....	91
Abb. 59 Nachkristallisierung: Lichtdurchlässigkeit der Prüfstäbe nach Wärmelagerung (Tempern) (Dicke Probekörper 4mm).....	91
Abb. 60 Verzug beim Tempern ohne Tempervorrichtung (120-240 Minuten bei 75-100 °C getempert)(Plattendicke 2mm).....	93
Abb. 61 Transparenz im Vergleich: Längere Kühlzeit oder nachträgliches Tempern (Probekörperdicke 4mm)	94
Abb. 62 Probekörper vor und nach 341 Stunden Globalstrahlung hinter Fensterglas.....	96
Abb. 63 PLA-TPP-Compound nach 1024 Stunden Globalstrahlung hinter Fensterglas - Probekörperdicke 4 mm (1+2) und 2 mm (3+4).....	96
Abb. 64 Grundformel zur Berechnung der Prüfzeit bei künstlicher Alterung	97
Abb. 65 Probekörper vor und nach Freibewitterung (Probekörperdicke 4mm).....	98
Abb. 66 Probekörper nach 33 Monaten im Innenraum gelagert (Probekörperdicke 4mm).....	101
Abb. 67 Veränderung der Streckdehnung und Streckspannung nach Temperatur- und Klimalagerung	104
Abb. 68 Sprödbbruch bei Zugversuch: PLA und PLA-Compound mit 3 wt % Schlagzähigkeitsmodifizierer (Probekörperdicke 4mm).....	105
Abb. 69 Links: Polylactid mit Gelbstich, Mitte: PLA-Flammschutz-Compound mit 0,5 wt% optischem Aufheller (Granulat rechts) (Plattendicke 2mm)	106
Abb. 70 PLA und PLA-Compounds mit optischem Aufheller (Probekörperdicke 4mm).....	107

Abb. 71 Rossoacoustic CP 30 – Transluzent mattes Akustikelement von Nimbus Group]	
Abb. 72 Biobasiertes Akustikmodul, Rendering zum gewünschtem Transluzenzgrad,©Nimbus Group	107
Abb. 73 Projektergebnis – prototypische, transluzente Akustik-Deckplatte aus modifiziertem PLA (2,5mm dicke Spritzgussplatte)	
Abb. 74 Demonstrierte Lichtdurchlässigkeit des prototypischen Akustikmoduls: 2 Akustik-Deckplatten (Plattendicke je 2,5 mm) liegen mit einem Abstand von 5 cm übereinander	108
Abb. 75 DIN-Label zur Kennzeichnung von Produkten mit einem biobasierten Anteil über 85 %	
Abb. 76 VINÇOTTE-Siegel für Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen.....	110
Abb. 77 Anwendungsstudie des biobasierten Akustik Moduls als Raumgliederungselement © Nimbus Group	112
Abb. 78 PMMA Fassade: Wasserturm von Deubzer König & Rimmel; ©A. Heddergott/TU München	
Abb. 79 Polycarbonat Fassade: Parasite office in Moscow, za bor Architects; ©Peter Zaytsev	
Abb. 80 PETG Fassade Modepark Röther Augsburg; © Lamilux	114
Abb. 81 Reishülsen als Hauptbestandteil der Fassadenprofile von Resysta ©Resysta	
Abb. 82 Fassadenschindeln aus Lignin freiem Holz-Kunststoff-Verbund der Firma UPM, Finnischer Pavillon auf der World Expo Shanghai 2010 ©Lucas Schifres/ Finpro	
Abb. 83 Ornamentale Fassadenbekleidung aus Mandelschalen und duroplastischem Harz © Duralmond.....	115
Abb. 84 Bioharz-Hanf-Verbund für die Fassade einer Gasempfangsstation © Studio Marco Vermeulen	
Abb. 85 Fassadenmodul mit einer Bekleidung aus einem © Fiber-Tech	
Abb. 86 Anwendungsstudie des EU Projektes Biobuild © Arup.....	116
Abb. 87 PLA-Lignin-Cellulose-Compound vor (Nr.1) und nach 18 Monaten Freibewitterung (Nr.2)	
Abb. 88 PLA-Lignin-Cellulose-Compound nach 18 Monaten Freibewitterung, Platte 3mm dick (Nr.3)	
Abb. 89 Polylactid vor (Nr. 4) und nach 38 Monaten Freibewitterung (Nr. 5).....	118
Abb. 90 Ergebnis der Compoundierungsversuche aus Polylactid mit rotem Phosphor vor und nach Brandversuchen	
Abb. 91 Nebuta Museum in Aomori/ Japan © S.Forsythe / molo design	
Abb. 92 Wohnhaus im Weinberg	121
Abb. 93 Ergebnis der Compoundierungsversuche aus Polylactid mit expandierbarem Graphit vor und nach Brandversuchen	
Abb. 94 Schieferfassade Schulzentrum Ailingen, Hildebrand + Schwarz © Baunetzwissen	
Abb. 95 Schwarze Klinkerfassade – Institut Hochspannungstechnik TU München, Hild und K. ©Foto: M. Heinrich	122
Abb. 96 Prüfstäbe nach den Brandprüfungen nach UL94-V (Probekörperdicke 4mm)	122
Abb. 97 Proben vor und nach künstlicher Bewitterung nach DIN EN ISO 4892-3; Verf. A, Zyklus 3.....	126
Abb. 98 Proben vor und nach >18 Monaten Freibewitterung (Probekörperdicke 4mm).....	128
Abb. 99 Feuchtigkeitsaufnahme nach 4 (nach DIN EN ISO 62) und 10 Tagen Wasserlagerung.....	132
Abb. 100 Probekörper vor und nach zehntägiger Wasserlagerung	133
Abb. 101 Handygehäuse aus einem PLA-Kenaf-Verbund, N701i ECO © NEC	
Abb. 102 Kenaf	
Abb. 103 Kenaffasern	
Abb. 104 Film aus bakterieller Nanocellulose als künstliche Haut für die Wundversorgung ...	137
Abb. 105 Wärmebeständiges Polylactid für den 3D-Druck, ITRI/ Taiwan	

Abb. 106 Transparenter Verbund aus Chitin und Seidenproteinen – Shrilk © Harvard/ USA	
Abb. 107 Kohlefaserverstärkter Rennwagen-Flügel mit Verkleidung aus Polyamid und Wabenstruktur	141
Abb. 108 Sandwichplatte mit thermogepressten Deckschichten aus Polylactid mit Naturfaserinlays	
Abb. 109 Sandwichplatte mit thermogepressten Deckschichten aus Polylactid mit Blüteninlays	
Abb. 110 Sandwichplatte aus PLA, Seminar biocompositions SS 09 © Seung Yong Byeon .	143
Abb. 111 Sandwichplatte mit thermogepressten Deckschichten aus Polylactid mit Naturfaserinlays	
Abb. 112 Sandwichplatte aus PLA und Bioharz, Seminar biocompositions SS 99 © J. Petersmann	
Abb. 113 Gefalteter Kern aus mikroperforierter Polylactidfolie ©Foldcore	143
Abb. 114 Sandwichplatte mit transluzenter PHB-Deckschicht, Zeitungspapier und Pappekern	
Abb. 115 Sandwichplatte mit transluzenter PHB-Deckschicht und Bananenblättern	
Abb. 116 iPhone Case aus PLA demonstriert Gestaltungsmöglichkeiten hinsichtlich Farbe ..	144
Abb. 117 Konturfräsen eines Pyramidenformteils aus Biokunststoff Bild© BAUER THERMOFORMING	
Abb. 118 Ausschnitt Fassaden-Mock-Up ArboSkin aus Biokunststoffen Bild© Manfred R. Hammer/ITKE.....	144
Abb. 119 Pyramidenformteil aus Arboblend® mit Tiefziehrand Bild© BAUER THERMOFORMING	
Abb. 120 Plattenabfälle durch das Konturfräsen Bild© Bauer Thermoforming	
Abb. 121 Regranulierung der Plattenabfälle aus Arboblend® Bild© Tecnar.....	145
Abb. 122 Fassaden-Mock-Up ArboSkin aus Biokunststoffen Bild© Manfred R. Hammer/ITKE	145
Abb. 123 Biokunststoff-Formteil mit gefrästem Element © P. Siedler	
Abb. 124 Hinterleuchtete Wand aus CNC gefrästen Biokunststoff-Elementen © ITKE	146
Abb. 125 Messestand des Konsortiums 'Biokunststoff-Fassade auf dem Gemeinschaftsstand von Baden-Württemberg auf der Industrial GreenTech der Hannover Messe 2013 Bild© Manfred R.Hammer/ ITKE.....	146
Abb. 126 CNC gefräste, hinterleuchtete Biokunststoffplatte, Seminar biocompositions SS 99	
Abb. 127 Tiefgezogene Fassadenmodule, Seminar biomaterialise WS 10/11	147
Abb. 128 Tiefgezogene Oberflächenstrukturen auf Biokunststoffplatte	147
Abb. 129 Verschattungsmodul, Seminararbeit Sustainable Composites WS 09/10	147
Abb. 130 Demonstrator Moos-Fassade Hannover Messe 2013, Formteil aus Arboblend	
Abb. 131 Einzelnes Moos-Modul, Entwurfsarbeit push the envelope WS 12/13 © Yordan Domuzov	
Abb. 132 Demonstrator Moos-Fassade Hannover Messe 2013, Formteil aus Arboblend ®....	148
Abb. 133 Messestand des Konsortiums 'Biokunststoff-Fassade auf dem Gemeinschaftsstand von Baden-Württemberg auf der Industrial GreenTech (Hannover 2013) Bild© Manfred R. Hammer/ ITKE.....	148

A.2 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1 Übersicht Herstellungsverfahren biobasierter Kunststoffe</i>	22
<i>Tabelle 2 Übersicht und Vergleich ausgewählter biobasierter Kunststoffe mit PC und PMMA</i> ..	34
<i>Tabelle 3 Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen bei der Herstellung von biobasierten Kunststoffen (hellgrau) und erdölbasierten Kunststoffen (dunkelgrau)</i>	35
<i>Tabelle 4 Brennwerte von petrochemischen Kunststoffen im Vergleich zu biobasierten Kunststoffen</i>	37
<i>Tabelle 5 Brandschutzanforderungen unterschiedlicher Gebäudeklassen nach MBO</i>	41
<i>Tabelle 6 Gegenüberstellung Baustoff- und Brandklassenormen auf Material und Bauteilebene</i>	43
<i>Tabelle 7 Brandklassen nach UL 94 V</i>	45
<i>Tabelle 8 Regelwerke, die Bekleidungen und Wandelemente im Innen- Außenraum umfassen</i>	46
<i>Tabelle 9 Abgabe gefährlicher Substanzen nach der Norm EN 12149 ‚Wandbekleidung in Rollen- und Plattenform‘ Bestimmung der Migration von Schwermetallen und bestimmten anderen extrahierbaren Elementen, des Gehaltes an Vinylchlorid-Monomer sowie der Formaldehydabgabe‘</i>	48
<i>Tabelle 10 Anforderungen an das Brandverhalten bei Innen- und Außenanwendung unterschiedlicher Bauteile</i>	53
<i>Tabelle 11 Weitere Materialanforderungen bei Innen- und Außenanwendung</i>	54
<i>Tabelle 12 Für Innenraumanwendungen zu optimierende Eigenschaften von Polylactid und Celluloseacetat</i>	67
<i>Tabelle 13 Sauerstoffindex (Limiting Oxygen Index (LOI)) ausgewählter Kunststoffe</i>	68
<i>Tabelle 14 Übersicht verwendeter Flammschutzmittel</i>	71
<i>Tabelle 15 Übersicht verwendeter Additive</i>	72
<i>Tabelle 16 Biokunststoffe – Produkttypen für Compoundierungsversuche</i>	72
<i>Tabelle 17 Compoundierungsversuche mit dem Flammschutzmittel Triphenylphosphat (TPP)</i> ..	74
<i>Tabelle 18 Zusammenfassung: Auswirkung verschiedener Additive auf die Transparenz von Polylactid</i>	76
<i>Tabelle 19 Ergebnisse Brandversuche nach UL 94 V</i>	78
<i>Tabelle 20 Compoundierungsversuche mit dem Flammschutzmittel Ammoniumpolyphosphat (APP)</i>	80
<i>Tabelle 21 Compoundierungsversuche mit dem Flammschutzmittel Kalium-Diphenyl-Sulfon-Sulfonat</i>	81
<i>Tabelle 22 Zusammensetzung der Probekörper aus Abbildung 55</i>	83
<i>Tabelle 23 HDT-B erdölbasierter und biobasierter (modifizierter) Kunststoffe im Vergleich:</i>	85
<i>Tabelle 24 HDT-B bei einer Dosierung des Nukleierungsmittels (NM) von 2-5 wt %</i>	86
<i>Tabelle 25 HDT-B von PLA-TPP-Compounds bei unterschiedlichen Formgebungsbedingungen</i>	87
<i>Tabelle 26 HDT-B und Transparenzgrade je nach Werkzeugtemperatur und Dauer der Kühlzeit</i>	89
<i>Tabelle 27: Transparenzgrade von PLA und PLA-Compounds vor und nach der Freibewitterung</i>	90
<i>Tabelle 28 Zusammensetzung der Probekörper aus Abb. 65</i>	98
<i>Tabelle 29 Veränderung der mechanischen Eigenschaften von (Bio)Kunststoffcompounds nach künstlicher und natürlicher Alterung</i>	99
<i>Tabelle 30: Veränderung der mechanischen Eigenschaften von PLA und modifiziertem PLA nach 33 Monaten Innenraumlagerung</i>	101

<i>Tabelle 31 Veränderung der mechanischen Eigenschaften von PLA und modifiziertem PLA nach Klima- und Temperaturlagerung</i>	<i>103</i>
<i>Tabelle 32 Ermittelte Schlagzähigkeit von PLA und PLA-Compounds im Vergleich zu PMMA, PC und PET</i>	<i>105</i>
<i>Tabelle 33 Compoundierungsversuche mit dem Flammschutzmittel roter Phosphor (RP):</i>	<i>120</i>
<i>Tabelle 34 Compoundierungsversuche mit dem Flammschutzmittel Blähgraphit:</i>	<i>121</i>
<i>Tabelle 35 Brandklassen (UL94-V) von PLA-Compounds mit unterschiedlichen Flammschutzmitteln</i>	<i>124</i>
<i>Tabelle 36: Beanspruchungsbedingungen der künstlichen Alterung nach DIN EN ISO 4892-3, Zyklus 3.....</i>	<i>125</i>
<i>Tabelle 37 Proben vor und nach 855h künstlicher Alterung nach DIN EN ISO 4892-3, Zyklus 3:</i>	<i>126</i>
<i>Tabelle 38 Farbabstand von PLA, CA und PLA-Compounds nach künstlicher Alterung durch Globalstrahlung.....</i>	<i>127</i>
<i>Tabelle 39 Reflektormeterwerte.....</i>	<i>127</i>
<i>Tabelle 40 Proben vor und nach >18 Monaten Freibewitterung nach DIN EN ISO 877</i>	<i>128</i>
<i>Tabelle 41 Veränderung der mechanischen Eigenschaften nach künstlicher Alterung (Globalstrahlung) und Freibewitterung:</i>	<i>129</i>
<i>Tabelle 42 Veränderung der mechanischen Eigenschaften nach Klima- und Temperaturlagerung:</i>	<i>131</i>
<i>Tabelle 43 Proben vor und nach Wasserlagerung</i>	<i>133</i>
<i>Tabelle 44 Veränderung der Streckspannung und Dehnung nach Wasserlagerung (240h): ...</i>	<i>134</i>
<i>Tabelle 45 Zusammensetzung und Wärmeformbeständigkeit des ausgewählten Compounds</i>	<i>136</i>

A.3 Quellenverzeichnis

- [1] European Bioplastics e.V. (Juli/ August 2011): Fact Sheet. European Bioplastics: http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2011/04/fs/Biokunststoffe_de.pdf
- [2] Bildquelle: The Wild Green Yonder. Plastics Rundown (2007). Online verfügbar unter <http://wildgreenyonder.wordpress.com/2007/02/15/bioplastics-rundown/>, zuletzt geprüft am 14.11.2012.
- [3] Bildquelle: Gyy Netbook von iUnika. <http://www.netzwelt.de/news/79942-gadget-globus-netbook-solarantrieb-160-euro.html>, letzter Zugriff am 14.11.2012.
- [4] European Bioplastics e.V.: A-Z. Online verfügbar unter <http://european-bioplastics.org/index.php?id=16>, zuletzt geprüft am 11.04.2012.
- [5] Endres, Hans-Josef; Siebert-Raths, Andrea (2009): Technische Biopolymere. Rahmenbedingungen, Marktsituation, Herstellung, Aufbau und Eigenschaften. München: Hanser, Seite 5.
- [6] European Bioplastics e.V.: A-Z. Online verfügbar unter <http://european-bioplastics.org/index.php?id=16>, zuletzt geprüft am 11.04.2012.
- [7] Endres, Hans-Josef; Siebert-Raths, Andrea (2009): Technische Biopolymere. Rahmenbedingungen, Marktsituation, Herstellung, Aufbau und Eigenschaften. München: Hanser, Seite 120.
- [8] Köhler, Carmen (2010): Naturfaserverstärkte Kunststoffe und Biokunststoffe. In: Atlas Kunststoffe + Membranen, S. 62 B 4.6.
- [9] European Bioplastics; Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe (2014): Weltweite Produktionskapazität für Biokunststoffe. Online verfügbar unter <http://en.european-bioplastics.org/press/press-pictures/labelling-logos-charts/>, zuletzt geprüft am 02.05.2015.
- [10] Gudrun Klein (2013): Impulse für Wachstum. Editorial. Herausgegeben von Carl Hanser Verlag. (Kunststoffe 10/2013). Online verfügbar unter www.kunststoffe.de, zuletzt geprüft am 24.02.2014.
- [11] European Bioplastics: Biokunststoffmarkt wächst kräftig zwischen 2012 und 2017. European Bioplastics veröffentlicht aktuelle Marktdaten. Pressemitteilung vom 12.12.2013. Online verfügbar unter http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2013/12/EuBP_Marktdaten_2012.pdf zuletzt geprüft am 17.03.2014
- [12] European Bioplastics und Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe (2014), Weltweite Produktionskapazitäten für Biokunststoffe 2018 nach Region , verfügbar unter: <http://en.european-bioplastics.org/press/press-pictures/labelling-logos-charts/>, zuletzt geprüft am: 02.05.2015.
- [13] Schaubild nach Quelle: European Bioplastics und Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe (2014) Weltweite Produktionskapazitäten für Biokunststoffe, verfügbar unter: <http://en.european-bioplastics.org/press/press-pictures/labelling-logos-charts/>, zuletzt geprüft am: 02.05.2015.
- [14] Schaubild nach Quelle: European Bioplastics und Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe (Dezember 2013) Weltweite Produktionskapazitäten für Biokunststoffe 2018 nach Materialtyp, verfügbar unter: <http://en.european-bioplastics.org/press/press-pictures/labelling-logos-charts/>, zuletzt geprüft am: 02.05.2015.
- [15] Frank Waskow/ KATALYSE-Institut Köln; Umweltlexikon: Nachwachsende Rostoffe, verfügbar unter: <http://www.umweltlexikon-online.de/RUBlandwirtsrohstoffe/NachwachsendeRohstoffe.php> zuletzt geprüft am: 16.03.2014.
- [16] European Bioplastics und Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe (Dezember 2013), Landnutzung für Biokunststoffe 2012 und 2017, verfügbar unter: <http://en.european-bioplastics.org/press/press-pictures/labelling-logos-charts/>; zuletzt geprüft am 17.03.2014.

- [17] European Bioplastics und Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe (Dezember 2013) Weltweite Produktionskapazitäten für Biokunststoffe, verfügbar unter: <http://en.european-bioplastics.org/press/press-pictures/labelling-logos-charts/>, zuletzt geprüft am: 09.03.2014.
- [18] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Mai 2012): Roadmap Bioraffinerien. Im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur stofflichen und energetischen Nutzung nach wachsender Rohstoffe. Herausgegeben von Bundesministerium für Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV); Bundesministerium für Ernährung, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Seite 7.
- [19] Dr. Horst Steinmüller (2013): Grüne Bioraffinerie- Gras, ein Rohstoff mit Zukunft. Die Demonstrationsanlage in Utzenaich. Die österreichische grüne Bioraffinerie. Veranstaltung vom 2013, aus der Reihe "ForNeBik-Fachgespräche 2013". Online verfügbar unter www.fornebik.bayern.de/allgemein/a_veranstaltungen/box_rechts_auf_VAseite/130604_05/Vortraege/Steinmueller.pdf, zuletzt geprüft am 18.03.2014.
- [20] (30.10.2012): Neuer Biokunststoff. In: hi!tech Innovationsmagazin von Siemens Österreich. Online verfügbar unter <http://www.hitech.at/2012/10/30/neuer-biokunststoff/>, zuletzt geprüft am 31.03.2014.
- [21] Institut für Biotechnologie und Bioprozesstechnik / TU Graz (Hg.): useful waste. Novel biotechnological approaches for utilizing carbon containing wastes to make high added value products. AM-NIPOL. Online verfügbar unter <http://www.animpol.tugraz.at/deutsch/projekt.htm>, zuletzt geprüft am 31.03.2014.
- [22] Fraunhofer UMSICHT: EU-Projekt »SPLASH«. Aus Algenöl Garn spinnen. Pressemitteilung vom 15.03.2013. Online verfügbar unter <http://www.umsicht.fraunhofer.de/de/presse-medien/2013/splash-algen-kunststoff.html>.
- [23] Lolke Sijtsma; Maria Barbosa: SPLASH: Sustainable polymers from algae sugars and hydrocarbons. Herausgegeben von Food & Biobased Research Wageningen UR. Online verfügbar unter http://www.eu-splash.eu/media/downloads/2013/06/SPLASH_poster.pdf.
- [24] Endres, Hans-Josef; Siebert-Raths, Andrea (2011): Engineering Biopolymers – Markets, Manufacturing, Properties and Applications. München: Hanser, Seite 7.
- [25] Eigene Tabelle nach Vorlage von: Endres, Hans-Josef; Siebert-Raths, Andrea (2009): Technische Biopolymere. Rahmenbedingungen, Marktsituation, Herstellung, Aufbau und Eigenschaften. München: Hanser, Seite 93 Tabelle 4.1.
- [26] Köhler, Carmen (2010): Naturfaserverstärkte Kunststoffe und Biokunststoffe. In: Atlas Kunststoffe + Membranen, S. 63 B 4.9.
- [27] Bildquelle: Fraunhofer Zentrum für Chemisch-Biotechnologische Prozesse CBP: Umweltfreundlichere Klebstoffe. 07.01.2014. Online verfügbar unter <http://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2014/Januar/umweltfreundliche-klebstoffe.html>.
- [28] Bildquelle: Reformafácil, <http://www.reformafacil.com.br/wp-content/uploads/ekobe1.jpg>
- [29] Plant Biomechanics Group Freiburg und Kompetenznetz Biomimetik (Hg.): Bionisches Produkt: Bauschraube. TREEPLAST. Online verfügbar unter <http://www.bionik-vitrine.de/produkt-1.html>, zuletzt geprüft am 02.04.2014.
- [30] Tecnar GmbH (Hg.): Werkstoffdaten Arboform. Online verfügbar unter <http://www.tecnaro.de/deutsch/daten.htm?section=arboform>, zuletzt geprüft am 02.04.2014.
- [31] Mark Downing (14.06.2013): Doe Lignin to Carbon fiber Workshop. Bioenergy program. Environmental Sciences Division. Veranstaltung vom 14.06.2013. Online verfügbar unter http://www1.eere.energy.gov/bioenergy/pdfs/carbon_fiber_workshop_downing.pdf, zuletzt geprüft am 02.04.2014.

- [32] WIP-Kunststoffe e.V. Wissens- und Innovationsnetzwerk Polymertechnik (Hg.) (2014): Carbonfasern aus Lignin und Zellulose. Renewable source nanostructured precursors for carbon fibers. Online verfügbar unter <http://wip-kunststoffe.de/wip/nachrichten/967781-carbonfasern-aus-lignin-und-zellulose/>, zuletzt geprüft am 02.04.2014..
- [33] biotechnologie.de (Hg.) (2014): Nylon aus Holzabfällen. Online verfügbar unter <http://www.biotechnologie.de/BIO/Navigation/DE/root,did=171268.html?listBild=74462>, zuletzt geprüft am 02.04.2014.
- [34] Prof. Dr. Michel Delmas/ Université de Toulouse: The Biolignin™: Key of lignocellulosic refining. The BB&B Process : Biomass to Biofuels & Bioproducts, aus der Reihe "ORNL / 04-2013". Online verfügbar unter http://cfcomposites.org/PDF/New%20member_CIMV.pdf, zuletzt geprüft am 02.04.2014.
- [35] Bildquelle: http://www.aschua-uhlen.de/product_info.php/info/p27_Schutzscheibe-aus-Cellulose-Acetat--klar--500x250x1-15-mm.html/XTCsid/XTCsid
- [36] Bildquelle: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V (Hg.): Biowerkstoffe - Biokunststoffe - Elektronikbedarf. Maus Fujitsu M440 ECO. Online verfügbar unter <http://datenbank.fnr.de/index.php?id=7746&idprodukt=3>, zuletzt geprüft am 14.04.2014.
- [37] Cluster Bioraffinerie 21: http://bioraffinerie2021.de/cms/?page=Basiswissen_Cellulose letzter Zugriff: 27.11.12.
- [38] Mirjam Brockmann: Kunststoffe zum Kennenlernen: Cellulose-Acetat. Herausgegeben von Didaktik der Chemie/ FU Berlin. Online verfügbar unter <http://www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/kunststoffe/acetat.htm>, zuletzt geprüft am 02.04.2014.
- [39] Wacotech GmbH & Co. KG: TIMax® CA Wabenstruktur - Wetterstabilität. TWD - Transparente Wärmedämmung. Online verfügbar unter http://wacotech.de/wacotech/wp-content/uploads/2011/03/TIMaxCA_UV+Temp_Stabilitaet.pdf, zuletzt geprüft am 02.04.2014.
- [40] Mirjam Brockmann: Kunststoffe zum Kennenlernen: Cellulose-Acetat. Herausgegeben von Didaktik der Chemie/ FU Berlin. Online verfügbar unter <http://www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/kunststoffe/acetat.htm>, zuletzt geprüft am 02.04.2014.
- [41] Plastiloid 22 MGP. Data sheet. Herausgegeben von Mazzucelli 1849.
- [42] Endres, Hans-Josef; Siebert-Raths, Andrea (2009): Technische Biopolymere. Rahmenbedingungen, Marktsituation, Herstellung, Aufbau und Eigenschaften. München: Hanser, Seite 36 Celluloseacetat; Seite 92.
- [43] Endres, Hans-Josef; Siebert-Raths, Andrea (2011): Engineering Biopolymers – Markets, Manufacturing, Properties and Applications. München: Hanser, Seite 32 Cellulose Acetate.
- [44] Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UNSICHT: Auszug aus dem Jahresbericht 2011/ 2012. Biobasierte Weichmacher als umweltfreundliche Alternative, Seite 12. Online verfügbar unter <http://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/jahresberichte/2011-jb-geschaeftsfelder.pdf>, zuletzt geprüft am 14.04.2014.
- [45] Dr. Masatoshi Iji/ Research Fellow NEC Green Innovation Research Laboratories: Plastic Made from Straw and Nut Shells. Unused plant resources the key to solving problems of natural resources and the environment. Online verfügbar unter <http://www.nec.com/en/global/environment/featured/bioplastics2/contents2.html>, zuletzt geprüft am 14.04.2014.
- [46] NEC Corporation: NEC Develops High Performance Bioplastic with a High Plant Ratio by Using Non-edible Plant Resources. Advanced bioplastic from plant stems and cashew nut shells. Pressemitteilung vom 25.10.2010. Tokyo. Online verfügbar unter <http://www.nec.co.jp/press/en/1008/2501.html>, zuletzt geprüft am 14.04.2014.
- [47] Bildquelle: ITCF Denkendorf: Hannover Messe: Superfeine Gewebe aus Cellulose für neue Materialeigenschaften. Herausgegeben von IDW - Informationsdienst Wissenschaft. Online verfügbar unter <http://www.idw-online.de/de/image?id=230905&size=screen>, zuletzt geprüft am 14.04.2014.

- [48] Bildquelle: Online verfügbar unter <http://www.feinundfein.de/de/4-Trueffel-Pralinen-im-Cellophan-Beutel>, zuletzt geprüft am 14.04.2014.
- [49] Ganster, J.; Lehmann, A.; Erdmann, J.; Fink, H.-P. (11.10.2012): Biobasierte technische Fasern und Composite. Veranstaltung vom 11.10.2012. Wolfsburg, Seite 25. Online verfügbar unter http://biopolymernetzwerk.fnr.de/fileadmin/biopolymere/dateien/pdfs/Veranstaltung_Automobil_Wolfsburg_11-10-12/IZB_Einsatz_biobas_Werkstoffe_11-10-12_Dr_Ganster.pdf, zuletzt geprüft am 14.04.2014.
- [50] Endres, H. -J; Siebert-Raths, A. (2011): Engineering Biopolymers. Markets, Manufacturing, Properties an Applications. Seite 33, München: Hanser.
- [51] Ganster, J.; Lehmann, A.; Erdmann, J.; Fink, H.-P. (11.10.2012): Biobasierte technische Fasern und Composite. Veranstaltung vom 11.10.2012. Wolfsburg, Seite 12. Online verfügbar unter http://biopolymernetzwerk.fnr.de/fileadmin/biopolymere/dateien/pdfs/Veranstaltung_Automobil_Wolfsburg_11-10-12/IZB_Einsatz_biobas_Werkstoffe_11-10-12_Dr_Ganster.pdf, zuletzt geprüft am 14.04.2014.
- [52] Eyerer, P.; Hirth, T.; Elsner, P. (2008): Polymer Engineering. Technologien und Praxis. 3 Eigenschaften von Kunststoffen in Bauteilen, Seite 158. Berlin - Heidelberg: Springer Verlag.
- [53] Kehlheim Fibres: Olea – die erste Viskosefaser mit eingebauter Hydrophobie. Pressemitteilung von 2013. Online verfügbar unter http://www.kelheim-fibres.com/produkte/innovationen_de.php zuletzt geprüft am 14.04.2014.
- [54] Lenzing Textile Fibers (Hg.): LenzingFR. The Heat Protection Fiber. Online verfügbar unter <http://www.lenzing.com/fasern/lenzing-fr/lenzing-frr.html>, zuletzt geprüft am 14.04.2014.
- [55] Bildquelle: http://www.packworld.com/sites/default/files/styles/lightbox/public/images/issues/12.04/images/Departments/News_Biota_Stubby.jpg?itok=pYPuBtmN, zuletzt geprüft am 14.04.2014.
- [56] Corbion Purac: Bioplastic touch screen computer casing. Online verfügbar unter <http://en.european-bioplastics.org/press/press-pictures/consumer-electronics/>, zuletzt geprüft am 18.04.2014.
- [57] Mazda Motor Corporation, Teijin Industries (2011): Car seat fabric made 100% from Teijin's heat-resistant BIOFRONT bioplastic. Online verfügbar unter <http://en.european-bioplastics.org/press/press-pictures/other-applications/>, zuletzt geprüft am 18.04.2014.
- [58] NatureWorks LLC: Sourcing Ingeo: Raw Materials. Feedstocks. Online verfügbar unter <http://www.natureworkslc.com/The-Ingeo-Journey/Raw-Materials.aspx#one>, zuletzt geprüft am 18.04.2014.
- [59] Mobil ohne Fossil: Biokraftstoffe der 2. Generation. Zusammensetzung von Getreidestroh und Laubholz. Online verfügbar unter http://www.mobilohnefossil.de/mid493_Rohstoff.html, zuletzt geprüft am 18.04.2014.
- [60] IsoBouw/ Synbra Company (2013): Vorwärts dämmen. BioFoam® unser ausgezeichnetes Produkt. Online verfügbar unter <http://www.isobouw.de/index.php/biofoamr>, zuletzt geprüft am 18.04.2014.
- [61] SUPLA (SUQIAN) NEW MATERIALS CO., L. T. D.: Product (injection molding) Auto Parts. Online verfügbar unter <http://www.yycsqxcl.com/english/Product.asp?ClassID=9&title=>, zuletzt geprüft am 18.04.2014.
- [62] Schut, Jan H. (November 2008): PLA Biopolymers. New Copolymers, Expandable Beads, Engineering Alloys & More. In: *Plastics Technology*, Jg. 2008. Online verfügbar unter <http://www.biofoam.nl/uploads/BioFoam/Article%20PLA%20Biopolymers.pdf>, zuletzt geprüft am 23.04.2014.
- [63] Purac: PURALACT® D. Improving heat-resistance of bioplastics.
- [64] Tejin Industries: Highly Heat-resistant Bioplastic. A New Material Solution for High Performance Eco-products. Online verfügbar unter <http://www.teijin.com/rd/technology/bioplastic/>, zuletzt geprüft am 23.04.2014.

- [65] NatureWorks LLC: UV resistance. Ingeo™ Fiber Outperforms Other Synthetics in Resistance to UV Light. Technical Bulletin 370904. Online verfügbar unter http://www.natureworkslc.com/~media/Technical_Resources/Fact_Sheets/Fibers/FactSheet_Fabrics_UVResistance_pdf.pdf, zuletzt geprüft am 23.04.2014.
- [66] NatureWorks LLC: Ingeo resin product guide. Naturally Advanced Materials. Online verfügbar unter http://www.natureworkslc.com/~media/Technical_Resources/one-pagers/ingeo-resin-grades-brochure_pdf, zuletzt geprüft am 24.04.2014.
- [67] Kern GmbH Technische Kunststoffteile: Acrylnitril/Butadien/Styrol (ABS). Online verfügbar unter <http://www.kern-gmbh.de/cgi-bin/riweta.cgi?nr=2110&lng=1>, zuletzt geprüft am 24.04.2014.
- [68] Purac: Purac presents solutions for improved heat-resistant PLA at NPE 2012. Pressemitteilung vom 25.01.2012. Online verfügbar unter <http://www.purac.com/EN/Bioplastics/News-Press-Events/News/Press-release-Improved-heat-resistant-PLA-at-NPE.aspx>, zuletzt geprüft am 23.04.2014.
- [69] Purac: Corbion Purac and Innovia to develop temperature stable, transparent PLA films. Pressemitteilung vom 07.10.2013. Online verfügbar unter <http://www.purac.com/EN/Bioplastics/News-Press-Events/News/Corbion-Purac-and-Innovia.aspx#.U1gnpVfRO8V>, zuletzt geprüft am 23.04.2014.
- [70] Tejin Industries: Highly Heat-resistant Bioplastic. A New Material Solution for High Performance Eco-products. BIOFRONT grade J201: Stereocomplex PLA (Hydrolysis-resistant grade). Online verfügbar unter <http://www.teijin.com/rd/technology/bioplastic/>, zuletzt geprüft am 23.04.2014.
- [71] Follmann, Martin; Nawrat, Matthias /. Biovalley; Pott, Ariane /. BIOPRO; Bächtle, Christoph /. BIOPRO: Mikroalgen: Zukunft aus CO2 und Sonne? In: BIOPRO Magazin - Biotechnologie und life Sciences in Baden Württemberg, H. 1/ 2013.
- [72] European Bioplastics: Weltweite Produktionskapazitäten für Biokunststoffe 2012 (nach Materialtyp). Online verfügbar unter <http://en.european-bioplastics.org/press/press-pictures/labelling-logos-charts/>, zuletzt geprüft am 10.05.2014.
- [73] Endres, Hans-Josef; Siebert-Raths, Andrea (2009): Technische Biopolymere. Rahmenbedingungen, Marktsituation, Herstellung, Aufbau und Eigenschaften. München: Hanser, Seite 153.
- [74] European Bioplastics: Weltweite Produktionskapazitäten für Biokunststoffe 2012 und 2017 (nach Materialtyp). Online verfügbar unter <http://en.european-bioplastics.org/press/press-pictures/labelling-logos-charts/>, zuletzt geprüft am 06.05.2014.
- [75] Avantium: YXY Technology. Groundbreaking technology for a biobased future. Online verfügbar unter <http://avantium.com/yxy/YXY-technology.html>, zuletzt geprüft am 06.05.2014.
- [76] Avantium: YXY process technology. Online verfügbar unter <http://avantium.com/yxy/YXY-technology/YXY-process-technology.html>, zuletzt geprüft am 06.05.2014.
- [77] Doris de Guzman (2013): Avantium's 100% biobased T-shirts from recycled PEF bottles. Hg. v. Green Chemicals Blog. Online verfügbar unter <http://greenchemicalsblog.com/2013/11/14/avantiums-100-biobased-t-shirts-from-recycled-pef-bottles/>, zuletzt geprüft am 06.05.2014.
- [78] LZ Fachverlag (2013): Alpla tritt der Kooperation von Avantium, Coca-Cola und Danone zur Entwicklung von PEF-Flaschen bei. In: Pack aktuell, 05.06.2013. Online verfügbar unter <http://www.packaktuell.ch/news/kunststoff/2013/6/4/alpla-tritt-der-kooperation-von-avantium,-coca-cola-und-danone-zur-entwicklung-von-pef-flaschen-bei.aspx>, zuletzt geprüft am 06.05.2014.
- [79] Avantium: PEF Bottles. Online verfügbar unter <http://avantium.com/yxy/products-applications/fdca/PEF-bottles.html>, zuletzt geprüft am 06.05.2014.
- [80] Doris de Guzman (2013): Avantium's 100% biobased T-shirts from recycled PEF bottles. Hg. v. Green Chemicals Blog. Online verfügbar unter <http://greenchemicalsblog.com/2013/11/14/avantiums-100-biobased-t-shirts-from-recycled-pef-bottles/>, zuletzt geprüft am 06.05.2014.

- [81] Dow Chemical (Hg.): Dow Ecolibrium. Biobased Plastiziser. Online verfügbar unter <http://www.dow.com/ecolibrium/index.htm>, zuletzt geprüft am 30.04.2014.
- [82] Teknor Apex; Dow Ecolibrium: Biovinyl. sustainable flexibility. Online verfügbar unter http://www.biovinyl.com/images_biovinyl/Introducing_BioVinyl_-_Sustainable_Flexibility_-_April%202012.pdf, zuletzt geprüft am 30.04.2014.
- [83] Harmsen, Paulien; Hackmann, Martijn/ Wageningen UR Food &. Biobased Research (2013): Green building blocks Green building blocks for biobased plastics. Biobased processes and market development, März 2013. Online verfügbar unter www.iea-bioenergy.task42-biorefineries.com/upload_mm/d/7/6/54c63506-4be9-4892-b5b2-7b658c10305e_GreenBuildingBlocks%20for%20Biobased%20Plastics%20HR.pdf, zuletzt geprüft am 30.04.2014.
- [84] Bildquelle: Mirel von Metabolix.
- [85] Bildquelle: Straw Dog B.V. (2014): One Nights Stand. Hg. v. Straw Dog B.V. Delft. Online verfügbar unter <http://www.psssh.nl/products/one-nights-tent>.
- [86] Bildquelle: <http://mocoloco.com/archives/027152.php>
- [87] Endres, H.-J; Siebert-Raths, A. (2011): Engineering Biopolymers. Markets, Manufacturing, Properties and Applications. München: Hanser, p. 33.
- [88] Metabolix: Provisional Product Data Sheet. Mirel™ P1004/ F1006, Mirel™ P1003/ F1005 Mirel™ P4001. Online verfügbar unter <http://www.metabolix.com/Products/Biopolymers/Resource-Center/Datasheets>, zuletzt geprüft am 29.04.2014.
- [89] Biomer. Online verfügbar unter <http://www.biomer.de/IndexD.html>, zuletzt geprüft am 29.04.2014.
- [90] Endres, H.-J; Siebert-Raths, A. (2011): Engineering Biopolymers. Markets, Manufacturing, Properties and Applications. München: Hanser; p. 159, p. 199/ Figure 5.59.
- [91] Morgan, Fernando/ AnoxKaldnes AB Sweden (2010): 1Production of bioplastics as by-products of waste treatment, 2010. Online verfügbar unter http://www.eu-neptune.org/End%20User%20Conference/N-06_End_User_conference_Jan_27-2009Anox.pdf, zuletzt geprüft am 29.04.2014.
- [92] SYNPOL. "Biopolymers from Syngas Fermentation". Online verfügbar unter <http://www.synpol.org/>, zuletzt geprüft am 29.04.2014.
- [93] Bildquelle: Mitsubishi Chemical Corporation (Hg.): New Bio-based Engineering Plastic "DURA BIO™". Online verfügbar unter www.m-kagaku.co.jp/english/products/business/polymer/sustainable/details/1194667_3255.html, zuletzt geprüft am 28.04.2014.
- [94] Bildquelle: Bioplastic News (Hg.) (2014): Mitsubishi Chemicals develops new grade of DURA BIO™ bio-based engineering plastic for the automotive industry. Online verfügbar unter <http://bioplasticsnews.com/2014/02/09/mitsubishi-chemicals-develops-new-grade-of-durabio-bio-based-engineering-plastic-for-the-automotive-industry/>, zuletzt geprüft am 28.04.2014.
- [95] InfoRapid Wissensportal (Hg.): Isosorbid. Online verfügbar unter <http://de.inforapid.org/index.php?search=Isosorbid>, zuletzt geprüft am 28.04.2014.
- [96] Mitsubishi Chemical Corporation: New Bio-based Engineering Plastic "DURABIO™". Online verfügbar unter www.m-kagaku.co.jp/english/products/business/polymer/sustainable/details/1194667_3255.html, zuletzt geprüft am 28.04.2014.
- [97] Mitsubishi Chemical Corporation: New Bio-based Engineering Plastic "DURABIO™". Online verfügbar unter www.m-kagaku.co.jp/english/products/business/polymer/sustainable/details/1194667_3255.html, zuletzt geprüft am 28.04.2014.

- [98] Acrylglas aus Zucker. Neues Enzym könnte Produktion von Kunststoff revolutionieren. Pressemitteilung vom 13.11.2008. Duisburg/ Leipzig. Thore Rohwerder, Roland H. Müller. Online verfügbar unter <http://www.ufz.de/index.php?de=17387>, zuletzt geprüft am 28.04.2014.
- [99] Arkema (2013): Plexiglas Rnew. Biopolymer alloys - typical properties C520. Online verfügbar unter <http://www.plexiglas.com/export/sites/plexiglas/.content/medias/downloads/resins-docs/plexiglas-Rnew-VgradesC520.pdf>, zuletzt geprüft am 28.04.2014.
- [100] Endres, H. -J; Siebert-Raths, A. (2011): Engineering Biopolymers. Markets, Manufacturing, Properties an Applications. S. 33, München: Hanser.
- [101] Evonik Industries: PLEXIGLAS® - Brandklassifizierungen. Übersicht zu Brandzertifikaten. Online verfügbar unter www.plexiglas.de/product/plexiglas/de/produkte/technische-daten/zulassungen-zertifikate/pages/brandklassifizierungen.aspx, zuletzt geprüft am 10.09.2014.
- [102] Kern GmbH (2014): Polymethylmethacrylat (PMMA). Online verfügbar unter <http://www.kern-gmbh.de/cgi-bin/riweta.cgi?nr=2610&lng=1&popup=1>, zuletzt geprüft am 10.09.2014.
- [103] Endres, H. -J; Siebert-Raths, A. (2011): Engineering Biopolymers. Markets, Manufacturing, Properties an Applications. S.159, München: Hanser.
- [104] Plasticker: bvse-Marktbericht Kunststoffe - Mai 2013. 1. Der Markt für Primärkunststoffe. Online verfügbar unter <http://plasticker.de/preise/marktbericht2.php?j=13&mt=5&quelle=bvse>.
- [105] NatureWorks LLC: Ingeo™ Biopolymer 3260HP Technical Data Sheet. Online verfügbar unter http://www.natureworkslc.com/~media/Technical_Resources/Technical_Data_Sheets/TechnicalDataSheet_3260HP_injection-molding_pdf.pdf, zuletzt geprüft am 10.09.2014.
- [106] Braskem (2004): Data Sheet High Density Polyethylene SHC7260. Online verfügbar unter www.fkur-biobased.com/fileadmin/user_upload/01-fkurbiobased/Produkte/Spritzguss/SHC7260/HDPE_SHC7260.pdf, zuletzt geprüft am 10.09.2014.
- [107] Bayer MaterialScience GmbH (2012): Makrolon® UV – Massivplatten aus Polycarbonat. Produktdata tenblatt Juli 2012. Online verfügbar unter <http://kunststoffplatten-partner.com/MediaCache/0/67447/Datenblatt.pdf>, zuletzt geprüft am 10.09.2014
- [108] A. Schulman GmbH: Dies ist das kostenlose Material Data Center Datenblatt für POLYMAN® (PMMA) M/06 - PMMA - A. Schulman GmbH. Hg. v. materialdatacenter. Online verfügbar unter [www.materialdatacenter.com/ms/de/Polyman/A+Schulman+Inc/POLYMAN%C2%AE+\(PMMA\)+M06/28cee972/25](http://www.materialdatacenter.com/ms/de/Polyman/A+Schulman+Inc/POLYMAN%C2%AE+(PMMA)+M06/28cee972/25), zuletzt geprüft am 11.09.2014.
- [109] Acuplastics: Technische Werte ABS, PS/SB, PMMA. Online verfügbar unter <http://www.akuplastics.com/gehrfile/tech3d.htm>, zuletzt geprüft am 11.09.2014.
- [110] Plastics Europe (Hg.): Eco-profiles (the plastics portal). Online verfügbar unter <http://www.plasticseurope.org/plasticssustainability/eco-profiles.aspx>, zuletzt geprüft am 09.05.2014.
- [111] Vink, E/ NatureWorks BV; Davies, S. /NaturWorks LLC; Kolstad, J. (2010): The eco-profile for current Ingeo® polylactide production. Biocatalytic vs. chemical production of alkanolamide bio surfactants (Volume 6). In: Industrial biotechnology - The journal of biobased industries, August 2010 (4). Seite 13. Online verfügbar unter http://www.natureworkslc.com/~media/The_Ingeo_Journey/EcoProfile_LCA/EcoProfile/NTR_Eco_Profile_Industrial_Biotechnology_082010_pdf.pdf.
- [112] Windsperger, A.; Thurner, M.; Brandt, B.; Pilz, H.; Fehring, R. (2010): Neue Energien 2020. Klimaschutzpotenziale beim forcierten Einsatz biogener. Seite 73. Online verfügbar unter http://www.indoek.at/downloads/KliKu_Endbericht-publizierbar_Version1.0__2_.pdf, zuletzt geprüft am 09.05.2014.
- [113] Harding, K.G; Dennis, J.S; Blottnitz, H. von; Harrison, S.T.L (2007): Environmental analysis of Plastic production processes: Comparing petroleum-based polypropylene an polyethylene with bio

- logically-based poly- β -Hydroxybutyric acid using life cycle analysis. In: Journal of Biotechnology (130), S. 57–66, zuletzt geprüft am 09.05.2014.
- [114] Kim, S.; Dale, B.E./ Department of Chemical Engineering & Materials Science (2008): Energy and Greenhouse Gas Profiles of Polyhydroxybutyrates Derived from Corn Grain: A Life Cycle Perspective. In: Environmental Science & Technology (Vol. 42, Nr. 20), S. 7690–7695.
- [115] Endres, H. -J.; Siebert-Raths, A. (2011): Engineering Biopolymers. Markets, Manufacturing, Properties and Applications. 7.2 Data for the Life-Cycle Assessment of Biopolymers, München: Hanser.
- [116] Eerhart, A.; Faaija, A.; Patela, M. K. (2012): Replacing fossil based PET with biobased PEF; process analysis, energy and GHG balance. In: Energy & Environmental Science. 5. Page 6407-6422, Online verfügbar unter <http://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2012/EE/c2ee02480b#!divAbstract>, zuletzt geprüft am 09.05.2014.
- [117] Cappra, C. (2013): Sugarcane Polyolefins Adding value through the use of I'm green™ polyethylene. Braskem, Juli 2013. Online verfügbar unter http://www.fullplast.cl/presentaciones_seminario/Presentation_Green_PE.pdf, zuletzt geprüft am 09.05.2014.
- [118] Tekor Apex: Biovinyl - sustainable Flexibility. Online verfügbar unter <http://www.biovinyl.com/technical>, zuletzt geprüft am 09.05.2014.
- [119] WECOBIS ökologisches Bauinformationssystem (2014): Polyacrylate. Herstellung. Hg. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit Bundesministerium für Umwelt. Online verfügbar unter <http://www.wecobis.de/grundstoffe/kunststoffe-gs/polyacrylate-gs.html?dsMv=1&dsActive=r1>, zuletzt geprüft am 09.05.2014.
- [120] Evonik Industries AG (11.10.2011): Langlebig, ökologisch und recyclebar. PR Management Acrylic Polymers Doris Hirsch. Online verfügbar unter <http://corporate.evonik.com/de/presse/pressemitteilungen/pages/news-details.aspx?newsid=22784>, zuletzt geprüft am 09.05.2014.
- [121] Windsperger, A.; Thurner, M.; Brandt, B.; Pilz, H.; Fehringer, R.: Neue Energien 2020. Klimaschutzpotenziale beim forcierten Einsatz biogener. Seite 73. Online verfügbar unter http://www.indoek.at/downloads/KliKu_Endbericht-publizierbar_Version1.0__2_.pdf, zuletzt geprüft am 09.05.2014.
- [122] Endres, H. -J.; Siebert-Raths, A. (2011): Engineering Biopolymers. Markets, Manufacturing, Properties and Applications. 6.4 Incineration, München: Hanser.
- [123] Endres, H.-J.; Siebert-Raths, A. (2009): Technische Biopolymere. Rahmenbedingungen, Marktsituation, Herstellung, Aufbau und Eigenschaften. München: Hanser, Seite 257, ausgewählte Werte aus Bild 6.5 Brennwerte von Biopolymeren.
- [124] Endres, H. -J.; Siebert-Raths, A. (2011): Engineering Biopolymers. Markets, Manufacturing, Properties and Applications. 6.2.2 chemical Recycling, München: Hanser.
- [125] plasticker (Hg.): Ecoplast Kunststoffrecycling: „Biokunststoffe stören Recycling bereits bei einem Anteil von weniger als 1 Prozent“ - Strikte Trennung von Abfallströmen gefordert. Online verfügbar unter <http://plasticker.de/news/shownews.php?nr=21417&nid=38645.w.h.2014-02-20>, zuletzt geprüft am 10.05.2014.
- [126] Purac (26.11.2012). Closing the loop: Purac promotes recyclability of biobased PLA. Lex Borghans. Online verfügbar unter <http://www.purac.com/EN/Bioplastics/About-bioplastics/PLA-lifecycle/Recycling-PLA.aspx>, zuletzt geprüft am 10.05.2014.
- [127] Horstkotte, J.: Bauprodukte. CE-Zeichen.de Richtlinienexte. Online verfügbar unter <http://www.ce-zeichen.de/klassifizierung/bauprodukte.html>, zuletzt geprüft am 02.04.2012.
- [128] Europäische Union: VERORDNUNG (EU) Nr. 305/2011 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 09. März 2011. In: Amtsblatt der Europäischen Union, S. L88/33 Anhang 1

- Grundanforderungen an Gebäude. Online verfügbar unter <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:088:0005:0043:DE:PDF>, zuletzt geprüft am 01.10.2014.
- [129] Europäische Union: Europäische Union: Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 09. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates, Anhang I Grundanforderungen an Gebäude.
- [130] Europäische Union: Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 09. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates. In: Amtsblatt der Europäischen Union. Online verfügbar unter: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:088:0005:0043:DE:PDF>
- [131] Musterbauordnung - MBO -, Fassung November 2002; Dritter Teil Bauprodukte, Bauarten; § 17 Bauprodukte.
- [132] Musterbauordnung - MBO -, Fassung November 2002; Dritter Teil Bauprodukte, Bauarten; § 18 Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, Absatz 1.
- [133] Musterbauordnung - MBO -, Fassung November 2002; Dritter Teil Bauprodukte, Bauarten; § 3 Allgemeine Anforderungen, Absatz 2.
- [134] Deutsches Institut für Normung e.V. (2014): Europäischer Binnenmarkt. Online verfügbar unter <http://www.din.de/cmd%3Fm%26menuid%3D47390%26menubid%3D47507%26cmsareaid%3D47390%26cmsruid%3D47498%26menurubricid%3D47498%26level%3Dtpl-unterrubrik%26cmssubrubid%3D47507%26languageid%3Dde>, zuletzt geprüft am 01.10.14.
- [135] Musterbauordnung - MBO -, Fassung November 2002; Dritter Teil Bauliche Anlagen, zweiter Abschnitt Allgemeine Anforderungen an die Bauausführung, §12 Standsicherheit.
- [136] Musterbauordnung - MBO -, Fassung November 2002; Dritter Teil Bauliche Anlagen, vierter Abschnitt Wände, Decken, Dächer, § 26 Allgemeine Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen.
- [137] Musterbauordnung - MBO -, Fassung November 2002; Dritter Teil Bauliche Anlagen, vierter Abschnitt Wände, Decken, Dächer, §28 Außenwände, Absatz 1
- [138] Deutsche Norm, DIN 4102, Mai 1998: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Teil 1: Baustoffe - Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. 5 Baustoffklassen A1 und A1.
- [139] Europäische Norm, DIN EN 13501-1, Januar 2010: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten, 8 Prüfung von Bauprodukten, mit Ausnahme von Bodenbelägen, 8.3 Klassen A2, A1.
- [140] Musterbauordnung - MBO -, Fassung November 2002; Dritter Teil Bauliche Anlagen, vierter Abschnitt Wände, Decken, Dächer, § 28 Außenwände.
- [141] Musterbauordnung - MBO -, Fassung November 2002; Dritter Teil Bauliche Anlagen, vierter Abschnitt Wände, Decken, Dächer, § 29 Trennwände.
- [142] Bauen mit Stahl (Hg.): Brandschutz-Arbeitshilfe. 61.0 Bauaufsichtliche Bestimmungen. Eine Gemeinschaftsorganisation von stahlerzeugenden Unternehmen und dem Deutschen Stahlbau-Verband DSTV. Online verfügbar unter http://www.bauforumstahl.de/upload/documents/brandschutz/arbeitshilfen/BA_61_0.pdf.
- [143] Deutsche Norm, DIN 4102-4:1994-03, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile.
- [144] Europäische Norm, DIN EN 13501-1, Januar 2010: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten.

- [145] DIN 4102-1:1998-05, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen.
- [146] UL 94, 23.08.2013: Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances.
- [147] Europäische Norm, DIN EN 13501-1, Januar 2010: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten, 8 Prüfung von Bauprodukten, mit Ausnahme von Bodenbelägen, 8.1 Klasse E.
- [148] Europäische Norm, DIN EN 13823, Dezember 2010: Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten Thermische Beanspruchung durch einen einzelnen brennenden Gegenstand für Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen, Deutsche Fassung EN 13823:2010-12.
- [149] Europäische Norm, DIN EN 13501-1, Januar 2010: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten, 8 Prüfung von Bauprodukten, mit Ausnahme von Bodenbelägen, 5.4 Prüfverfahren zum SBI (Single Burning Item) (EN 13823); 8.2 Klassen D, C, B.
- [150] Europäische Norm, DIN EN 13501-1, Januar 2010: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten. 11.3-11.6 Kriterien zur Klassifizierung von Bauprodukten, mit Ausnahme von Bodenbelägen.
- [151] Europäische Norm, DIN EN 13501-1, Januar 2010: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten, 11.3-11.6 Kriterien zur Klassifizierung von Bauprodukten, mit Ausnahme von Bodenbelägen.
- [152] Europäische Norm, DIN EN 13501-1, Januar 2010: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten, 13.10 Zusätzliche Klassifizierungen d0, d1, d2 des brennenden Abtropfens und/oder Abfallens.
- [153] Europäische Norm, deutsche Fassung, DIN EN 13501-1, Januar 2010: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten, 13.9 Zusätzliche Anforderungen s1, s2, s3 der Rauchentwicklung.
- [154] Deutsche Norm, DIN 4102-16, Mai 1998: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Durchführung von Brandschachtprüfungen, 4.3. Angrenzende Baustoffe, 4.4 Verbindungsmittel.
- [155] Deutsche Norm, DIN 4103-1, Juli 1984: Nichttragende innere Trennwände - Teil 1: Anforderungen und Nachweise.
- [156] Deutsche Norm, DIN 18516-1, Juni 2010: Außenwandbekleidungen, hinterlüftet - Teil 1 Anforderungen, Prüfungsgrundsätze.
- [157] Deutsche Norm, DIN 18516-1, Juni 2010: Außenwandbekleidungen, hinterlüftet - Teil 1 Anforderungen, Prüfungsgrundsätze.
- [158] Deutsche Norm, DIN 18516-1, Juni 2010: Außenwandbekleidungen, hinterlüftet - Teil 1 Anforderungen, Prüfungsgrundsätze, 1, 4.1. Allgemeines.
- [159] "Trespa-Meteor/FR-KR" Fassadensystem, Z-33.2-10, 31.01.2008: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, 3.1 Standsicherheitsnachweis.
- [160] "Trespa-Meteor/FR-KR" Fassadensystem, Z-33.2-10, 31.01.2008: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung.
- [161] Deutsche Norm, DIN 18516-1, Juni 2010: Außenwandbekleidungen, hinterlüftet - Teil 1: Anforderungen und Prüfungsgrundsätze, 5.2.2. Temperatureinwirkungen, Quellen und Schwinden.

- [162] Deutsche Norm, DIN 1023-1, Mai 1996: Büromöbel Raumgliederungselemente Teil 1: Maße, zu letzt geprüft am 12.09.2014.
- [163] Deutsche Norm, DIN 1023-2, Januar 2001: Büromöbel Raumgliederungselemente Teil 2: Mechanische Sicherheitsanforderungen, zuletzt geprüft am 12.09.2014.
- [164] Deutsche Norm, DIN 1023-3, Januar 2001: Büromöbel Raumgliederungselemente Teil 2: Prüfung, zuletzt geprüft am 12.09.2014.
- [165] Deutsche Norm, DIN 4103-1, Mai 2012: Nichttragende innere Trennwände – Teil 1: Anforderungen und Nachweise, 3.1.1 Begriffe.
- [166] Deutsche Norm, DIN 4103-1, Mai 2012: Nichttragende innere Trennwände – Teil 1: Anforderungen und Nachweise, 5.1.5 Baustoffe, Bauteile, Verbindungen, Befestigungen.
- [167] Europäische Norm, DIN EN 15102, Dezember 2012: Dekorative Wandbekleidungen - Rollen- und Plattenform; Deutsche Fassung EN 15102:2007+A1:2011.
- [168] Europäische Norm, DIN EN 13238, Juni 2010: Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten - Konditionierungsverfahren und allgemeine Regeln für die Auswahl von Trägerplatten; Deutsche Fassung EN 13238:2010.
- [169] Europäische Norm, deutsche Fassung, DIN EN 15102, Januar 2008: Dekorative Wandbekleidungen - Rollen- und Plattenform, 4.3 Freisetzung gefährlicher Stoffe, 4.3.1.2.
- [170] Europäische Norm, DIN EN 16240, März 2014: Lichtdurchlässige, flache Massivplatten aus Polycarbonat (PC) für Innen- und Außenanwendungen an Dächern, Wänden und Decken – Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 16240:2013; 1. Anwendungsbereich.
- [171] TU Wien, Institute of Applied Synthetic Chemistry – Bereich Makromolekulare Chemie, Lichtstabilität. Online verfügbar unter: http://otech7.tuwien.ac.at/lichtst_sk_d.html
Zuletzt geprüft am: 20.05.13.
- [172] Europäische Norm - Entwurf, deutsche Fassung, E DIN EN 16240, Februar 2011: Lichtdurchlässige, flache, massive Platten aus Polycarbonat (PC) für Innen- und Außenanwendungen an Dächern, Wänden und Decken – Anforderungen und Prüfverfahren, 6.2. Prüfverfahren der künstlichen Alterung.
- [173] Deutsche Norm - Entwurf, DIN 1013, Dezember 2007: Lichtdurchlässige profilierte Platten aus Kunststoff für Innen- und Außenanwendungen für einschalige Dacheindeckungen, Wand- und Deckenbekleidungen – Anforderungen und Prüfverfahren.
- [174] Deutsche Norm - Entwurf, DIN 1013, Dezember 2007: Lichtdurchlässige profilierte Platten aus Kunststoff für Innen- und Außenanwendungen für einschalige Dacheindeckungen, Wand- und Deckenbekleidungen – Anforderungen und Prüfverfahren, 5.5 Dauerhaftigkeit, 5.8 Schlagfestigkeit, 6.3 Prüfverfahren der künstlichen Alterung, 6.4 Gelbwert, 6.5 Biege-/ Zugfestigkeit, 6.6 Beständigkeit gegen Wärmealterung, 6.8 Schlagfestigkeit.
- [175] Europäische Norm, deutsche Fassung - Entwurf, DIN EN 16153, September 2010: Lichtdurchlässige flache mehrwandige Platten aus Polycarbonat (PC) für Innen- und Außenanwendungen an Dächern, Wänden und Decken – Anforderungen und Prüfverfahren.
- [176] Europäische Norm, DIN EN 15534-5, April 2014: Verbundwerkstoffe aus cellulosehaltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) oder Naturfaserverbundwerkstoffe (NFC) genannt) - Teil 1: Prüfverfahren zur Beschreibung von Compounds und Erzeugnissen; Deutsche Fassung EN 15534-1:2014.
- [177] Europäische Norm - Entwurf, DIN EN 15534-5, September 2012: Verbundwerkstoffe aus Cellulose haltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) oder natürliche Faserverbundwerkstoffe (NFC) genannt) – Teil 5 Anforderungen an Profile und Platten für Wandbekleidungen, 4.4 Mechanische Eigenschaften.

- [178] Deutsche Norm - Entwurf. DIN EN 15534-1, September 2012: Verbundwerkstoffe aus Cellulose haltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) oder natürliche Faserverbundwerkstoffe (NFC) genannt) – Teil 1 Prüfverfahren zur Beschreibung von Formmassen und Erzeugnissen, 7.1.2.2 Profile für Wandbekleidungen.
- [179] Deutsche Norm - Entwurf. DIN EN 15534-1, September 2012: Verbundwerkstoffe aus Cellulose haltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) oder natürliche Faserverbundwerkstoffe (NFC) genannt) – Teil 1 Prüfverfahren zur Beschreibung von Formmassen und Erzeugnissen, 7.2, 7.3, 7.4.
- [180] Deutsche Norm - Entwurf. DIN EN 15534-1, September 2012: Verbundwerkstoffe aus Cellulose haltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) oder natürliche Faserverbundwerkstoffe (NFC) genannt) – Teil 1 Prüfverfahren zur Beschreibung von Formmassen und Erzeugnissen, 9 Thermische Eigenschaften.
- [181] Deutsche Norm - Entwurf. DIN EN 15534-5, September 2012: Verbundwerkstoffe aus Cellulose haltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) oder natürliche Faserverbundwerkstoffe (NFC) genannt) – Teil 5 Anforderungen an Profile und Platten für Wandbekleidungen, 4.4 mechanische Eigenschaften, Tabelle 4.
- [182] Deutsche Norm - Entwurf. DIN EN 15534-5, September 2012: Verbundwerkstoffe aus Cellulose haltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) oder natürliche Faserverbundwerkstoffe (NFC) genannt) – Teil 5 Anforderungen an Profile und Platten für Wandbekleidungen, 4.4.4 Beständigkeit der Erzeugnisse gegen Alterung und Feuchtigkeit, Tabelle 6.
- [183] Deutsche Norm - Entwurf. DIN EN 15534-5, September 2012: Verbundwerkstoffe aus Cellulose haltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) oder natürliche Faserverbundwerkstoffe (NFC) genannt) – Teil 5 Anforderungen an Profile und Platten für Wandbekleidungen, 4.4.4 Beständigkeit der Erzeugnisse gegen Alterung und Feuchtigkeit, Tabelle 6.
- [184] Deutsche Norm - Entwurf. DIN EN 15534-5, September 2012: Verbundwerkstoffe aus Cellulose haltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) oder natürliche Faserverbundwerkstoffe (NFC) genannt) – Teil 5 Anforderungen an Profile und Platten für Wandbekleidungen, 4.4.4 Beständigkeit der Erzeugnisse gegen Alterung und Feuchtigkeit, Tabelle 6.
- [185] Deutsche Norm - Entwurf. DIN EN 15534-5, September 2012: Verbundwerkstoffe aus Cellulose haltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) oder natürliche Faserverbundwerkstoffe (NFC) genannt) – Teil 5 Anforderungen an Profile und Platten für Wandbekleidungen, 4.4.6 Sonstige Eigenschaften, Tabelle 8 Beständigkeit gegen natürliche Alterung.
- [186] Deutsche Norm - Entwurf. DIN EN 15534-5, September 2012: Verbundwerkstoffe aus Cellulose haltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) oder natürliche Faserverbundwerkstoffe (NFC) genannt) – Teil 5 Anforderungen an Profile und Platten für Wandbekleidungen, 4.4.5 thermische Eigenschaften, Tabelle 7.
- [187] Deutsche Norm - Entwurf. DIN EN 15534-5, September 2012: Verbundwerkstoffe aus Cellulose haltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) oder natürliche Faserverbundwerkstoffe (NFC) genannt) – Teil 5 Anforderungen an Profile und Platten für Wandbekleidungen, 4.4.6 Sonstige Eigenschaften, Tabelle 9 Zusätzliche Eigenschaften.
- [188] Lehner, Stefan/ MPA Stuttgart (2007): Untersuchung des Alterungsverhaltens von Baustoffen/Bauprodukten im Hinblick auf das europäisch klassifizierte Brandverhalten nach DIN EN 13501-1 bei Prüfung im SBI nach DIN EN 13823. Online verfügbar unter http://www.mpa.uni-stuttgart.de/forschung/forschungsprojekte/fb_1/lehner.pdf, zuletzt geprüft am 05.07.2014.

- [189] eigene Tabelle unter Berücksichtigung der Musterbauordnung (MBO), der Vorschrift *UL94* 'Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Applications', der deutschen Normenreihe DIN 4102 'Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen', sowie der Europäischen Normenreihe DIN EN 13501 'Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten' (DIN EN13501).
- [190] Europäische Norm, DIN EN ISO 527, Juni 2012: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze (ISO 527-1:2012); Deutsche Fassung EN ISO 527-1:2012
- [191] Europäische Norm, DIN EN ISO 75, August 2013: Kunststoffe - Bestimmung der Wärmeformbeständigkeitstemperatur - Teil 1: Allgemeines Prüfverfahren (ISO 75-1:2013); Deutsche Fassung EN ISO 75-1:2013.
- [192] Europäische Union: Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 09. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates. In: Amtsblatt der Europäischen Union.
- [193] Bund Technischer Experten e.V. (Hg.) (2008): Arbeitsblatt der BTE-Arbeitsgruppe: Lebensdauer von Bauteilen, Zeitwerte. Essen.
- [194] Marvel GmbH: <http://www.marvel-display.de/bioresin.html#>; letzter Zugriff: 18.04.2013.
- [195] EconCore N.V.: www.econcore.com/?mi=4&si=7&PHPSESSID=9be026d78c108f5abc51757624218eb6 Letzter Zugriff: 18.04.2013.
- [196] Wacotech GmbH & Co. KG: http://wacotech.de/wacotech/wp-content/uploads/2011/03/TIMaxCA_UV+Temp_Stabilitaet.pdf Letzter Zugriff: 23.04.2013.
- [197] Isoflex AB: <http://www.isoflex.se/Moniflex.asp>, letzter Zugriff: 23.04.2013.
- [198] www.umwelt-wand.de/newsletter/nl7-4/isoflex.html. letzter Zugriff: 23.04.2013.
- [199] Wacotech GmbH & Co. KG: http://wacotech.de/wacotech/wp-content/uploads/2011/03/TIMaxCA_datentabellen.pdf, letzter Zugriff: 23.04.2013.
- [200] Bildquelle
Netcomposites: www.netcomposites.com/images/250311BiotexRoctool200.jpg
- [201] www.netcomposites.com/news/high-performance-flaxpla-biocomposites-to-be-demonstrated-at-jec-2011/6627, letzter Zugriff: 23.04.2013.
- [202] Composites Evolution: www.compositesevolution.com/Products/PFAPrepregs/tabid/107/Default.aspx, letzter Zugriff: 23.04.2013.
- [203] Composites Evolution: <http://www.compositesevolution.com/Portals/0/PFA%20Prepreg%20overview%20and%20data.pdf>, letzter Zugriff: 23.04.2013.
- [204] Dekodur GmbH: <http://www.dekodur.com/de/reystone-biokompositplatten.html>, letzter Zugriff: 23.04.2013.
- [205] Bildquelle
http://www.archello.com/sites/default/files/imagecache/header_detail_large/story/media/004_2.JPG
- [206] Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM: Fraunhofer zeigt Biofliesen und wärmebeständige Biopolymere. Internationale Grüne Woche. Pressemitteilung vom 14.01.2013. Online verfügbar unter <http://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2013/Januar/biofliesen-und-waermebestaendige-biopolymere.html>, zuletzt geprüft am 18.04.2013.
- [207] KOKOBOARD: <http://kokoboard.com/>, zuletzt geprüft am: 23.04.2013

- [208] 3DWaldecor: <http://www.3dwaldecor.com/> , zuletzt geprüft am: 23.04.2013
- [209] Nimbus Group GmbH: Rossoacoustic CP30 System. Raumgliederungssystem. Online verfügbar unter <http://rosso-acoustic.com/produkte/rossoacoustic-cp30>, zuletzt geprüft am 19.09.2014.
- [210] Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) (2012): Jahresbericht 2012, Lizenznehmer Seite 183. Online verfügbar unter http://www.energie.fraunhofer.de/de/bildmaterial/veranstaltungen-und-events/hannover-messe-2014/ibp-bauphysik/ibp_jahresbericht-2012.pdf.
- [211] Jahnz, M.; Schmidt, K./ Nimbus Group (2010): Raumgliederungselement mit Akustikfunktion, 2010 an Carmen Köhler/ ITKE.
- [212] Bildquelle: Raumprobe:
www.raumprobe.de/material/nimbus-gmbh/rossoacoustic-cp-30-transluzent/datenblatt/
- [213] LATI Industria Termoplastici S.p.A. (2009): LATIGEA - bioplastic based compounds. Online verfügbar unter http://www.lati.com/en/news/2009/latigea_bioplastic_based_compound.html, zuletzt geprüft am 19.09.2014.
- [214] SUPLA Material Technology CO. Ltd./ Taiwan. Online verfügbar unter http://www.supla-bioplastics.com/en/pro2_detail.php?id=175&class_list=38&class_name=86, zuletzt geprüft am 19.07.2014.
- [215] Tejin Ltd.: Highly Heat-resistant Bioplastic. Highly Heat-resistant Bioplastic. A New Material Solution for High Performance Eco-products. Online verfügbar unter <http://www.teijin.com/rd/technology/bioplastic/>, zuletzt geprüft am 19.07.2014.
- [216] NatureWorks LLC: High Performance & Productivity Grades. Online verfügbar unter <http://www.natureworkslc.com/Technical-Resources/High-Performance-Grades>, zuletzt geprüft am 19.07.2014.
- [217] Corbion Purac (07.10.2013): Corbion Purac and Innovia to develop temperature stable, transparent PLA films, zuletzt geprüft am 19.07.2014.
- [218] Bornemann, Steffen/ Folienwerk Wolfen (2011): Folienextrusion, 29.03.2011. Telefonat an Carmen Köhler/ ITKE.
- [219] Bauer, Marion/ Clarifoil UK (2010), 28.04.2010. Telefonat an Carmen Köhler/ ITKE.
- [220] Simon, F./ Simon Kunststofftechnik (2011): Spritzguss: perforierte Halbschale, 05.05.2011. persönlich an M./ Nimbus Group Jahnz, K./Nimbus Group Schmidt und C./ ITKE Köhler.
- [221] Endres, H.-J; Siebert-Raths, A. (2011): Engineering Biopolymers. Markets, Manufacturing, Properties and Applications. München: Hanser, page 182 – figure 5.35.
- [222] Silitech SA (01.07.2011): Bioresin Preisliste. Online verfügbar unter http://www.silitech.ch/upload/complement_info_fournisseur_d/24.pdf, zuletzt geprüft am 23.07.2014.
- [223] Briehl, Horst (2008): Chemie der Werkstoffe. 2. Aufl. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Seite 219-220.
- [224] Farrington, D. W.; Lunt, J.; Davies, S.; Blackburn, R. S.: Poly(lactic acid) fibers. Online verfügbar unter <http://de.scribd.com/doc/74634740/Acid-Polylactid-Fibers>, zuletzt geprüft am 12.12.2012.
- [225] Farrington, D. W.; Lunt, J.; Davies, S.; Blackburn, R. S.: Poly(lactic acid) fibers. Online verfügbar unter <http://de.scribd.com/doc/74634740/Acid-Polylactid-Fibers>, zuletzt geprüft am 12.12.2012.
- [226] Tozzi-Spadoni, F.; Seghizzi, A.; Patrìti, G. (09.01.2009): Process for the production of flame-retardant cellulose acetate fibers, am 09.01.2009. Anmeldenummer: 08100240.4. Veröffentlichungsnummer: EP1944394 B1, [0062].

- [227] W. Becker, Gerhard; Braun, Dietrich (06/1992): Polycarbonate, Polyacetale, Polyester, Celluloseester. Ludwig Bottenbruch (Hg.), Kunststoff-Handbuch 3/1. Technische Thermoplaste, Kapitel 3.7.8.1 Polycarbonate ohne Brandschutzausrüstung.
- [228] Reiff GmbH (Hg.): PET. (Kunststoffe 13/57). Online verfügbar unter http://www.mercateo.com/pdf/Reiff/354_PET_PETG.pdf.
- [229] Briehl, Horst (2008): Chemie der Werkstoffe. 2. Aufl. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Seite 220.
- [230] Nabaltec AG: Entflammbarkeit / Limiting Oxygen Index. Online verfügbar unter www.nabaltec.de/index.php?option=com_content&task=view&id=116&Itemid=253, zuletzt geprüft am 23.10.2014.
- [231] Sterzel, Hans-Josef (31.07.1993): Flammwidrig ausgerüstetes Polylactid und Copolylactid. Angemeldet durch BASF AG, 67063 Ludwigshafen, DE, am 31.07.1993. Veröffentlichungsnummer: DE4325849A1.
- [232] MAKROBLEND BC400 von Bayer MaterialScience. Online verfügbar unter: www.polymers.usa.bayer.com/products/index.cfm?mode=lit&pp_num=EB7C601C-DEAA-8A25-9F5D9F2B9F653F42&pg_num=39341295-03C4-3A9C-3DF83763655CF9F6.
- [233] SUPLA C-1003 von SUPLA Material Technology CO.,LTD. Online verfügbar unter: www.taiwantrade.com.tw/MAIN/en_front/searchserv.do?method=listProductProductDetail&company_id=269283&locale=2&catalog_id=546423&come_soon=0, zuletzt geprüft 01.09.2014.
- [234] Masatoshi Iji; Yukihiro Kiuchi (2012): Highly functional PLA composites used for electronic products. Herausgegeben von Nec Corporation - Green Innovation Research Laboratories. Online verfügbar unter: http://www.innovationtakesroot.com/~media/ITR2012/2012/presentations/durables/01_Highly-Functional-PLA-Composites_Iji_pdf.pdf, zuletzt geprüft am 23.02.2013.
- [235] LATIGEA B01-V0HF von LATI Industria Termoplastici, online verfügbar unter: www.materialsgate.de/de/mnews/5402/Halogenfrei+flammgesch%C3%BCtzt+Kunststoffe+aus+nachwachsenden+Rohstoffen.html.
- [236] Sterzel, Hans-Josef (31.07.1993): Flammwidrig ausgerüstetes Polylactid und Copolylactid. Angemeldet durch BASF AG, 67063 Ludwigshafen, DE, am 31.07.1993. Veröffentlichungsnummer: DE4325849A1.
- [237] Dubois, Philippe; Murariu, Marius; Alexandre, Michael; Degee, Philippe; Bourbigot, Serge; Delobel, Rene; Fontaine, Gaelle; Devaux, Eric (Jul 22, 2010): Polylactide-based compositions, Publication number US20100184894 A1; PCT/EP2008/051295.
- [238] Hanwen Xiao (2010): Synergistic effects on nonisothermal po-ly(lactic acid) crystallization. In: *Plastics Research Online Society of Plastics Engineers*, H. 10.1002/spepro.003065.
- [239] Serge Bourbigot; Gaelle Fontaine (2010): Flame retardancy of polylactide: an overview. In: *Polymer Chemistry -The Royal Society of Chemistry*, H. 1, S. 1416.
- [240] Serge Bourbigot; Gaelle Fontaine (2010): Flame retardancy of polylactide: an overview. In: *Polymer Chemistry -The Royal Society of Chemistry*, H. 1, S. 1417.
- [241] Marion Bauer (21.09.2010): Flammschutz ausgerüstete Cellulosediacetatfolien. E-mail an Carmen Köhler. <http://www.clarifoil.com/content.asp?ContentId=10&Page=Technical&lan=>; letzter Zugriff: 24.02.2013.
- [242] TiMax CA von Wacotech GmbH & Co. KG; http://wacotech.de/wacotech/?page_id=186 Letzter Zugriff: 24.02.2013.

- [243] SUKANO AG: Products & Services. Sukano PLA Masterbatches. Online verfügbar unter <http://www.bio-plastics.org/de/component/content/article/1672-161sukanoarticle>, zuletzt geprüft am 12.10.2014.
- [244] Menges, Haberstroh, Michaeli, Schmachtenberg (2002): Werkstoffkunde Kunststoffe. 5. Aufl. Hanser Fachbuch (Hg.), 4.4.3. Nanocomposite, Seite 80-84.
- [245] www.nanoproducts.de/index.php?mp=products&file=info&cPath=7&products_id=78; letzter Zugriff: 21.06.13
- [246] Ceresana Research (2014): Marktstudie Flammschutzmittel. 3. Auflage. Online verfügbar unter www.ceresana.com/de/marktstudien/additive/flammschutzmittel/, zuletzt geprüft am 23.10.2014.
- [247] DOW Chemical Company: PARALOID™ BPMS-260. Online verfügbar unter <http://www.dow.com/products/market/packaging/product-line/paraloid-bpms/product/paraloid-bpms-260/>, zuletzt geprüft am 23.10.2014.
- [248] Disflamoll® TP von Lanxess. Datenblatt online verfügbar unter: http://techcenter.lanxess.com/fcc/emea/de/products/datasheet/Disflamoll_TP.pdf?docId=8647583&gid=8647580&pid=776; letzter Zugriff: 24.02.2013
- [249] www.enius.de/schadstoffe/phosphorsaeureester.html; letzter Zugriff: 24.02.2013
- [250] Phosphorus, Inorganic and Nitrogen Flame Retardants Association: Innovative and sustainable flame retardants in transportation. PINFA, Brussels (2010). online verfügbar unter: www.pinfa.org/uploads/Documents/PINFA_Transportation_Brochure_2010_Final_Version.pdf
- [251] Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (Hg.) (2012), Endbericht zum Forschungsvorhaben - Untersuchung der Belastung von Erwachsenen und Kindern mit Organophosphat-Flammschutzmitteln, Online verfügbar unter: http://www.lgl.bayern.de/gesundheits/Arbeitsplatz_Umwelt/Projekte_a_z/doc/Bericht_Organophosphat_kurz.pdf, zuletzt geprüft am 30.05.2013.
- [252] Nakamura, A./ National Institute for Hygienic Sciences Japan (1991): ENVIRONMENTAL HEALTH CRITERIA 111. TRIPHENYL PHOSPHATE. Hg. v. United Nations Environment Programme, International Labour Organisation und World Health Organization. Online verfügbar unter <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc111.htm#SectionNumber:11.1>, zuletzt geprüft am 04.08.2014.
- [253] Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (Hg.) (2012), Endbericht zum Forschungsvorhaben - Untersuchung der Belastung von Erwachsenen und Kindern mit Organophosphat-Flammschutzmitteln, Online verfügbar unter www.lgl.bayern.de/gesundheits/Arbeitsplatz_Umwelt/Projekte_a_z/doc/Bericht_Organophosphat_kurz.pdf; zuletzt geprüft am 30.05.2013.
- [254] Disflamoll® TP von Lanxess Deutschland GmbH. Datenblatt online verfügbar unter http://techcenter.lanxess.com/fcc/emea/de/products/datasheet/Disflamoll_TP.pdf?docId=8647583&gid=8647580&pid=776 letzter Zugriff: 24.02.2013
- [255] Otto Maurer/ Lanxess Deutschland GmbH (07.04.2011). E-Mail an Carmen Köhler ITKE Uni Stuttgart.
- [256] Jed Randall, Research Scientist/ Ingeo Product Development NatureWorks LLC (10.05.2011). E-Mail an Carmen Köhler ITKE Uni Stuttgart.
- [257] Pieper, Werner; Staendeke, Horst; Elsner, Georg: Verfahren zur Herstellung von hydrolysestabilen, feinteiligen Flammschutzmitteln auf der Basis von Ammoniumpolyphosphat. Angemeldet durch HOECHST AKTIENGESELLSCHAFT. Veröffentlichungsnummer: EP 0 180 795 A1.
- [258] (2009): Product Data Sheet - Flame Retardants. EUCAM 375. Ammonium Polyphosphate. Herausgegeben von EndoTherm Brandschutz, Edition 03.11.2009.

-
- [259] E. Breitbach, M. Sinapius (2004): Stand und Perspektiven des Faserverbundeleichtbaus und der Adaptronik. Herausgegeben von DLR. Institut für Strukturmechanik, S. 3.3.1.4. Brandsicherheit für Schienenfahrzeuge.
- [260] (2009): Product Data Sheet - Flame Retardants. EUCAM 375. Ammonium Polyphosphate. Herausgegeben von EndoTherm Brandschutz, Edition 03.11.2009.
- [261] Adrian Beard (Januar 2004): Flammenschutzmittel. Häufig gestellte Fragen. Unter Mitarbeit von Clariant GmbH. Herausgegeben von Europäischer Verband der Flammenschutzmittel-Hersteller EFRA. Brüssel, Januar 2004.
- [262] Krahn Chemie: www.krahn.de/de/produkte/produkte-nach-segment/produkt-details/5/1/0/a/arichem/; letzter Zugriff: 19.06.13.
- [263] Marcel Wiesner, Krahn Chemie: Arichem: Flammenschutz für Polycarbonat.
- [264] Grellmann, Wolfgang; Seidler, Sabine (2011): Kunststoffprüfung. 2. Aufl. München: Carl Hanser Verlag; 11.1.1 Grundlagen und Definitionen, Seite 591.
- [265] Grellmann, Wolfgang; Seidler, Sabine (2011): Kunststoffprüfung. 2. Aufl. München: Carl Hanser Verlag; 11.1.2 Wärmeformbeständigkeitstemperatur HDT, Seite 593.
- [266] Grellmann, Wolfgang; Seidler, Sabine (2011): Kunststoffprüfung. 2. Aufl. München: Carl Hanser Verlag; Wärmeformbeständigkeitstemperatur HDT, Seite 593-595.
- [267] Zwick International: www.zwickroell.co.za/de/anwendungen/kunststoff/haertbare-und-thermoplastische-formmasse/bestimmung-hdt-und-vicat-erweichungstemperatur-vst.html, letzter Zugriff 09.01.14
- [268] Grellmann, Wolfgang; Seidler, Sabine (2011): Kunststoffprüfung. 2. Aufl. München: Carl Hanser Verlag; 11.1.2 VICAT-Erweichungstemperatur, Seite 592.
- [269] www.ktec.at/pdf/PETG_allgem_Materialinformation_ktec.pdf
letzter Zugriff: 02.07.13
- [270] <http://www.fapa-gmbh.de/technikcenter/PC.pdf>, letzter Zugriff: 02.07.13.
- [271] http://www.acrylglastechnik.at/Datenblatt/Db_PMMA.pdf, letzter Zugriff: 02.07.13.
- [272] <http://www.huettig.de/cgi-bin/riweta.cgi?nr=1411&lng=1>, letzter Zugriff: 21.06.13.
- [273] Kern GmbH: <http://www.kern.de/cgi-bin/riweta.cgi?nr=2690&lng=1>, letzter Zugriff: 21.06.13
- [274] Datenblatt der Firma Mazzucchelli 1849
- [275] Georg Menges, Edmund Haberstroh, Walter Michaeli, Ernst Schmachtenberg (2002): Weststoffkunde Kunststoffe. Hanser Verlag
- [276] G.W. Becker, Ludwig Bottenbruch, Rudolf Binsack, D. Braun (1998): *Technische Thermoplaste. 4. Polyamide*. Hanser Verlag.
- [277] Andrej Holzer, Fraunhofer Institut Chemische Technologie-Polymer Engineering (11.08.2011): Gespräch im Rahmen der Compoundierungsversuche am Fraunhofer ICT. persönliche Mitteilung an Carmen Köhler/ ITKE, Universität Stuttgart.
- [278] Marco Jungmeier: Definition Kühlzeit, Kunststoff Know-how, <http://www.kunststoff-know-how.de/index.php?K%C3%BChlzeit.html>, letzter Zugriff: 03.08.13
- [279] Susanne Lüssenheide/Tech-Service Fraunhofer Institut Chemische Technologie (September 2011): Prüfbericht Ermittlung HDT – teilweise zu große Abweichungen der Einzelwerte. E-Mail an Carmen Köhler/ ITKE, Uni Stuttgart.
- [280] Fachverband der Kunststoffrohr-Industrie (Hg.): Wissensportal für Kunststoffrohr-Systeme. Online verfügbar unter <http://www.wipo.krv.de/begriffserklaerungen/36-tempenn.html>, zuletzt geprüft am 16.01.2014.

- [281] Michael Jahnz / Nimbus Group, Katharina Schmidt / . Nimbus Group (Dezember 2011): Transparente und transluzente Leichtbauplatten aus nachwachsenden Rohstoffen als Raumgliederungselemente mit Akustikfunktion. DBU Endbericht. Stuttgart.
- [282] Bayerischer Rundfunk, Anstalt öffentlichen Rechts (Hg.) (2008): Kann man hinter einer Glasscheibe braun werden? Online verfügbar unter <http://www.wdr.de/tv/kopfball/sendungsbeitraege/2008/0511/glasscheibe.jsp>.
- [283] Endres, Hans-Josef; Siebert-Raths, Andrea (2009): Technische Biopolymere. Rahmenbedingungen, Marktsituation, Herstellung, Aufbau und Eigenschaften. München: Hanser, Seite 100.
- [284] Deutsche Norm, DIN 50035, September 2009: Begriffe auf dem Gebiet der Alterung von Materialien – Polymere Werkstoffe.
- [285] Endres, H.-J.; Siebert-Raths, A. (2011): Engineering Biopolymers. Markets, Manufacturing, Properties and Applications. Seite 100. München: Hanser.
- [286] Deutscher Wetterdienst (DWD): Jährliche Strahlungskarten für Deutschland ab 1998. Flächendeckende Jahressumme der Globalstrahlung für das Jahr 2013. Online verfügbar unter http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_result_page&portletMasterPortlet_i1gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima__Umwelt%2FKlimagutachten%2FTech__Gutachten%2FNav__Solarenergie%2FDownload__node.html%3F__nnn%3Dtrue#an646002, zuletzt geprüft am 14.05.2014.
- [287] RWE Bau-Handbuch (Hg.) (2004): VWEW Energieverlag (13) Seite 17/7, Abb.17-7.
- [288] Wendt, Uwe: Zeitraffung und Intensivierung. Hg. v. Atlas Material Testing Technology. Seiten 25-26. Online verfügbar unter <http://www.calculand.com/einheiten-umrechnen/?gruppe=Bestrahlung&einheit=Wattsekunde+pro+Quadratmeter+%5BWs%2Fm%C2%B2%5D>, zuletzt geprüft am 26.08.2014.
- [289] Atlas Material Testing Solutions: Zeitraffung und Intensivierung, Seite 26. Online verfügbar unter http://www.zwick.de/fileadmin/content/testXpo/Vortraege/2013/Abstrakte/Atlas_Uwe_Wendt.pdf, zuletzt geprüft am 14.05.2014.
- [290] Chemgapedia. Hg. v. Wiley Information Services GmbH. Online verfügbar unter <http://www.chemgapedia.de/vsengine/glossary/de/streckgrenze.glos.html>, zuletzt geprüft am 01.08.2014.
- [291] Grellmann, W.; Seidler, S. (2011): Kunststoffprüfung. 2. Aufl. München: Carl Hans Verlag, Seite 126.
- [292] Grellmann, W.; Seidler, S. (2011): Kunststoffprüfung. 2. Aufl. München: Carl Hans Verlag, Seite 123.
- [293] Datenblatt Polycarbonat: www.materialdatacenter.com/ms/de/Makrolon/Bayer+MaterialScience/Makrolon%C2%AE+2405/986598f8/410
- [294] k-tec GmbH: Materialinformationen Polyethylenterephthalat Glykol (PETG). Online verfügbar unter http://www.ktec.at/pdf/PETG_allgem_Materialinformation_ktec.pdf, zuletzt geprüft am 22.05.2014.
- [295] Simona AG (02/2014): SIMONA@SIMOPOR. Die Produktfamilie der leichten PVC-Freischäumplatten. Online verfügbar unter <http://www.simona.de/static/sites/default/de/assets/Informationsmaterial/deutsch/flyer/SIMOPOR-deutsch.pdf>, zuletzt geprüft am 04.06.2014.
- [296] DuPont (2010): DuPont Biomax Strong. PLA TOUGHENING MODIFIER. Online verfügbar unter http://www.dupont.com/content/dam/assets/products-and-services/packaging-materials-solutions/assets/Biomax_Strong.pdf.
- [297] Evonik Industries AG: PLEXIGLAS. PLEXIGLAS Resist zk50 (2.2013). Online verfügbar unter http://www.plexiglas-polymers.de/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Product/PLEXIGLAS-Molding-Compounds/de/Produktinformationen/PLEXIGLAS%20zk50_D.pdf, zuletzt geprüft am 11.07.2014.

- [298] Kern GmbH (2014): Polycarbonat (PC). Online verfügbar unter <http://www.kern.de/cgi-bin/riweta.cgi?nr=2301&lng=1&popup=1>, zuletzt geprüft am 11.07.2014.
- [299] Auer Kunststofftechnik: Werkstoffdatenblatt. Polyethylenterephthalat (PET). Online verfügbar unter <http://www.auer-kunststofftechnik.de/pdf/Datenblatt%20PET%2070156.pdf>, zuletzt geprüft am 11.07.2014.
- [300] Bildquelle: RaumPROBE Stuttgart: <http://www.raumprobe.de/material/nimbus-gmbh/rossoacoustic-cp-30-transluzent/datenblatt/>, letzter Zugriff: 24.07.2014.
- [301] Bildquelle: Fotografie Manfred Richard Hammer/ ITKE Universität Stuttgart.
- [302] Ganz, Daniel/ SUKANO AG (2011): Additive für Polylactid, 23.08.2011. Telefonat an Carmen Köhler/ ITKE.
- [303] TÜV Rheinland DIN CERTCO: Zertifizierung von Produkten. Online verfügbar unter http://www.dincertco.de/de/dincertco/produkte_leistungen/zertifizierung_produkte/umwelt_1/biobasierte_produkte/biobasierte_produkte_mehr_nachhaltigkeit.html. zuletzt geprüft am 30.07.2014.
- [304] Vinçotte - Certest Products: OK biobased. Online verfügbar unter <http://www.okcompost.be/en/recognising-ok-environment-logos/ok-biobased/>, zuletzt geprüft am 30.07.2014.
- [305] Preisanfrage für Compoundierung bei Tecnar GmbH. Lanxess (2012) Kosten für Disflamoll® TP 14€/ Kg. Telefonat Carmen Köhler.
- [306] Simon, Florian/ Simon Kunststofftechnik (2012): Angebot für Stückkosten der Akustik-Halbschalen an Jahnz, Michael/ nimbus.
- [307] Bodo Müller Chemie: Prozess- und Hitzestabilisatoren. Online verfügbar unter <http://www.bm-chemie.de/de/produkte/kunststoffe/stabilisatoren/stabilisatoren.php>, zuletzt geprüft am 31.07.2014.
- [308] Resysta International GmbH: Was ist Resysta? Online verfügbar unter <http://www.resysta.com/de/was-ist-resysta.html>, zuletzt geprüft am 08.08.2014.
- [309] UPM: Innovativer Rohstoffeinsatz. Online verfügbar unter <http://www.upmprofi.com/de/material/rohstoff/Pages/default.aspx>, zuletzt geprüft am 08.08.2014.
- [310] Duralmond. Online verfügbar unter <http://duralmond.com/en/duralmond>, zuletzt geprüft am 08.08.2014.
- [311] Studio Marco Vermeulen. 08.08.2014. Online verfügbar unter <http://marcovermeulen.eu/projecten/selectie/122/gasontvangst-station/english/>.
- [312] Helmut Lingemann GmbH & Co. KG: Helima. NIROTEC EVO. Online verfügbar unter <http://www.helima.de/start/news/news-detailanzeige/datum/2014/01/15/nirotec-evo/>, zuletzt geprüft am 09.08.2014.
- [313] Bioplastics Magazine: Bioplastics Award 2013. Helmut Lingemann GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter http://www.bioplasticsmagazine.com/en/events/bioplastics_award_2013.php, zuletzt geprüft am 09.09.2014.
- [314] Desowag Materialschutz GmbH (1987): Vergrauung von Holz: Fraunhofer IRB. Online verfügbar unter www.baufachinformation.de/denkmalpflege.jsp?md=1987057100982, zuletzt geprüft am 09.08.2014.
- [315] Deutsche Norm, DIN 18516-1, Juni 2010: Außenwandbekleidungen, hinterlüftet - Teil 1: Anforderungen und Prüfungsgrundsätze, 5.2.2. Temperatureinwirkungen, Quellen und Schwinden.
- [316] Bund Technischer Experten e.V. (Hg.) (2008): Arbeitsblatt der BTE-Arbeitsgruppe: Lebensdauer von Bauteilen, Zeitwerte. Essen.
- [317] Uske, K.; Ebenaus, A. (2013): Ein Plädoyer für den roten Phosphor. Hg. v. München Carl Hanser Verlag (Kunststoffe, 09/13), zuletzt geprüft am 12.08.2014.

- [318] EFRA - Europäischer Verband der Flammschutzmittelhersteller (2004): Flammschutzmittel - häufig gestellte Fragen. Hg. v. EFRA - Europäischer Verband der Flammschutzmittelhersteller. Seite 19. Online verfügbar unter <http://www.allinova.de/products/flame/explanation/efra06du.pdf/>, zuletzt geprüft am 13.08.2014.
- [319] Leisewitz, A.; Kruse, E.; Schramm, E. (2000): Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen zur Substitution umweltrelevanter Flammschutzmittel. Band I: Ergebnisse und zusammenfassende Übersicht. Forschungsbericht 204 08 542 (alt) 297 44 542 (neu). Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/1965.pdf>, zuletzt geprüft am 13.08.2014.
- [320] Umweltbundesamt (2008): Bromierte Flammschutzmittel – Schutzengel mit schlechten Eigenschaften? Hg. v. Umweltbundesamt (Hintergrundpapier). Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3521.pdf>, zuletzt geprüft am 13.08.2014.
- [321] Bildquelle:
CHIP FOTO-VIDEO (2011) Galerie Wettbewerb "Fassaden" -
http://img.galerie.chip.de/imgserver/communityimages/773800/773854/original_76D33E59CD5047897B28E41BA4BD7FD9.jpg, zuletzt geprüft: 12.08.2014.
- [322] Rückschloss, J.: Lignin in der Elektronik. Fachkongress „Biobasierte Polymere – Kunststoffe der Zukunft“. Fraunhofer IZM. Online verfügbar unter http://www.fnr-server.de/cms35/fileadmin/allgemein/pdf/veranstaltungen/Biopolymere-Kongress_Sep_2012/Mi_14.15_R%C3%BCckschloss.pdf, zuletzt geprüft am 14.08.2014.
- [323] Gupta, Heinz B. P. (Hg.): Expandierbarer Graphit. PU Magazin 2001 (11). Ratingen: Gupta.
- [324] Promodent Invest. Online verfügbar unter <http://promodentchem.com/analog-brand-product/13036>, zuletzt geprüft am 14.08.2014.
- [325] EFRA - Europäischer Verband der Flammschutzmittelhersteller (2004): Flammschutzmittel – häufig gestellte Fragen. Hg. v. EFRA - Europäischer Verband der Flammschutzmittelhersteller. Seite 25. Online verfügbar unter <http://www.allinova.de/products/flame/explanation/efra06du.pdf/>, zuletzt geprüft am 13.08.2014.
- [326] EN ISO 4892-3:2006, Mai 2006: Kunststoffe - Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten Teil 3: UV-Leuchtstofflampen (ISO 4892-3:2006), zuletzt geprüft am 26.08.2014.
- [327] Wageringel, Holger: Private Wetterstation Stuttgart-Stammheim. Online verfügbar unter <http://www.wageringel.de/archiv.php>, zuletzt geprüft am 21.08.2014.
- [328] http://de.wikipedia.org/wiki/Delta_E#cite_note-1; zuletzt geprüft am 22.08.2014
- [329] DIN 67530, Januar 1982: Reflektormeter als Hilfsmittel zur Glanzbeurteilung an ebenen Anstrich- und Kunststoff-Oberflächen.
- [330] FMTS Farbmessstechnik Schröder: Glanzmessgeräte richtig einsetzen und einkaufen. Leitfaden zur Ermittlung des richtigen Glanzmessgerätes und Übersicht zum Stand der Technik der verschiedenen Gerätehersteller. Online verfügbar unter <http://www.farbmessung.com/assets/applets/Glanzmessung.pdf>, zuletzt geprüft am 24.08.2014.
- [331] DIN 67530, Januar 1982: Reflektormeter als Hilfsmittel zur Glanzbeurteilung an ebenen Anstrich- und Kunststoff-Oberflächen.
- [332] Wageringel, Holger: Private Wetterstation Stuttgart-Stammheim. Online verfügbar unter <http://www.wageringel.de/archiv.php>, zuletzt geprüft am 21.08.2014.
- [333] Tejin Ltd.: Highly Heat-resistant Bioplastic. Freely adjustable hydrolysis durability - hydrolysis control technique. Online verfügbar unter <http://www.teijin.com/rd/technology/bioplastic/>, zuletzt geprüft am 09.09.2014.
- [334] Tanaka, Shukichi; Kiuchi, Yukihiro; Iji, Masatoshi (2009): POLYLACTIC ACID-MODIFIED POLY-CARBODIIMIDE COMPOUND AND POLYLACTIC ACID RESIN COMPOSITION AND MOLDED ARTICLE COMPRISING THE SAME am 28.05.2009. Anmeldenr: 20090137748. Veröffentlichungsnr: AC08L6700FI.

- [335] Tejin Ltd.: Highly Heat-resistant Bioplastic. Freely adjustable hydrolysis durability - hydrolysis control technique. BIOFRONT grade J201: Stereocomplex PLA (Hydrolysis-resistant grade); BIOFRONT HL grade L201: PLLA (Hydrolysis-resistant grade). Online verfügbar unter <http://www.teijin.com/rd/technology/bioplastic/>, zuletzt geprüft am 09.09.2014.
- [336] DIN EN ISO 62, Mai 2008: Kunststoffe - Bestimmung der Wasseraufnahme (ISO 62:2008), zuletzt geprüft am 01.09.2014.
- [337] DIN EN ISO 62, Mai 2008: Kunststoffe - Bestimmung der Wasseraufnahme (ISO 62:2008), 5.6 Probekörper aus Fertigprodukten, Strangpressteilen, Platten und Laminaten; zuletzt geprüft am 01.09.2014.
- [338] DIN EN ISO 62, Mai 2008: Kunststoffe - Bestimmung der Wasseraufnahme (ISO 62:2008), 4 Prüfeinrichtung, Strangpressteilen, Platten und Laminaten; zuletzt geprüft am 01.09.2014.
- [339] AHLBORN KUNSTSTOFFE: PLA-LF Halbzeug Platten Stäbe Vollstab Hohlstab Profile. Online verfügbar unter <http://www.biopolymer.at/index.php/produkte-bioplastik-nachwachsend-recycling-biopolymer/pla-pla-v-pla-n-pla-wf-nachwachsende-rohstoffe-biologisch-abbaubar/pla-lf-polymilchsaure-holzfasern-platten-staebe-halbzeug-vollstab-hohlstab.html>, zuletzt geprüft am 19.08.2014.
- [340] DIN EN ISO 75-2, August 2013: Kunststoffe - Bestimmung der Wärmeformbeständigkeitstemperatur - Teil 2: Kunststoffe und Hartgummi (ISO 75-2:2013, zuletzt geprüft am 02.09.2014.
- [341] Entwurf DIN EN ISO 3167, März 2014: Kunststoffe – Vielzweckprobekörper, zuletzt geprüft am 02.09.2014.
- [342] NatureWorks LLC: Ingeo™ Biopolymer 3251D Technical Data Sheet. Injection Molding Process Guide. Online verfügbar unter http://www.natureworkslc.com/~media/Technical_Resources/Technical_Data_Sheets/TechnicalDataSheet_3251D_injection-molding_pdf.pdf, zuletzt geprüft am 02.08.2014.
- [343] NatureWorks LLC: Ingeo™ Biopolymer 3251D Technical Data Sheet. Injection Molding Process Guide. Online verfügbar unter http://www.natureworkslc.com/~media/Technical_Resources/Technical_Data_Sheets/TechnicalDataSheet_3251D_injection-molding_pdf.pdf, zuletzt geprüft am 02.08.2014.
- [344] Daniel Ganz/ SUKANO AG (2011): Additive für Polylactid, 23.08.2011. Telefonat an Carmen Köhler/ ITKE.
- [345] Endres, H.-J; Siebert-Raths, A. (2011): Engineering Biopolymers. Markets, Manufacturing, Properties and Applications. Figures 5.52. München: Hanser.
- [346] plasticker: Rohstoff & Preise. Preisentwicklung für PC Granulat. Online verfügbar unter http://plasticker.de/preise/preise_monat_single.php, zuletzt geprüft am 02.09.2014.
- [347] Kattner, Lars/ EndoTherm Brandschutz (2011): Brandschutzadditiv EUCAM 375, 06.04.2011. E-Mail an Carmen Köhler/ ITKE.
- [348] Ganz, Daniel/ SUKANO AG (2011): Offerte 11-PW-270 Preis SUKANO PLA na S516, 07.09.2011. Schriftlich an Carmen Köhler/ ITKE.
- [349] NEC Corporation: Tackling the development of biomass-based plastics -Bioplastics for electronic equipment-. Kenaf fiber-reinforced polylactic acid. Online verfügbar unter http://www.nec.com/en/global/rd/innovative/bioplastics/03_1.html, zuletzt geprüft am 10.09.2014.
- [350] Steinbach, Christoph /DECHEMA e.V; Nau, Katja / Karlsruher Institut für Technologie Institut für Angewandte Informatik: Cellulose - Materialinfo. DaNa2.0 - Daten und Wissen zu Nanomaterialien. Hg. v. DECHEMA e.V. Online verfügbar unter <http://nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/cellulose/materialinfo-cellulose>, zuletzt geprüft am 10.09.2014.
- [351] CelluForce: Properties. Online verfügbar unter http://www.celluforce.com/en/product_properties.php, zuletzt geprüft am 10.09.2014.

- [352] Bildquelle: slashphone. NEC N701i ECO. Online verfügbar unter <http://www.slashphone.com/uploads/3204/n011.jpg>, zuletzt geprüft am 10.09.2014.
- [353] Bildquelle: capitanplaneta. Online verfügbar unter <http://www.capitanplaneta.com/wp-content/uploads/2012/05/Kenaf2.jpg>, zuletzt geprüft am 10.09.2014.
- [354] Bildquelle: Stovia Katatan Pribadi (2012): Proses Pengolahan Kenaf. Online verfügbar unter <http://stovia-catatanpribadi.blogspot.de/2012/04/proses-pengolahan-kenaf.html>, zuletzt geprüft am 10.09.2014.
- [355] Bildquelle: Polymet Jena: Anwendung in der Medizin. Online verfügbar unter <http://www.polymet-jena.de/de/nanocellulose/anwendung-in-der-medizin.html>, zuletzt geprüft am 10.09.2014.
- [356] Rizvi, Reza; Tong, Lemuel; Naguib, Hani: Processing and properties of melt spun polylactide–multiwall carbon nanotube fiber composites. In: Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, Volume 52, Issue 6, 15 March 2014, S. 477–484. Online verfügbar unter <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/polb.23441/full>, zuletzt geprüft am 10.09.2014.
- [357] Affolter, Samuel: Langzeitverhalten von Thermoplasten. Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs (NTB). Seite 9. Online verfügbar unter http://institute.ntb.ch/fileadmin/Institute/MNT/pdf/NTB_MNT_Polymeric_Alterung_SA.pdf, zuletzt geprüft am 10.09.2014.
- [358] Bechtold, Karl; Faoro, Gerd: Sonnenschutz - Wie Lichtschutzmittel die Lebensdauer einer Beschichtung verlängern. In: Aktuelle Wochenschau GDCh. Online verfügbar unter <http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/2007/woche44/woche44.html>, zuletzt geprüft am 10.09.2014.
- [359] Tejin Ltd.: Highly Heat-resistant Bioplastic. Freely adjustable hydrolysis durability - hydrolysis control technique. Online verfügbar unter <http://www.teijin.com/rd/technology/bioplastic/>, zuletzt geprüft am 09.09.2014.
- [360] Affolter, Samuel: Langzeitverhalten von Thermoplasten. Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs (NTB). Seite 9. Online verfügbar unter http://institute.ntb.ch/fileadmin/Institute/MNT/pdf/NTB_MNT_Polymeric_Alterung_SA.pdf, zuletzt geprüft am 10.09.2014.
- [361] Affolter, Samuel: Langzeitverhalten von Thermoplasten. Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs (NTB). Seite 9. Online verfügbar unter http://institute.ntb.ch/fileadmin/Institute/MNT/pdf/NTB_MNT_Polymeric_Alterung_SA.pdf, zuletzt geprüft am 10.09.2014.
- [362] Affolter, Samuel: Langzeitverhalten von Thermoplasten. Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs (NTB). Seite 8. Online verfügbar unter http://institute.ntb.ch/fileadmin/Institute/MNT/pdf/NTB_MNT_Polymeric_Alterung_SA.pdf, zuletzt geprüft am 10.09.2014.
- [363] HTI Feldtmann KG: Brandverhalten von PVC-U. Online verfügbar unter http://www.hti-feldtmann.de/standard/page.cfm/details/eintrag_id=443/content_id=136/185, zuletzt geprüft am 11.09.2014.
- [364] Acuplastics: Technische Werte ABS, PS/SB, PMMA. Online verfügbar unter <http://www.akuplastics.com/gehrfile/tech3d.htm>, zuletzt geprüft am 11.09.2014.
- [365] Tejin Industries: Highly Heat-resistant Bioplastic. A New Material Solution for High Performance Eco-products. BIOFRONT grade J201: Stereocomplex PLA (Hydrolysis-resistant grade). Online verfügbar unter <http://www.teijin.com/rd/technology/bioplastic/>, zuletzt geprüft am 23.04.2014.
- [366] SUPLA Material Technology CO. Ltd./ Taiwan. Online verfügbar unter www.supla-bioplastics.com/en/pro2_detail.php?id=175&class_list=38&class_name=86, zuletzt geprüft am 19.07.2014.
- [367] Engineering.com (05.02.2014): Heat-Resistant PLA Could Expand 3D Printing Capabilities. Online verfügbar unter <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/7087/Heat-Resistant-PLA-Could-Expand-3D-Printing-Capabilities.aspx11.0>, zuletzt geprüft am 11.09.2014.

- [368] Bildquelle: Engineering.com (05.02.2014): Heat-Resistant PLA Could Expand 3D Printing Capabilities. Online verfügbar unter <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/7087/Heat-Resistant-PLA-Could-Expand-3D-Printing-Capabilities.aspx>11.0, zuletzt geprüft am 11.09.2014.
- [369] Bildquelle: Harvard (02.02.2012): As strong as an insect's shell. Wyss research takes cue from nature to create tough, low-cost material. Harvard Gazette. Javier Fernandez, Donald Ingber. Online verfügbar unter <http://news.harvard.edu/gazette/story/2012/02/as-strong-as-an-insect%E2%80%99s-shell/>, zuletzt geprüft am 12.09.2014.
- [370] Bildquelle: Heise Online (12.01.2014): 3D-Druck mit Glasfaser und Carbon. Online verfügbar unter <http://www.heise.de/hardware-hacks/meldung/3D-Druck-mit-Glasfaser-und-Carbon-2100067.html>, zuletzt geprüft am 12.09.2014.
- [371] Harvard (02.02.2012): As strong as an insect's shell. Wyss research takes cue from nature to create tough, low-cost material. Harvard Gazette. Javier Fernandez, Donald Ingber. Online verfügbar unter <http://news.harvard.edu/gazette/story/2012/02/as-strong-as-an-insect%E2%80%99s-shell/>, zuletzt geprüft am 12.09.2014.
- [372] Heise Online (12.01.2014): 3D-Druck mit Glasfaser und Carbon. Online verfügbar unter www.heise.de/hardware-hacks/meldung/3D-Druck-mit-Glasfaser-und-Carbon-2100067.html, zuletzt geprüft am 12.09.2014.
- [373] Fraunhofer Institut für Chemische Technologie: Langfaserverstärkte Thermoplaste im Pressdirektverfahren (LFT-D-CM). Huber, Timo. Online verfügbar unter <http://www.ict.fraunhofer.de/de/komp/pe/tp/lft-d-pressen.html>, zuletzt geprüft am 12.09.2014.
- [374] DIEFFENBACHER GMBH Maschinen- und Anlagenbau: LFT (Long Fiber Thermoplast). Hahn, Marco. Online verfügbar unter <http://www.dieffenbacher.de/de/composites/umformung/lft/index.html>, zuletzt geprüft am 12.09.2014.
- [375] Bildquelle: Ecofriend: Italian firms bring you iNature: A biodegradable iPhone case. Online verfügbar unter <http://www.ecofriend.com/italian-firms-bring-inature-biodegradable-iphone-case.html>, zuletzt geprüft am 12.09.2014.
- [376] ITKE Universität Stuttgart: ArboSkin: Fassaden Mock-Up aus dauerhaften und rezyklierfähigen Biokunststoffen. Presstext. Köhler, Carmen; Manfred Hammer. Online verfügbar unter <http://www.itke.uni-stuttgart.de/entwicklung.php?id=58>, zuletzt geprüft am 12.09.2014.
- [377] EFRA - Europäischer Verband der Flammschutzmittelhersteller (2004): Flammschutzmittel - häufig gestellte Fragen. Hg. v. EFRA - Europäischer Verband der Flammschutzmittelhersteller. Seite 31. Online verfügbar unter <http://www.allinova.de/products/flame/explanation/efra06du.pdf/>, zuletzt geprüft am 13.08.2014.
- [378] Bildquelle: Manfred R. Hammer/ ITKE Universität Stuttgart, Konzeption: M. R. Hammer, C. Köhler; Ausführung Thekenfront: P. Siedler, M. Tondera.
- [379] Bildquelle: Seminararbeit sustainable composites WS 09/10, Caroline Wagner, Eva von Dungen.
- [380] Bildquelle: Carmen Köhler/ ITKE. Seminararbeit biomaterialise WS 10/ 11, Gülcan Kilic, Ewa Tulaczko, Yagmur K. Happold, Stefan Vankov, Bangjian Li.
- [381] Bildquelle: Carmen Köhler/ ITKE. Konzeption: Phillip Siedler.
- [382] Bildquelle: Seminararbeit sustainable composites WS 09/10. Feng Yang, Dongyue Tan.
- [383] Bildquelle: Manfred R. Hammer/ ITKE Universität Stuttgart. Design: Seminararbeit Yordan Domuzov, Entwurf push the envelope WS12/13. Konzeption: M. R. Hammer, C. Köhler/ITKE; Ausführung Demonstratorwand Messe Hannover: M.R. Hammer, C. Köhler, P. Siedler.