

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).



DIPLOMARBEIT

BIOKUNSTSTOFFE

Anwendungsgebiete und Potentiale von Biopolymerwerkstoffen in der Architektur

ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
unter der Leitung von

Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael Seidel
E253
Institut für Architektur und Entwerfen

eingereicht an der Technischen Universität Wien

E250 - Architektur und Raumplanung

von

Stefan Salchinger
0225385
Spörlingasse 4/14, 1060 Wien

Wien, März 2009

INHALT

	Seite
ABKÜRZUNGEN	VI
KURZFASSUNG	VII
1 EINFÜHRUNG	08
1.1 Hintergrund & Zielsetzung	09
1.2 Zur Geschichte der Kunststoffe	10
1.3 Wirtschaftliche Bedeutung & Ökologische Problematik	11
1.4 Begriffe der Polymertechnik	12
1.5 Zusatzstoffe und Verarbeitung	13
1.6 Kunststoffe im Bauwesen	14
1.7 Anmerkungen zum Thema Ökologie	15
1.8 Liste der Kunststoffanwendungen im Bauwesen	16
1.9 Eigenschaftsprofile wichtiger Kunststoffsorten	18
2 BIOPOLYMERE	21
2.1 Polysaccharide	22
2.1.1 Cellulose	23
2.1.1.1 Vorkommen und Verwertung	23
2.1.1.2 Chemischer Aufbau	23
2.1.1.3 Anwendungsgebiete im Bauwesen	24
2.1.2 Stärke	25
2.1.2.1 Vorkommen und Verwertung	25
2.1.2.2 Chemischer Aufbau	26
2.1.2.3 Anwendungsgebiete im Bauwesen	27
2.1.3 Chitin	27
2.1.3.1 Vorkommen und Verwertung	27
2.1.3.2 Chemischer Aufbau	28
2.1.3.3 Anwendungsgebiete	28
2.1.4 Polysaccharide von Algen	29
2.1.4.1 Vorkommen und Verwertung	29
2.1.4.2 Anwendungsgebiete im Bauwesen	29
2.1.5 Bakteriell erzeugte Polysaccharide	29
2.1.5.1 Arten und Herstellung	29
2.1.5.2 Anwendungsgebiete im Bauwesen	30
2.1.6 Weitere Polysaccharide	31
2.1.6.1 Pflanzliche Gummi im Bauwesen	31
2.2 Proteine	33
2.2.1 Kollagen	35
2.2.1.1 Vorkommen, Aufbau und Verwertung	35
2.2.1.2 Anwendungsgebiete von Gelatine	35
2.2.2 Keratine	36
2.2.2.1 Vorkommen und Aufbau	36
2.2.2.2 Schafwolle und ihre Verwendung	37

	2.2.2.3 Seidenproteine und ihre Verwendung	38
2.2.3	Milchproteine - Casein und Molke	40
	2.2.3.1 Vorkommen und Verwertung	40
	2.2.3.2 Anwendungsgebiete im Bauwesen	40
2.2.4	Pflanzliche Proteine	41
	2.2.4.1 Sojaprotein und seine Verwendung	41
	2.2.4.2 Getreideproteine und ihre Verwendung	42
2.3	Polyester	43
2.3.1	Polyfettsäuren - PHA / PHF	43
	2.3.1.1 Vorkommen, Arten und Verwertung	43
2.3.2	Polymilchsäure - PLA	44
	2.3.2.1 Rohstoffe, Herstellung und Aufbau	44
	2.3.2.2 Anwendungsgebiete	45
2.4	Weitere Biopolymere	47
2.4.1	Lignin	47
	2.4.1.1 Vorkommen und Aufbau	47
	2.4.1.2 Verwertung	47
	2.4.1.3 Anwendungsgebiete im Bauwesen	48
2.4.2	Naturkautschuk	49
	2.4.2.1 Vorkommen und Gewinnung	49
	2.4.2.2 Chemischer Aufbau	49
	2.4.2.3 Anwendungsgebiete	50
2.4.3	Harze - Schellack	51
2.4.4	Polyphosphate	51
2.4.5	Lipide	51
	2.4.5.1 Aufbau, Gewinnung und Verwertung von Ölen	52
	2.4.5.2 Anwendung von Ölen und Wachsen im Bauwesen	52
2.4.6	Nukleinsäuren	53
2.4.7	Petrochemisch basierte Biopolymere	53
2.5	Naturfasern	55
	2.5.1 Aufbau, Gewinnung und Verwertung	55
	2.5.2 Wichtige Pflanzenfasern	56
2.6	Ökologie von Biopolymeren	59
2.7	Zukünftige Entwicklung	60
2.8	Übersicht Biopolymere	62
3	BIOKUNSTSTOFFE	64
3.1	Übersicht Biopolymerwerkstoffe	65
	3.1.1 Petrochemisch basierte Biopolymere	65
	3.1.1.1 PCL - Polycaprolacton	65
	3.1.1.2 PVOH - Polyvinylalkohol	65
	3.1.1.3 Weitere Biopolymere auf petrochemischer Basis	66
	3.1.2 Hybride Werkstoffe	66
	3.1.2.1 Produkte natürlicher Öle	66
	3.1.2.2 NAWARO-gefüllte Polymere, NFK & WPC	67
	3.1.3 NAWARO basierte Polymere	68

3.1.3.1	Stärkeprodukte	68
3.1.3.2	Cellulose- & Ligninprodukte	69
3.1.3.3	Polymere aus Fermentation	70
3.1.3.3.1	PHA	70
3.1.3.3.2	PLA	71
3.1.3.3.3	Biotechnisch produzierte Polymere	72
3.1.3.4	Proteinpolymere	72
3.1.3.5	NAWARO Composites	73
3.2	Ausgewählte Produkte	74
3.2.1	PUR aus natürlichem Öl - Soytherm	75
3.2.2	PA aus natürlichem Öl - Rilsan	76
3.2.3	Ligninbasiert - Arboform	77
3.2.4	BioConcept Car	77
3.2.5	Cellulosebasiert - Zelfo / Zeoform	78
3.2.6	Phenol-Protein Harz Bindemittel	78
3.2.7	Celluloseacetat - Mazzucchelli	79
3.2.8	Stärkebasiert - Mater-Bi	80
3.2.9	PLA - Ingeo	81
3.2.10	PLA - CD	81
3.3	Conclusio	82
4	LISSY - EINE EXPERIMENTELLE ANWENDUNG	84
4.1	Projektbeschreibung	85
4.2	Funktionsweise	87
4.3	Schematischer Aufbau	87
4.4	Design	88
4.5	Detailschnitte	90
4.6	Abschätzung der Kühlleistung	92
4.7	Aufbau des Prototypen	95
4.8	Potentielle Anwendungsgebiete & Weiterentwicklung von LISSY	100
5	LITERATURVERZEICHNIS	102
6	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	105
7	TABELLEN & DIAGRAMME	109

DANKSAGUNG

Herzlicher Dank sei an dieser Stelle Hr. Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael Seidel für seine tatkräftige und geduldige Unterstützung bei der Erstellung meiner Diplomarbeit ausgesprochen. Dank gilt auch meinen Eltern, die mir das Studium ermöglicht und mich in all meinen Vorhaben bestärkt und gefördert haben, sowie allen, insbesondere meiner Freundin Katharina sowie meinem Freund und Kollegen Christoph, die mir in dieser Zeit so hilfsbereit zur Seite gestanden sind.

ABKÜRZUNGEN

BAK	biologisch abbaubarer Kunststoff		
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff		
NAWARO	nachwachsender Rohstoff		
NFK	naturfaserverstärkter Kunststoff		
WPC	Wood-Plastic-Composite		
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol	PET	Polyethylenterephthalat
BDO	1,4 Butandiol	PF	Phenol-Formaldehyd
CA	Celluloseacetat	PGA	Polyglycolsäure
CAB	Celluloseacetobutyrat	PHA	Polyhydroxyalkanoat
CAP	Celluloseacetopropionat	PHB	Polyhydroxybutyrat
CR	Chloropren Kautschuk	PHBV	Polyhydroxybutyrat-valerat
CSM	Chlorsulfoniertes PE	PIB	Polyisobutylen
DNA	Desoxyribonukleinsäure	PLA	Polylactic Acid / Polylactid
ECB	Ethylen-Copolymer Bitumen Blend	PMMA	Polymethylmethacrylat
EP	Epoxyharz	POM	Polyoxymethylen
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien Kautschuk	PP	Polypropylen
HDPE	High Density Polyethylen	PS	Polystyrol
IIR	Butyl Kautschuk	PTFE	Polytetrafluorethylen
LDPE	Low Density Polyethylen	PTMAT	Polytetramethylen-Adipat- Terephthalat
LLDPE	Linear Low Density Polyethylen	PTT	Polytrimethylenterephthalat
MF	Melamin-Formaldehyd	PUR	Polyurethan
PA	Polyamid	PVC	Polyvinylchlorid
PAN	Polyacrylnitril	PVDF	Polyvinylidenfluorid
PB	Polybuten-1	PVOH	Polyvinylalkohol
PBS	Polybutylensuccinat	RNA	Ribonukleinsäure
PBT	Polybutylenterephthalat	SIR	Isopren-Styrol Kautschuk
PC	Polycarbonat	TPS	Thermoplastische Stärke
PCL	Polycaprolacton	UF	Harnstoffharz-Formaldehyd
PDO	1,3 Proopandiol	UP	Polyesterharz
PE	Polyethylen		
PES	Polyethersulfon		

KURZFASSUNG

Biokunststoffe sind eine junge Materialgruppe, die alle auf Basis nachwachsender Rohstoffe hergestellten, sowie alle biologisch abbaubaren Kunststoffe umfasst. Diese Arbeit gibt einen Überblick über den Stand der Technik ihrer Herstellung und Verwendung. Anhand eines experimentellen Entwurfs werden die innovativen Potentiale für eine Anwendung in der Architektur im speziellen hervorgehoben. Der Fokus liegt dabei auf der Gruppe der aus NAWARO hergestellten Biokunststoffe.

Die Arbeit enthält zunächst eine kurze allgemeine Einführung zur Kunststofftechnik mit dem Ziel, die wichtigsten zum Verständnis der Arbeit notwendigen chemischen und technischen Begriffe zu erläutern. In einem weiteren Schritt werden dann alle natürlichen Rohstoffe, Biopolymere, die

zur Umwandlung zu Biokunststoffen herangezogen werden mit ihren Anwendungsgebieten im Bauwesen beschrieben. Im Anschluss daran sind die wichtigsten heute erhältlichen Biokunststoffe angeführt.

Als abschließendes Kapitel folgt die Projektbeschreibung zum angesprochenen Entwurf. Dabei handelt es sich um ein Fassadensystem aus Biopolymerwerkstoffen mit integrierter passiver Kühlung. Mit dem sogenannten Living Skin System, kurz LISSY, wurde die aktuelle Tendenz, biomimetische Prozesse auf Architektur anzuwenden, aufgegriffen und mit den in der Arbeit beschriebenen Materialien umgesetzt. Ein prototypisches Fassadenelement für experimentelle Studien wurde dafür im Maßstab 1:1 realisiert.

1 EINFÜHRUNG

Die Endlichkeit der Erdölvorkommen sowie ökologische Probleme bei der Entsorgung haben die Industrie dazu veranlasst Alternativen zu den herkömmlichen Massenkunststoffen zu suchen. Biopolymere bieten nicht nur eine interessante Möglichkeit diesen Problemen zu begegnen, sondern auch noch andere neue Materialeigenschaften, die Polymere auf petrochemischer Basis bisher noch nicht bieten konnten.

Als Polymer werden alle aus chemisch einfachen, sich wiederholenden Molekülen aufgebauten Riesenmoleküle bezeichnet. Als Biopolymere werden heute alle natürlich vorkommenden Polymere, synthetisch hergestellte Polymere auf Basis von NAWARO sowie alle BAK auf petrochemischer Basis bezeichnet.

Die Biopolymere werden ausführlich in Kapitel zwei besprochen. Im folgenden Kapitel wird zum besseren Verständnis zunächst noch eine kurze allgemeine Einführung zum Thema der Polymertechnik mit einer Erklärung der wichtigsten Begriffe gegeben.

1.1 HINTERGRUND & ZIELSETZUNG

Prozesse und Strukturen der Natur faszinieren den Menschen seit je her. Mit dem Zeitalter der Renaissance und Gelehrten wie Leonardo da Vinci beginnt auch die systematische Erforschung biologischer Zusammenhänge. Die Biotechnologie zählt heute zu den wichtigsten Wissenschaftsgebieten und selbst für Architekten und Bauingenieure sind bionische- und biomimetische Ansätze zu ernstgenommenen Entwurfskonzepten geworden.

Interessanterweise haben die Fortschritte der Wissenschaft auch innerhalb eines aus ökologischer Sicht stark verpönten Industriezweigs zu spannenden Neuerungen geführt: und zwar der Polymertechnik und Kunststoffindustrie. Die Erforschung natürlicher Makromoleküle (Biopolymere), den Bausteinen lebenden Gewebes, hat nicht nur große Fortschritte auf Gebieten der Medizin ermöglicht, sondern auch zu neuen Produkten in der Verpackungs-, Lebensmittel- und Automobilindustrie geführt. Unter Anwendung wissenschaftlicher Werkzeuge und Verfahren der Polymertechnik auf natürliche Materialien konnten bereits einige neue biologisch verträgliche Kunststoffsorten und -produkte auf dem Markt eingeführt werden.

Die neuen Werkstoffe sind bis jetzt noch nicht in ernsthafte Konkurrenz zu den heute üblichen Massenkunststoffen getreten und fristen derzeit eher ein Nischendasein als Spezialwerkstoffe in den oben genannten Wirtschaftszweigen. Ökologische Vorteile und der Wunsch nach einer Loslösung von petrochemischen Rohstoffen hat die Politik allerdings schon seit längerem dazu veranlasst, die Weiterentwicklung der Biopolymerwerkstoffe für kommerzielle Zwecke zu forcieren. Die Zunahme von Produktionskapazitäten und der unsichere Rohölpreis steigern ihre Konkurrenzfähigkeit dabei zusätzlich und Prognosen gehen für einzelne Marktsegmente von Wachstumsraten von mehreren 100%¹ in den nächsten Jahren für Kunststoffe auf der Basis von NAWARO aus. Da Kunststoffe auch im Bauwesen eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielen, könnte eine veränderte Produktsituation hier zu nachhaltigen Veränderungen für Planer und Entwerfer führen.

Die Aktualität des Themas ist Anlass für die folgende theoretische Einführung über Biopolymere. Sie bietet eine übersichtliche und leicht verständliche Zusammenfassung der heute erhältlichen Produkte. Die Beschäftigung mit Biopolymeren, die in Lebewesen auf natürlichem Weg synthetisiert werden, wirft zudem die Frage auf, ob sie nicht Potential für eine Anwendung in Architektur mit biomimetischen Funktionen besitzen. Diese Überlegung war Ausgangspunkt für den Entwurf des Fassadensystems „LISSY“.

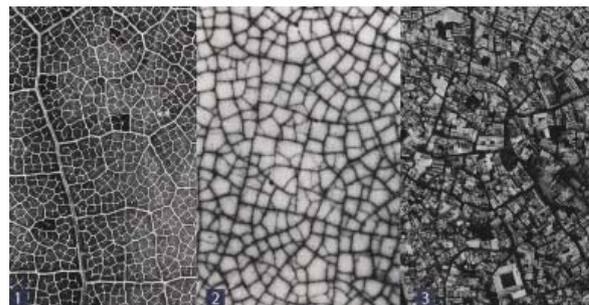


Abb.1 1-Ahornblatt, 2-Rissbild Porzellan, 3-Martina Franca, Italien



Abb.2 Polymerwerkstoffe - ambivalente Materialien

1-aufblasbare Mondstation der NASA, 2007

2-Müllberge in den Straßen Neapels, Jan 2008

3-Kunststoffteile aus NAWARO der Mercedes E-Klasse

4-Polybiwak, 1970



Tab.1 Übersicht abgewandelter Naturstoffe im 19. Jh.



Abb.3 Ford, Sojakunststoff Prototyp, 1910

1922	H. Staudinger	beweist die Existenz von Makromolekülen
1930	W. Kuhn	statistische Berechnung der Molekülknäuelgestalt
1935	W.H. Carothers	Polyamide
1936		Buna S, Polyvinylchlorid
1937		Polyurethane
1942		Hochdruckpolyethylen
1943		Silikone, Teflon
1948		Polyacrylnitrilfasern
1952	L. Pauling	Alpha-Helix der Proteine
1952		Polyurethanschaum
1953		Polyesterfasern
1954	Cricks, Watson	Doppelhelix der Nukleinsäuren

Meilensteine der Polymerchemie²

1.2 ZUR GESCHICHTE DER KUNSTSTOFFE

Im Prinzip tauchen die Biopolymere bereits am Beginn der - noch recht jungen - modernen Kunststofftechnik auf. Diese beginnt Mitte des 19. Jh. als eine Reihe von Chemikern, meist durch Zufall, lernt Naturstoffe durch chemische Reaktionen zu Kunststoffen umzuwandeln.

Als erster von ihnen ist der Amerikaner Charles Goodyear zu nennen, der 1839 die Vulkanisation von Naturkautschuk mit Schwefel entdeckt und auf der Basis dieser Arbeit Hartgummi entwickeln wird. Das Material wird in vielfältiger Weise zu Gebrauchsgegenständen weiterverarbeitet und ersetzt andere Rohstoffe wie Holz, Metall und Horn. Ein weiterer wichtiger chemischer Grundstoff zur Verarbeitung wird Cellulose. Auf der Basis der Forschung der französischen Chemiker Théophile-Jules Pelouze und Henri Braconnet beginnen Wissenschaftler und Erfinder sich mit der Derivatisierung von Cellulose zu beschäftigen. Besonders als Ersatz für das exzessiv für Billiardkugeln, Klaviertasten und andere Gebrauchsgegenstände verwendete und mittlerweile schon rar gewordene Elfenbein sucht man begierig nach Werkstoffen und entdeckt zunächst die Nitro-Cellulose. Anfangs kommt es noch zu einigen spektakulären Vorfällen mit dem hoch reaktiven Gemisch (auch Schießbaumwolle genannt), doch wird die Technik rasch verfeinert und der erste Massenkunststoff, der auch heute noch eine gewisse Bedeutung besitzt, das Celluloid, entwickelt.

Neben diesen Verfahren spielt auch die Verarbeitung des Milchproteins Kasein zum Kunsthorn „Galalith“ eine gewisse Rolle und, im Verfahren ähnlich, wird auch Sojaprotein zu Kunststoffen verarbeitet. Motiviert, die amerikanische Agrarindustrie anzukurbeln, beschäftigt sich bereits Henry Ford mit der Verwendung von Biorohstoffen und entwickelt Anfang des 20. Jh. Prototypen für Automobilkarosserien auf der Basis von „Sojabohnenplastik“ und naturfaserverstärkten Kunststoffen.

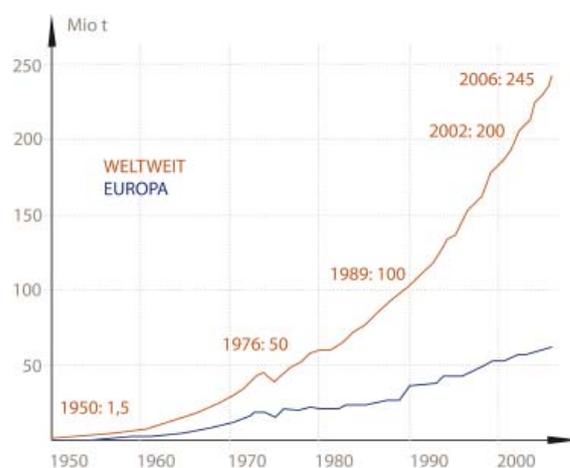
Durch das vom belgischen Chemiker Leo Hendrik Baekland etwa zur gleichen Zeit erfundene und „Bakelit“ getaufte Phenol-Formaldehyd-Harz wird dann allerdings das Zeitalter der synthetischen Kunststoffe auf Erdölbasis eingeleitet. Durch die Theorie der „Riesenmoleküle“ des deutschen Chemikers Hermann Staudinger wird nun auch der Grundstein zur systematischen Erforschung der Makromoleküle auf wissenschaftlicher Ebene gelegt. Sie werden unter Rückgriff auf frühere Vorschläge Polymere genannt und setzen zu einem bis heute andauernden Siegeszug in der Materialtechnik an.

1.3 WIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG & ÖKOLOGISCHE PROBLEMATIK

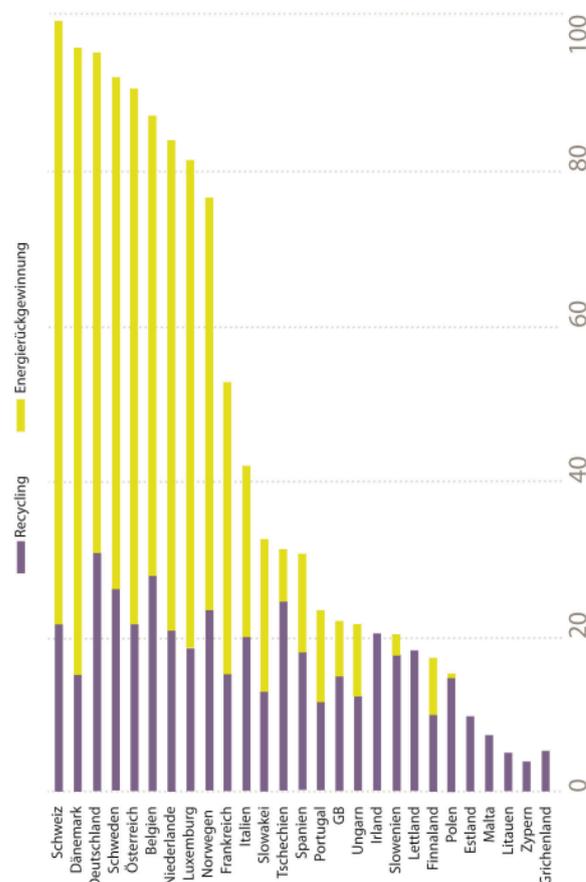
Die Entwicklung der Weltjahresproduktion von Kunststoffen seit 1950 zeigt recht eindrücklich den Erfolg der Kunststoffe. Sie zeichnen sich durch einfache thermische und mechanische Modifizierbarkeit, Langzeitresistenz und sehr gute Isolationseigenschaften gegen Strom und Wärme sowie Barriereigenschaften gegen Sauerstoff, als auch Geruchs- und Geschmacksneutralität bei Lebensmittelverpackungen aus. Besonders der Preisvorteil auf Grund von Massenfertigung und günstigen Rohstoffen³ haben Kunststoffe in vielen Bereichen zum Material der ersten Wahl werden lassen.

Besonders in Hinblick auf die vielen Spezialanwendungen hat sich eine schier unüberschaubare Vielfalt von Werkstoffen und Werkstoffkombinationen ergeben. Bezogen auf Produktionsmenge und Abfallaufkommen lässt sich diese Zahl allerdings auf vier Kunststoffgruppen reduzieren: Polyolefine (PE, PP, PB), Polystyrol PS, Polyethylenterephthalat (PET) und Polyvinylchlorid (PVC). Diese sind für über 90% der gesamten Kunststoffproduktion verantwortlich und wie auch das Gros der restlichen Kunststoffsorten werden sie aus Rohstoffen auf petrochemischer Basis hergestellt. Zwar kommen nur etwa 4% des Erdöls in der Kunststofferzeugung zum Einsatz, doch sowohl verwendete Rohstoffe, als auch Endprodukte, sind nicht mehr biologisch abbaubar.⁴ Ferner verlieren manche Kunststoffe, vor allem Duroplaste, signifikant an Qualität im Recyclingprozess und können nur zu minderwertigen Produkten (Holzlaminat, Teppiche, Gartenmöbel, etc.) weiterverarbeitet werden. Häufig ist man auf zwei bis drei Recyclingzyklen beschränkt und spricht in diesem Zusammenhang von Downcycling. Zusätzlich erschweren die zahlreichen Compositmaterialien, Laminat und Blends die sortenreine Trennung und damit ein stoffliches oder chemisches Recycling. Hat man früher den Abfall einer Deponierung zugeführt, ist dies heute aus ökologischer und politischer Sicht nicht mehr durchzusetzen. Ein großer Teil wird heute zumeist dem sog. energetischen Recycling zugeführt, das heißt verbrannt. In einigen Ländern fehlen noch viele Schritte zur gesetzlichen und realen Umsetzung verschiedener Recyclingverfahren, andere dagegen verwerten bereits den gesamten Anteil der Restmassen auf verschiedenste Weise.

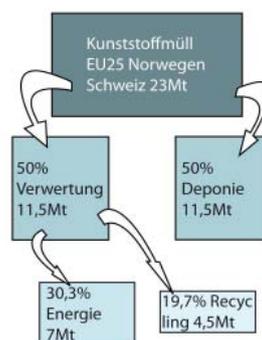
Dennoch sind viele, vor allem der erzeugungsstärkste Zweig der Kunststoffherstellung, die Verpackungsmittelindustrie, dazu übergegangen die Forschung über BAK zu intensivieren. Ökologische Probleme und die CO₂-Bilanz und Treibhausgasemissionen durch die Produkterzeugung sollen so bekämpft und verbessert werden.



Diagr.1 Weltjahresproduktion von Kunststoffen



Diagr.2 (o.) Recycling / Energierrückgewinnung nach Nation



Diagr.3 (li.) Verwertung von Kunststoffabfällen

3 - W. Aichholzer, 'Herstellung Verarbeitung sowie Charakterisierung ..', Universität Stuttgart, 1999 S.1 [7]

4 - E.S. Stevens, 'Green Plastics', Princeton University Press, Princeton, 2002, S.44 S.79 [5]

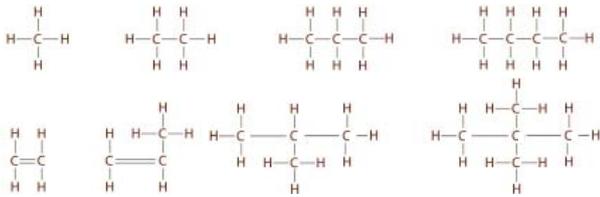


Abb.4 einfache Kohlenwasserstoffverbindungen

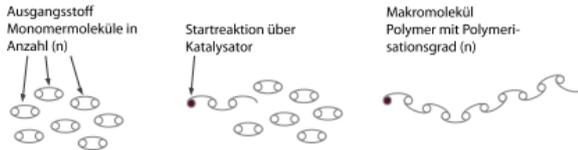


Abb.5 Schematischer Ablauf einer Polymerisation

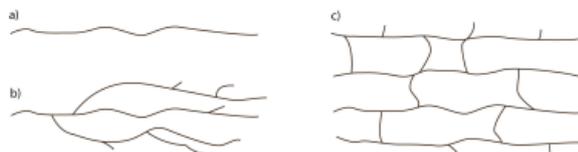


Abb.6 a) lineare b) verzweigte c) vernetzte Makromoleküle

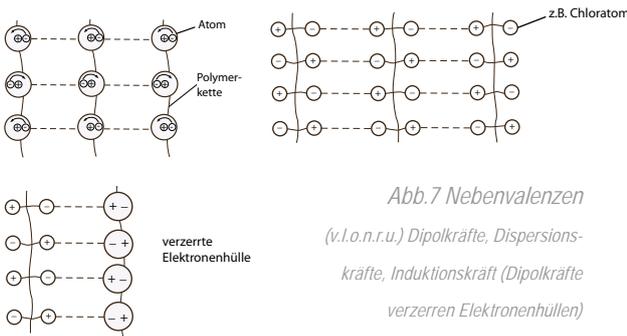
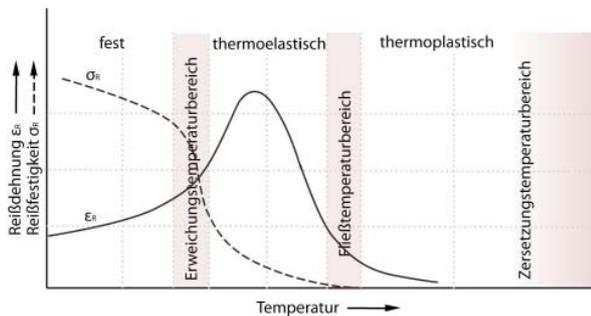
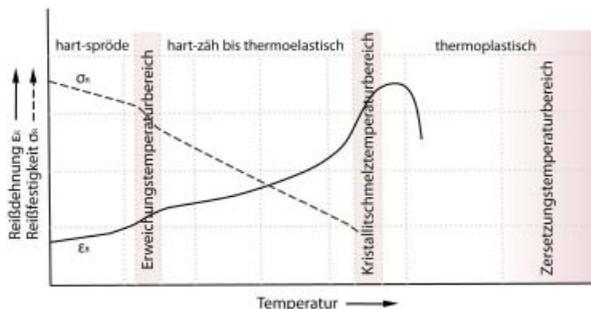


Abb.7 Nebenvalenzen

(v.l.o.n.r.u.) Dipolkräfte, Dispersionskräfte, Induktionskraft (Dipolkräfte verzerren Elektronenhüllen)



Diagr.4 Eigenschaftsbild amorpher Thermoplaste



Diagr.5 Eigenschaftsbild teilkristalliner Thermoplaste

1.4 BEGRIFFE DER POLYMERTECHNIK

Durch chemische Reaktionen zu Makromolekülen verknüpfte Einzelmoleküle, sog. **Monomere** (*mono* griech. für allein, einzig, *meros* für Teil), werden als **Polymere** (*poly* griech. für viele) bezeichnet. Bei den Monomeren handelt es sich zumeist um Kohlenwasserstoffe, die durch Raffinerieprozesse aus Erdöl gewonnen werden. Diese Verbindungen sind ein wichtiger Bestandteil der organischen Chemie und durch Destillation können über 1000 verschiedene von ihnen hergestellt werden.⁵

Die Reaktionen zur Vernetzung von Monomeren werden in **Polymerisation**, **Kondensations-** oder **Additionspolymerisation** unterteilt. Bei letzteren werden die Monomere unter Zugabe eines Härterers vernetzt, wobei bei der Kondensationspolymerisation auch noch ein Spaltprodukt, zumeist Wasser, entsteht. Die Polymerisation wird durch einen chemischen Katalysator gestartet und die durch Energieaufwand (z.B. Hitze oder Druck) reaktionsfähig gemachten Monomere beginnen sich zu vernetzen. Sie verläuft prinzipiell schnell und häufig exotherm ab. Je nach dem ob ein oder mehrere verschiedene Monomere zum Einsatz kommen spricht man von **Homo-** bzw. **Copolymeren**. Ist der Unterschied kombinierter Polymere auf molekularer Ebene noch sichtbar spricht man von **Polyblends**. Die Länge der erzeugten Makromoleküle bewegt sich allgemein zwischen 10^{-6} und 10^{-3} mm und der **Polymerisationsgrad**, die Zahl der „eingebauten“ Monomerbausteine, liegt immer höher als 1000.⁶ Molekülketten aus nur wenigen Monomeren werden auch als **Oligomere** bezeichnet.

Die Makromoleküle können linear kettenförmig, verzweigte oder netzartige Strukturen besitzen. Kettenförmige Polymere werden untereinander wiederum von schwachen atomaren Kräften, sog. Nebenvalenzen, zusammengehalten. Da sich diese durch Einwirkung von Wärme lösen erhält man sog. **Thermoplaste**. Die Molekülketten können in ihnen teilweise in geordnetem Zustand, **teilkristalline** Thermoplaste (wie z.B. PE, POM, PP, PTFE), oder völlig ungeordnet, **amorphe** Thermoplaste (wie z.B. PS, PVC, CA), vorliegen. Ab einem gewissen Kristallisationsgrad wird das Licht von ihnen gebrochen und sie sind im Gegensatz zu amorphen Thermoplasten nicht mehr transparent. Die mechanischen Eigenschaften teilkristalliner Thermoplaste können speziell anisotrop sein und durch Verstrecken zusätzlich eingestellt werden. Sind die Monomere zu Molekülnetzen verbunden, so handelt es sich um nicht mehr durch Wärme lösbare **Duroplaste** (wie z.B. UP, EP, PF, UF, MF). Besitzt das Molekülnetz weite „Maschenabstände“ so erhält man hochelastische Materialien, sog. **Elastomere** (wie z.B. Natur-, Silikonkautschuk).

1.5 ZUSATZSTOFFE UND VERARBEITUNG

Die Qualität leistungsstarker Polymerwerkstoffe ist oft entscheidend von zugesetzten Additiven abhängig. Erst durch sie werden sie verarbeitbar, erhalten spezielles Aussehen, ausreichende mechanische Eigenschaften und Dauerhaftigkeit. Der Anteil Additiv kann dabei jenen des Polymers sogar übersteigen - so kann z.B. PVC einen Weichmacheranteil von über 50% enthalten.⁷ Allerdings konnte in der Vergangenheit oft die Toxizität von Kunststoffen auf zugesetzte Additive zurückgeführt werden. Bei ihrem Einsatz ist daher besonders auf Verträglichkeit untereinander, Stabilität, Migrationsbeständigkeit und physiologische Unbedenklichkeit zu achten. Prinzipiell unterscheidet man zwischen **Verarbeitungsadditiven** (Beschleuniger, Inhibitoren, Gleitmittel, Haftvermittler, Treibmittel), **Funktionsadditiven** (Brandschutzausrüstung, Härter, Weichmacher, Keimbildner, Schlagzähigkeitverbesserer, Antistatika) und **Stabilisierungsadditiven** (Stabilisierung gegen Oxidation, UV Licht oder mikrobiellen Angriff). Zur Oberflächenveredelung, Preisreduktion oder zum Erreichen spezieller Eigenschaften werden verschiedenste **Füllstoffe** (z.B. Kohle, Graphit, Steinpulver, Holzmehl, Cellulose, Stärke) zugegeben. Eine weitere große Gruppe bilden die **Farbstoffe**, die löslich oder als Pigmente zugesetzt werden, sowie verschiedenste Faserstoffe zur Verstärkung der Materialien (z.B. Carbon-, Glas- und Naturfasern).

Die Herstellung von Kunststoffen aus formlosen Ausgangsstoffen wird als **Urformen** bezeichnet. Sie gelangen in fester (als Pulver oder Granulat) oder flüssiger Form zur Verarbeitung. Ein wichtiges Verfahren zum Urformen von Kunststoffen ist das **Extrudieren**. Über eine Schnecke wird das Ausgangsmaterial in Form gepresst. Weitere Urformverfahren sind das Kalandrieren (Verarbeitung über gegenläufige Walzen), Spritzgießen, Folienblasen, Hohlkörperblasen, Pressen, Schäumen, Spinnen von Fasern, Schleudern und Rapid Prototyping. Die hergestellten Formstoffe werden als **Halbzeuge** bezeichnet. Thermoplastische Halbzeuge werden unter Erwärmung oft noch weiter **umgeformt**. Sie lassen sich durch Vakuum oder Überdruck tiefziehen bzw. aufblasen sowie kanten, biegen, recken, schrumpfen und schweißen. Ähnlich wie Holz oder Leichtmetallwerkstoffe können die Kunststoffe auch durch sog. spanende Bearbeitung (Bohren, Drehen, etc.) umgeformt werden. Durch polieren, lackieren, bedrucken, prägen, beflocken oder galvanisieren kann ihre Oberfläche zusätzlich veredelt werden. Als mechanische Fügeverfahren kommen Klebe-, Schnapp-, Schraub- und Nietverbindungen zum Einsatz.

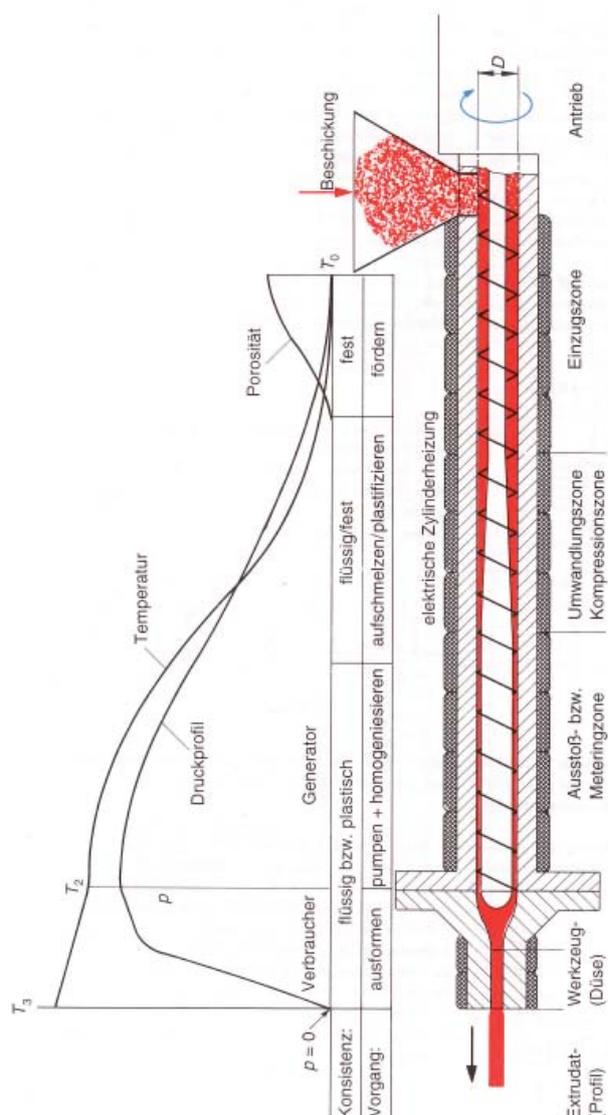


Abb.8 Einschneckenextruder
mit 3-Zonen Schnecke

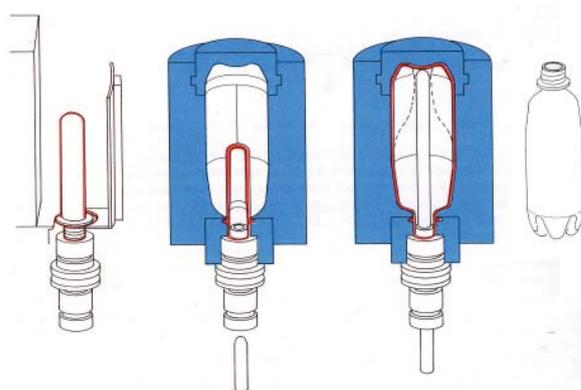
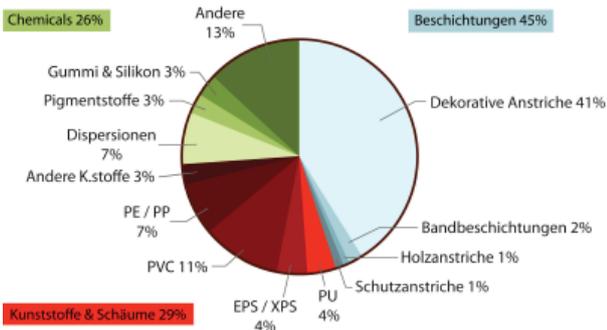


Abb.9 2-Stufen-Spritzstreckblasen



Diagr.6 Absatz (global) von Chemikalien an das Bauwesen

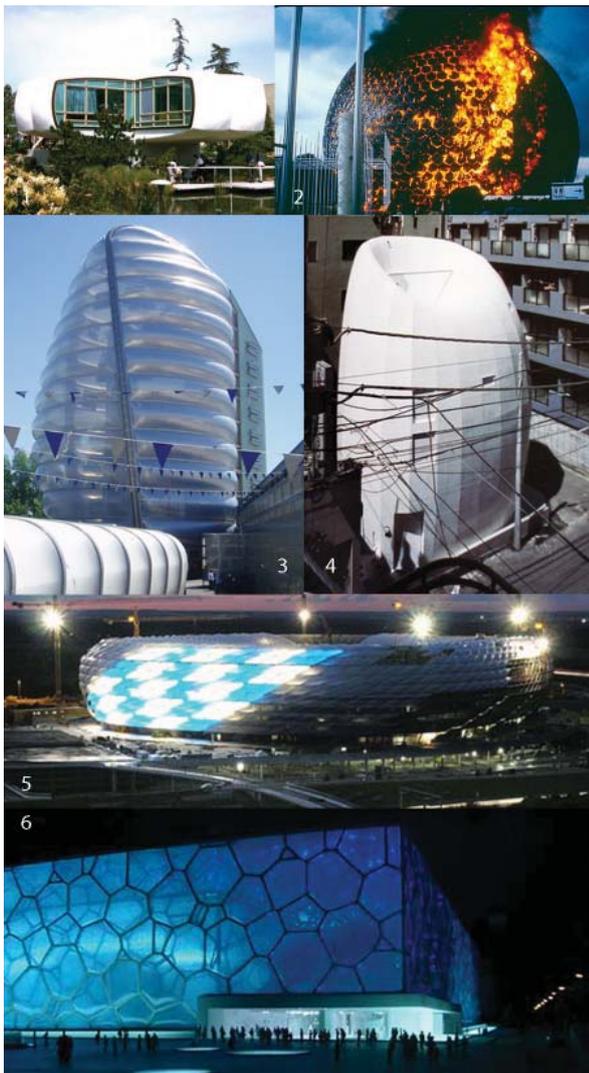


Abb.10 Kunststoffe in der Architektur

1: Monsanto House of the Future, Disneyland, Kalifornien 1957

2: US-Amerikanischer Pavillon zur Expo in Montreal, R. Buckminster-Fuller 1967

Acrylglasshülle bei Restaurierung 1976 abgebrannt

3: National Space Centre, Grimshaw&Partners, Leicester 2001

4: Natural Ellipse House, Endoh Design House, Tokyo, 2002

5: Allianz Arena München, Herzog&deMeuron, München, 2005

6: Olympisches Schwimmstadion, PTW Architects, Peking 2008

1.6 KUNSTSTOFFE IM BAUWESEN

Auch im Bauwesen haben Kunststoffe eine große Bedeutung erlangt. Vor allem ihr günstiger Preis, ihre Langlebigkeit und ausgezeichnete Barriereigenschaften haben sie zu unersetzlichen Materialien gemacht. In Europa werden rund 21% der erzeugten Kunststoffe im Bauwesen verbraucht.⁸ Wobei manche Sorten überhaupt fast nur für Bauanwendungen erzeugt werden - so gehen 90% der EPS Produktion Deutschlands als Dämmstoffe an das Bauwesen.⁹ Andere wichtige Kunststoffsorten sind PVC, hier werden etwa 55% der Erzeugung im Bauwesen verwendet¹⁰ und PE für Folien und Abdichtungsbahnen. Bezogen auf ihre Masse besitzen Kunststoffe zwar nur einen Anteil von etwa 1% am Baustoffsektor, machen dabei aber dennoch 10% der Baustoffkosten aus.¹¹ Allerdings spielt der Bausektor nicht nur als Verbraucher, sondern auf Grund der vielen verbauten Materialien auch als Rohstofflieferant für Recycling- und Verwertungsindustrie eine wichtige Rolle.

Hat beim Einsatz von Kunststoffen zunächst eine falsche Anwendung häufig zu Bauschäden und somit zu einer großen Skepsis innerhalb der Branche gegenüber ihrer Anwendung geführt, können diese Probleme heute weitgehend als überwunden betrachtet werden. Als Konstruktionswerkstoffe haben sich Kunststoffe dennoch nie richtig etabliert - es bleibt bei einigen beispielhaften Anwendungen. Die Wahrnehmung von Kunststoffen als billige Substitutionsmaterialien und die erwähnten ökologischen Probleme haben dazu geführt, dass sie entweder „unsichtbar“ im Hintergrund oder als Hilfs- und Zusatzstoff auf Grund ihrer einzigartigen Eigenschaften verwendet werden. Ihre wichtigsten Einsatzgebiete finden sie demnach auch als Anstriche und Beschichtungen, Rohrsysteme und Kabelbeschichtungen in der gesamten Haustechnik, als Abdichtungs- und Dämmsysteme, Fugenmassen, Kleber oder Zuschlagstoffe. Lediglich im konstruktiven Ingenieurlleichtbau oder im zeitgenössischen Design sind sie als schlanke Hochleistungsmaterialien geringer Dichte immer wieder im Einsatz. Anwendungsbeispiele sind verschiedenste Zelt-, Seilnetz- und pneumatische Konstruktionen, temporäre Konstruktionen (z.B. Messestände, Bühnen), Fassadenelemente, Möbel, freigeformte Bauteile und Spezialkonstruktionen für Hallen, Brücken und militärische Anwendungen.

Biopolymermaterialien könnten die moralischen Bedenken, die mit der Verwendung synthetischer Stoffe verbunden sind, in manchen Bereichen überflüssig und so Kunststoffe für ein noch breiteres Anwendungsspektrum im Bauwesen interessant machen.

8 - PlasticsEurope (Hg.), *The Compelling Facts About Plastics*, www.plasticseurope.org, 2008 S.10 [16]

9 - Angela Gewiese, *Kreislaufwirtschaft im Bauwesen*, Ernst & Sohn, 1998 S.84 [1]

1.7 ANMERKUNGEN ZUM THEMA ÖKOLOGIE

Neben den bereits besprochenen Bedenken betreffend der Ökologie (Rohstoffe, Recycling) sind in Bezug auf das Bauwesen noch weitere Faktoren zu beachten die das Thema Ökologie anbelangen. Gemeint sind hier bauphysikalische Aspekte, insbesondere das Brandverhalten. Im Sinne einer holistischen Betrachtungsweise wie sie nach aktuellen Trends in der zeitgenössischen Architektur gefordert wird, müssten im Sinne der Ökologie als Lehre von Ökosystemen weitere Faktoren wie Stoff- und Energiekreisläufe, Flächenverbrauch, Nahrungsketten - kurz das gesamte Bauwerk in Wechselwirkung mit seiner Umgebung - mit in die Betrachtung einbezogen werden.

Betreffend der Kunststoffe kann in Bezug auf das Raumklima die Emission verschiedener Stoffe zu einem Problem werden. Je nach Kunststoffart sind es entweder Härter von Duroplasten (hier wird z.B. unter Umständen Formaldehyd eingesetzt) oder diverse Zusatz- und Füllstoffe (verschiedene Weichmacher oder in der Vergangenheit auch Asbest), die von den Kunststoffen nach einem Einbau unter Umständen für schädliche Emissionen verantwortlich gemacht werden können. Da auch Holzwerkstoffe zum Teil mit solchen schadstoffemittierenden Harzen gebunden wurden, waren auch diese in der Vergangenheit von solchen Problemen betroffen (Stichwort Sick-Building-Syndrome). Planer und Auftraggeber sind daher dazu angehalten vor dem Einbau möglichst genaue Informationen über die jeweiligen Produkte einzuholen.

Dies gilt auch in Hinblick auf das Verhalten im Brandfall. So setzen, um nur ein Beispiel zu nennen, PVC Produkte im Brandfall unter Umständen Dioxine, Furane oder Chlorwasserstoffe frei. Der Gesetzgeber hat für die Konzentration von Giftstoffen in der Luft bestimmte Grenzwerte festgelegt. Als aussagekräftige Obergrenze für den Schadstoffgehalt in der Atmosphäre ist der MIK-Wert (Maximale Immisions Konzentration) anzusehen, der, so lange unterschritten, bei gesunden erwachsenen Personen zu keinen gesundheitlichen Problemen führen sollte. Ein weiterer Grenzwert wäre der sog. MAK-Wert (Maximale Arbeitsplatz Konzentration), der allerdings für gesunde Arbeitskräfte mittleren Alters und eine Exposition von 8h/Tag ausgelegt ist. Weitere Grenzwerte sind der TRK-Wert (technisch erreichbare Konzentration eines gefährlichen Stoffes, falls kein MAK-Wert vorliegt), BAT-Wert (höchstzulässige Quantität eines Arbeitsstoffes am Arbeitsplatz, der die Gesundheit nicht beeinträchtigt), MEK-Wert (maximale Emissionskonzentration eines Stoffes bestimmter technischer Anlagen).¹²



Abb.11 ganzheitliche Betrachtung - „lebende“ Strukturen

1: „Reaktive Flächenstruktur“ von Steffen Reichert

2: Struktur aus dem Comic „Fievre d’Urbicande“

3: bizarrer Baum

4: Friedrich Kieslers „Endless House“

10 - Andrá, Schneider, Wickbold, Baustoff-Recycling: Baustoffe, Ecomed Verlags Gesellschaft, Landsberg, Lech, 1994 S.130 [24]

11 - M.Agstner, Einsatz eines Polymer-Additives .., Diplomarbeit Universität Innsbruck, Innsbruck 2004 S.27 [23]

12 - W. Scholz, W. Hiese (Hg.), Baustoffkenntnis, Werner Verlag, 15. Auflage, München Unterschleißheim, 2003 S.871 [34]

1.8 LISTE DER KUNSTSTOFFAN- WENDUNGEN IM BAUWESEN¹³

Abdichtungs- und Dämmmaterialien

Abdichtungsbahnen und Folien zur Bauwerks- und Dachabdichtung

PE, ECB, IIR, CR, CSM, EPDM, PIB, PVC weich

Dichtbänder, Fugenprofile, -massen und Kitte

PUR, SIR, PIB, IIR, Polysulfid, Acrylharz

Schaumstoffe zur Wärme und Schalldämmung, als Füll- und Stützmaterial für Sandwichelemente

PS-, PUR-, PVC-, Phenol- und Harnstoffharzschäume

Ausbauteile für den Hochbau

selbsttragende Wand- und Fassadenelemente, Wellplatten, Hohlkammerprofile, Systemprofile, Formteile, Kassetten-, Faltelemente mit oder ohne Schaumstofffüllung

PVC, GF-UP, PMMA, PC

Oberlichte, Lichtkuppeln, Lichtbänder

GF-UP, PMMA, CAB, PC

Fensterprofile

PVC

Fensterzubehör, Rollläden, -profile, Beschläge, Getriebe, Türen, Türzargen, Tore

PVC, GF-UP, PMMA

Rohre, Kabel und Bauteile haustechnischer Anlagen

Rohre für haustechnische Installationen, Heizungs-, Lüftungs-, Klima- und Sanitäranlagen sowie Sicker-, Drainagerohre und Dachentwässerungssysteme

PVC, PP, PE, PVDF, GFK, PB

Formteile für Tanks, Nasszellen, Dusch-, Badewannen und Schwimmbäder sowie Zubehör wie Ventile, Brauseköpfe, Spülkästen, Sitze, Deckel, Waschbecken

GFK, PE, PA, ABS, PA, PVC, PP, PE, PMMA

Stromkabel

PVC

Gehäuse von Schaltern und Steckdosen

PP, PE, PVC

Beläge und Möbelbaustoffe

Teppichböden

PA, PE, PP, PAN

Kunststoffbahnen, Fußboden-, Treppen-, Handlaufprofile, Kacheln und Fliesen

Linoleum, PVC, PF, MF

Möbelwerkstoffe

Beschichtetes Holz, PS, PUR, PA, ABS, PP, Latex, POM

Tragwerke

biegesteife Schalen, Kuppeln oder frei geformte Elemente

GF-UP, GFK oder andere Faser-Harz-Verbundstoffe, PMMA, evtl. mit PUR Hartschaum Stützkern

Membrane

PTFE, PVC, Kunststoffgewebe

Formschalkkörper, Struktur-, aufblasbare- und verlorene Schalungen

UP-GF, PVC, Gewebe, PS und PUR Schaum

Kohlenstoff- und synthetikfaserverstärkte Kunststoffe als Spannelemente, Gleit- und Verformungsaufleger

PTFE, CR

Hilfsstoffe und Bindemittel

Beschichtungen und Imprägnierungen

UP-GF, EP, CSM, kautschukvergüteter Bitumen

Klebemörtel, Kunstharzinjektionen zur Verankerung

EP, UP, PUR

Kunstharzgebundene Betone und Mörtel

UP, EP, PUR, PMMA

Oberflächenschutz und Industriefußbodenbeläge

UP, EP, PUR, PMMA

Leichtbetone mit Schaumstoffbindemittel oder -zuschlag

UP, PF, PS

Kunstharzdispersionen als Zuschlagstoffe

PVAC-, SB-, PMMA-, PVP-Copolymerisate

Kunstharzgebundene Holzwerkstoffe, Klebstoffe im Holzleimbau

UF, MF, PF

Dispersions-, Kontakt-, Reaktionsharzklebstoffe und Klebstoffe mit anlösendem Lösungsmittel, Leime, Anstriche, Farben und Lacke

Sonstige

Folien für Wasser, Wasserschutz- und versorgungsbauten

Gewebe aus PE und PVC

Wasserversorgungsleitungen

PVC, PE, PP, PB

Abwasserleitungen

PVC, PE, PP, PB, GFK, UP-Beton, PUR-Wickelrohr, ABS

Schaumstofffrostschutz

PS-Schaumstoffplatten

Verfestigung und Kultivierung von Baugründen

EP, PUR, UF-Schaum

Geotextilien zum Ausgleichen, Verstärken, Dränieren, Filtern, Trennen, Schützen, Absorbieren

PES, PP, PA

1.9 EIGENSCHAFTSPROFILE WICHTIGER KUNSTSTOFFSORTEN

PE

teilkristalliner Thermoplast, Polyolefin
erhältlich als: High-Density- Polyethylen PE-HD
Low-Density-Polyethylen, PE-LD oder
Linear-Low-Density- Polyethylen PE-LLD
Dichte resultiert aus Kristallisationsgrad
Anteile am europ. Kunststoffverbrauch: 29%¹⁴
HD und LD: leicht entflammbar, brennt nach Entfernen der
Flamme, nach Erlöschen Geruch nach Paraffin¹⁵

PP

teilkristalliner Thermoplast, Polyolefin
Anteil am europ. Kunststoffverbrauch: 19%¹⁴
leicht brennbar, tropfend und weiter brennend, helle Flamme,
flammwidrige Typen erhältlich¹⁵

PS

amorpher Thermoplast
Anteil am europ. Kunststoffverbrauch: 7%¹⁴
hochtransparent, leicht entflammbar, brennt leuchtend, stark
rußend, Geruch süßlich¹⁵

PVC

Thermoplast, hauptsächlich amorpher Struktur
Anteil am europ. Kunststoffverbrauch: 19%¹⁴
Weichmacheranteile bis zu 55%
brennt in der Flamme gelb-orange, grün in Gegenwart von
Kupfer, riecht nach Salzsäure. PVC mit Weichmacher: entflammbar,
brennt leuchtend, rußend, riecht stechend nach Salzsäure
(korrosiv)¹⁵

PET

teilkristalliner Thermoplast
unter Zusatz von Copolymeren amorph
Anteil am europ. Kunststoffverbrauch: 7%¹⁴
brennt rußend mit gelborangefarbener Flamme, tropft, riecht
süßl., flammwidrige Typen erhältlich¹⁵

PUR

Gießsysteme, Kautschuktypen und thermoplastische Elastomere
erhältlich
Urethan Bindung –NH-CO-O- charakteristisch, Erzeugung aus
Polyadditionsreaktionen von Polyolen mit Isocyanaten.
Polyolanteil kann aus NAWARO gewonnen werden.
Anteil am europ. Kunststoffverbrauch: 6%¹⁴
PUR ist brennbar¹⁵

¹⁴ - *PlasticsEurope (Hg.), The Compelling Facts About Plastics, www.plasticseurope.org, 2008 S.10* [16]

¹⁵ - *H. Dominghaus (Hg.) Kunststoffe – Eigenschaften und Anwendungen, Springer Verlag, 7. Auflage, Berlin, 2008 Beilage1* [17]

	mechanische Eigenschaften							
	Kurzbezeichnung DIN 7728	Rohdichte g/cm ³ DIN 53479	Zugfestigkeit N/mm ² DIN 53455	Reißdehnung % DIN 53455	Zug-E-Modul N/mm ² DIN 53457	Kugeldruckhärte N/mm ² 10-sec-Wert DIN 53456	Schlagzähigkeit kJ/m ² DIN 53453	Kerbschlagzähigkeit kJ/m ²
Polyethylen niedriger Dichte	PE-LD	0,914-0,928	8/23	300/1000	200/500	13/20	o.Br.	o.Br.
Polyethylen hoher Dichte	PE-HD	0,94-0,96	18/35	100/1000	700/1400	40/65	o.Br.	o.Br.
Polypropylen	PP	0,9-0,907	21/37	20/800	1100/1300	36/70	o.Br.	3/17
Polyvinylchlorid o. Weichmacher	PVC-U	1,38-1,55	50/75	10/50	1000/3500	75/155	o.Br./>20	2/50
Polyvinylchlorid mit Weichmacher	PVC-P	1,16-1,35	10/25	170/400	-	-	o.Br.	o.Br.
Polystyrol, normal	PS	1,05	45/65	3/4	3200/3250	120/130	5/20	2/2,5
Polyethylenterephthalat	PET	1,37	47	50/300	3100	200	o.Br.	4
Polyurethan Gießharz	PUR	1,05	70/80	3/6	4000	-	-	-
lineares Polyurethan (U50)	PUR	1,21	30 (α ₁)	35 (ε ₂)	1000	-	o.Br.	3

* o.Br. - ohne Bruch, VSP - Vicat Softening Point, HDT - Heat Deflection Temperature

	Gebrauchs-temperatur c°			Formbest. in der Wärme °C		linearer Ausdehnungs-koeffizient 10 ⁻⁶ /K	Wärmeleitfähigkeit W/mK	spez. Wärme-kapazität kJ/kgK	optische Eigensch.		Wasser-aufnahme	
	maximal kurzzeitig	maximal dauernd	minimal dauernd	VSP (Vicat 5kg)	HDT ASTM D648 1,85/0,45 N/mm ²				Brechungsindex n ²⁰ ° DIN 53491	Klarheit	mg (4 Tage) DIN 53492	% (24h) ASTM D570
PE-LD	80/90	60/75	-50	-	35	250	0,32/0,40	2,1/2,5	1,51	bis transp.	<0,01	<0,01
PE-HD	90/120	70/80	-30	60/70	50	260	0,38/0,51	2,1/2,7	1,53	bis opak	<0,01	<0,01
PP	130	90	0	70	60/110	150	0,20	1,8	-	bis opak	<0,01	<0,02
PVC-U	75/100	65/85	-5	75/110	60/82	70/80	0,14/0,17	0,85/0,9	1,52/1,55	transp./opak	3/18	0,04/0,4
PVC-P	55/65	50/55	0/-20	40	-	150/210	0,15	0,9/1,8	-	transp./opak	6/30	0,15/0,75
PS	60/80	50/70	-10	78/99	110/80	70	0,18	1,3	1,59	transp.	-	0,03/0,
PET	200	100	-20	188	-	70	0,29	1,15	-	trans./opak	18/20	0,10
PUR (Harz)	100	80	-	-	90/-	10/20	0,58	1,76	-	transp.	-	0,1/0,2
PUR U50	80	60	-15	100	-	210	1,8	0,4	-	transl./opak	130	-

Tab.2 und 3 Eigenschaften der wichtigsten Kunststoffsorten

2 BIOPOLYMERE

Biomakromoleküle sind die Bausteine des Lebens. Ähnlich wie synthetische Kunststoffe können sie als Polymere, Makromoleküle die sich aus vielen sich wiederholenden Monomereinheiten aufbauen, betrachtet werden. Viele von ihnen sind wichtige, bereits seit der Antike vom Mensch verwendete Rohstoffe. Andere sind erst seit einigen Jahren bekannt und nur langsam lernen wir die chemischen und physikalischen Prozesse verstehen, die ihre Entstehung ermöglichen und bei ihrer Verwertung ablaufen.

Die moderne Biotechnologie verbessert die Herstellungsverfahren und Verarbeitung von Biopolymeren und hat die Ausbeute in der Gewinnung dieser Stoffe stark gesteigert. Werden die meisten von ihnen auch heute noch zweckentfremdet verwendet, so wird es dank ihr zum ersten Mal in der Geschichte der Menschheit möglich, natürliche Materialien ihrer ursprünglichen Bestimmung im Organismus nach zu reproduzieren - Beispiele hierzu wären Fasern auf Seidenproteinbasis (Spinnennetz) oder Kleber auf Basis des Klebproteins von Muscheln.

Neben allen natürlich vorkommenden Polymeren fallen auch noch alle im Labor, z.B. durch Fermentation erzeugten, sowie natürlich vorkommende polymerisierte Monomere unter den Begriff „Biopolymer“. Insgesamt sind acht verschiedene Gruppen natürlich vorkommender Polymere unterscheidbar: 1.) Nukleinsäuren, wie DNA und RNA, 2.) Polyamide wie Proteine und Polyaminosäuren, 3.) Polysaccharide wie Cellulose, Stärke und Xanthan, 4.) organische Polyoxyester wie Polyhydroxyalkanoate, 5.) Polythioester, die erst seit dem Jahr 2000 bekannt sind, 6.) Anorganische Polyester mit Polyphosphat als einzigem Beispiel, 7.) Polyisoprene wie natürlicher Gummi oder Gutta Percha, 8.) Polyphenole wie Lignin und Huminsäuren.¹⁶

Die Industrie ist weiters dazu übergegangen alle biologisch abbaubaren Kunststoffe auf petrochemischer Basis als Biopolymere zu bezeichnen. Im folgenden Kapitel werden die kommerziell wichtigsten von ihnen vorgestellt. Auf ihre spezielle Bedeutung als Hilfs- und Zusatzstoff in der Baustoffherzeugung wird dabei gleichzeitig eingegangen. Ironischerweise sind sie dort vor allem auf Grund ihrer Bedeutung als Zusatzstoff für Bohrlösungen bei Erdölbohrkonstruktionen verbessert und weiterentwickelt worden.

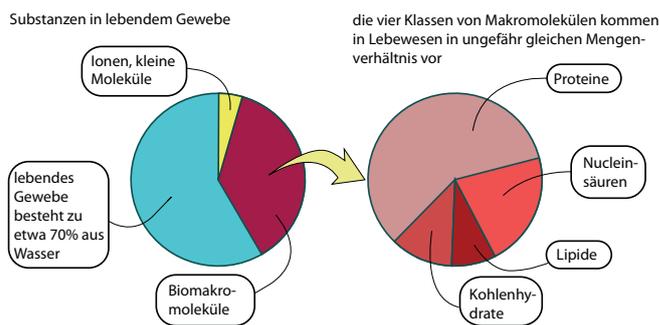


Abb.12 Bestandteile von lebendem Gewebe (mineralische Bestandteile, z.B. Knochen, ausgenommen)

Biopolymer	Quelle	chem. modifiziert	Funktion primär	sekundär	Hauptanwendungsgebiet
Ligninsulfonat	Lignin (Holz)	ja	Dispersant / Verdünnungsm.	Verzögerungsmittel	Beton, GKP, Bohrkonstruktion
Huminsäuren	Erde	ja	Wasserrückhaltmittel	Dispersant	Bohrkonstruktion
Pflanzendle	Pflanzen	ja & nein	Trägerflüssigkeit	-	Bohrkonstruktion, Beton
Wachse	Pflanzen, Insekten	nein	Beschichtung	-	Farben & Anstriche
Kasein	Milch	nein	Dispersant	-	Mörtel, Farben
Proteinextrakte	Tierhaut, -haar, Hufe	ja	Luftporenbinder	-	Beton, Mörtel
Stärke	Mais, Kartoffel	ja & nein	Verdickungsmittel	Wasserrückhaltmittel	Mörtel, Putze, Bohrkonstruktion
Cellulose	Baumwolle, Holz	ja	Wasserrückhaltmittel	Verdickungsmittel	Mörtel, Putze, Bohrkonstruktion
Guargummi	Guar Pflanze	ja & nein	Verdickungsmittel	Wasserrückhaltmittel	Putze, Bohrkonstruktion
Xanthan	Bakterien	nein	Verdickungsmittel	Antibiotikum	Bohrkonstruktion, Estrich, Farben
Welan	Bakterien	nein	Verdickungsmittel	Antibiotikum	Beton, Bohrkonstruktion
Scleroglucan	Funghi	nein	Verdickungsmittel	Antibiotikum	Bohrkonstruktion
Succinoglycan	Bakterien	nein	Verdickungsmittel	Antibiotikum	selbstnivellierende Gemische
Curdlian	Bakterien	nein	Verdickungsmittel	Antibiotikum	Beton
Rhamsan	Bakterien	nein	Verdickungsmittel	Antibiotikum	Mörtel
Chitosan	Chitin	ja	Verdickungsmittel	Antibiotikum	Bohrkonstruktion
Polyasparaginsäure	synthetisch	ja	Dispersant	Verzögerungsmittel	Gipsverzögerer
Polyester	synthetisch	ja	Dispersant	-	Mörtel, Putze

Tab.4 Biopolymere im Bauwesen wichtige Anwendungsgebiete

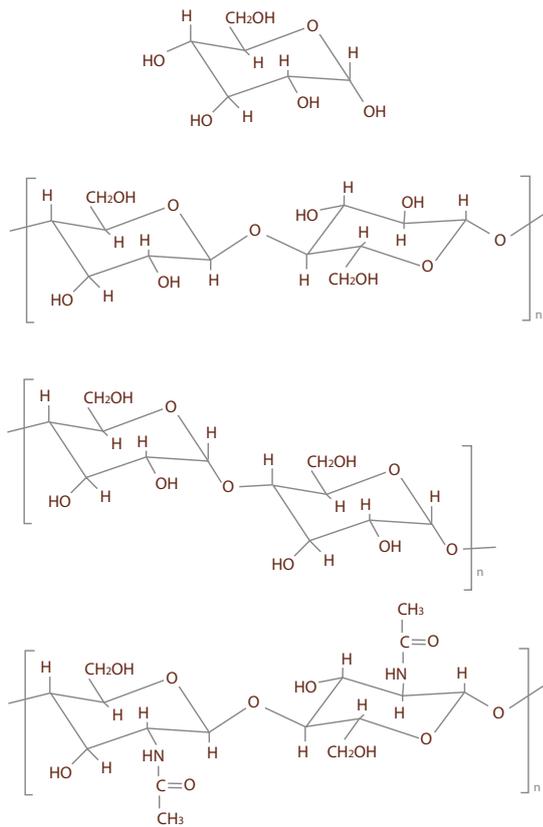


Abb.13 ringförmige Polysaccharide

(v.o.n.u.) 1 - α -Glucose, umgangsspr. auch Traubenzucker,
 2 - Cellulose, 3 - Amylose - Hauptbestandteil von Stärke, 4 - Chitin
 bei der gewählten Darstellung ist zu beachten das jeder
 Kreuzungspunkt der Bindungen ein C-Atom darstellt

2.1 POLYSACCHARIDE

Sie sind den Kohlenhydraten und damit der organischen Chemie zuzurechnen. Umgangssprachlich werden Polysaccharide auch als Mehrfachzucker bezeichnet. Diese werden von Lebewesen synthetisiert und sind aus Monosacchariden (Einfachzucker) als Monomerbaustein zusammengesetzt. Als Produkt der Photosynthese machen Polysaccharide den größten Teil der Biomasse – ca. 75% des gesamten organischen Materials¹⁷ – aus.

Monosaccharide entstehen durch die partielle Oxidation mehrwertiger Alkohole und bestehen aus einer Kette von mindestens drei Kohlenstoffatomen an die wiederum Wasserstoff- und Hydroxylgruppen –OH gebunden sind. Charakteristisch für sie sind in erster Linie die Anzahl der in der Kette befindlichen C-Atome sowie Lage und Ausrichtung der –OH Gruppen. Sie enthalten ebenfalls eine Carbonylgruppe –CO (ein doppelt gebundenes Sauerstoffatom) dessen Lage ebenfalls charakteristisch für das Molekül ist. Derivate enthalten zum Teil noch andere chemische Elemente.

Neben einer offenkettigen Form sind auch ringförmige Konfigurationen der Kohlenstoffkette möglich. Häufig vorkommende Polysaccharide wie Cellulose, Stärke und Chitin besitzen zum Beispiel als Grundgerüst einen sechseckigen Ring aus fünf Kohlenstoffatomen und einem Sauerstoffatom. Das Monosaccharid, aus dem Cellulose und der Hauptbestandteil der Stärke aufgebaut sind, heißt Glucose. Die Stoffe unterscheiden sich nur in der Art der Verknüpfung (dem stereochemischen Aufbau) der einzelnen Glucose-Moleküle. Lediglich die Ausrichtung der Wasserstoffatome an den Verbindungsstellen der Glucosemoleküle ist bei ihnen vertauscht (α - bzw. β -Konfiguration). Im Chitin sind die Hydroxylgruppen durch sog. Acetamidogruppen (-NHCOCH₃) ersetzt.

2.1.1 CELLULOSE

2.1.1.1 Vorkommen und Verwertung

Als Cellulose wird der Hauptbestandteil pflanzlicher Zellwände bezeichnet aus denen deren Strukturfasern (Fibrillen) aufgebaut sind. Sie ist ein wichtiges Photosyntheseprodukt, macht fast 40% der gesamten Biomasse aus und stellt vor Lignin und Chitin die am häufigsten natürlich vorkommende organische Verbindung dar.¹⁸ Die wichtigsten natürlichen Rohstoffquellen für Cellulose sind Holz und Baumwolle. In Holz besitzt sie Gewichtsanteile von 40-50%, in Baumwolle bis zu 90%.¹⁹ Weitere Rohstoffquellen sind Flachs, Jute, Bagasse, Ramie, Stroh, etc. Außerdem ist es heute bereits möglich Cellulose künstlich, auf Basis bakterieller Fermentation, herzustellen – dies geschieht allerdings noch eher in bescheidenem Umfang. Der bei weitem größte Teil der heutigen Celluloseproduktion wird von der Papierindustrie benötigt. Die hier zur Anwendung kommenden Aufschlussverfahren, durch die Cellulose von den anderen Holzbestandteilen Lignin und Hemicellulose gelöst wird, können allerdings mit erheblichen Umweltbelastungen verbunden sein. Üblicherweise werden die Holzschnitzele in einer starken alkalischen Schwefelsalzlösung gekocht und die dabei erhaltene Cellulose nachfolgend über verschiedene Prozesse gebleicht. Es entstehen dabei giftige Gase, die eine Abluftanlage notwendig machen. In Wasser abgeführte Holzreste können zum Kippen von Gewässern führen. Neuere Entwicklungen haben bereits schwefelfreie Aufschlussverfahren wie das Allcell- oder das Organocell-Verfahren und Clean Fractionation möglich gemacht und stellen umweltfreundlichere Alternativen dar. Je nach verwendetem Rohstoff und angewandtem Aufschluss- und Bleichverfahren kann das Cellulose-Endprodukt in seinen Eigenschaften variieren. Papierabfälle stellen für das Bauwesen eine wichtige Rohstoffquelle dar und so gibt es etliche Wärmedämmprodukte, die aus recyceltem Papier hergestellt werden. Üblicherweise werden diese Dämmstoffe in Hohlräume eingeblasen, neue Systeme können auch direkt auf den Untergrund aufgespritzt werden.



Abb.14 Cellulose Einblasdämmung
aus Altpapier (hier Isofloc)

2.1.1.2 Chemischer Aufbau

Cellulose zählt zu den am längsten und besten erforschten Naturstoffen überhaupt, Gewinnungs- und Verwertungsverfahren bietet allerdings noch immer vielfältige Entwicklungsmöglichkeiten. In Abb.13 ist die chemische Strukturformel der Cellulose abgebildet. Die Moleküle werden als β -D-Glucosen bezeichnet, die 1,4 glykosidisch miteinander verknüpft sind. β -D- gibt hierbei Auskunft über die stereospezifische Anordnung der Atome im Glucose-Molekül und

¹⁸ - Ebda S.84 [5]

¹⁹ - D.L. Kaplan (Hg.), *Biopolymers from Renewable Resources*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998 S.47 [18]

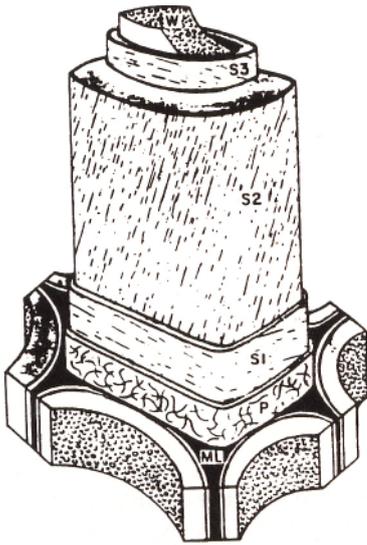


Abb 15. Weichholztracheid
bestehend aus Mittellamelle (ML), Primär- (P), und
Sekundärzellwand (S1, S2, S3) wobei S2 rund 80-95%
des Zellwandmaterials enthält

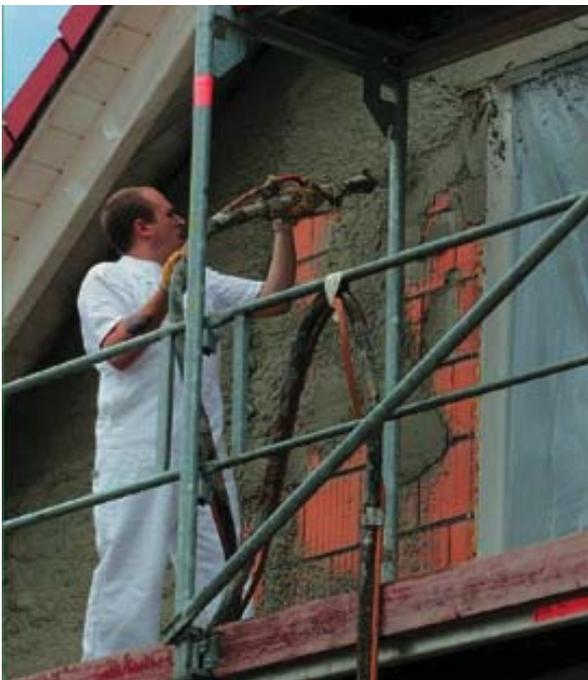


Abb 16. Aufbringen von Spritzputz

1, 4 sind die Nummern der C-Atome innerhalb der Saccharidkette über die die Moleküle miteinander verknüpft sind. Grundsätzlich kann für natürliche Cellulose ein Polymerisationsgrad von über 10.000 und ein Molekulargewicht von etwa 2.000.000 angenommen werden.²⁰ Die Celluloseketten bilden bandartige Fasern, die sog. Mikrofibrillen, die je nach Rohstoffquelle eine Breite von 10-30nm und eine Länge von bis zu 150nm aufweisen. Die Mikrofibrillen werden wiederum aus Elementarfibrillen aus je 36 Celluloseketten aufgebaut.²¹ Fibrillenstruktur, Molekulargewicht und Polymerisationsgrad hängen bei natürlich vorkommender Cellulose immer von der Rohstoffquelle und angewandtem Aufschlussverfahren ab.

Während über die chemische Struktur der Cellulose heute weitgehend Einigkeit herrscht, gibt es in Bezug auf die übermolekulare Struktur, Kristall- und Fibrillen-Morphologie noch ungeklärte Fragen. Vor allem intermolekulare Kräfte, die zu unterschiedlicher Kristallbildung innerhalb der Cellulose führen, sind Gegenstand intensiver Forschungen. Um einen Eindruck von der Komplexität des Themas zu erhalten sei hier lediglich erwähnt, dass die Wissenschaft zumindest zwischen vier Gruppen von Cellulosepolymorphen unterscheidet. Neben einer Erforschung der Cellulosestruktur bieten auch die Rohstoffgewinnung und eine Verbesserung der Verfahrenstechnik in der Herstellung verschiedener Cellulosederivate vielfältiges Innovationspotential. Cellulose spielt, neben seinen chemisch modifizierten Varianten, vor allem als natürliches Faserprodukt eine große Rolle für den Bausektor. Diese werden im Kapitel Naturfasern näher beschrieben.

2.1.1.3 Anwendungsgebiete im Bauwesen

Die drei Hydroxylgruppen der Glucosebausteine sind angreifbar für chemische Reaktionen wodurch die Derivatisierung der Cellulose ermöglicht wird. Dabei ergeben sich die Möglichkeiten, a) Cellulose zu lösen und danach Folien oder Fasern (Viskose) herzustellen, b) Cellulose zu thermoplastischen Produkten umzuformen, c) die Masseigenschaften einzustellen, ohne physikalische Eigenschaften zu verändern oder d) die chemischen Eigenschaften der Cellulose zu verändern.²² Thermoplastische Celluloseprodukte werden im Kapitel Biokunststoffe vorgestellt. Cellulosederivate werden heute in vielfältiger Weise als Zusatzstoffe für Kosmetika, in der Pharmazie, als Papierbeschichtung und auch im Bauwesen eingesetzt.

Cellulosederivate stellen einen wichtigen Bestandteil der bereits weiter oben angeführten Konstruktionschemikalien dar. Ca. 100.000t an Cellulosederivaten, mit einem Wert

von \$500 Mio. auf Produktionsebene, werden jährlich im Bauwesen verwendet.¹⁶ Ihr Wasserrückhaltevermögen hat sie zu wichtigen Zuschlägen für Putze, Mörtel und Fliesenkleber gemacht. Wasserrückhaltevermögen stellt insofern eine wichtige Eigenschaft dar, weil Putze und Mörtel zumeist auf porösem Untergrund aufgebracht werden und ihnen durch Kapillarwirkung des Untergrunds das Wasser entzogen wird. Hat man sich früher damit beholfen den Untergrund mit Wasser zu benetzen, machen Cellulose-Ether Produkte heute einen direkten Auftrag von Putzen (Spritzputze) und Dünnbettmörtel möglich. Auch als Emulgatoren und Verdickungsmittel finden Celluloseprodukte (z.B. in der Herstellung von Farben und Klebern) Anwendung. Im Betonbau werden Cellulosederivate als Zuschlag zugesetzt, um Auswaschungen zu verhindern. Tabelle 4 gibt eine Übersicht der Einsatzgebiete von Cellulose-Ethern im Bauwesen.

2.1.2 STÄRKE

2.1.2.1 Vorkommen und Verwertung

Sie ist ebenfalls ein im Überfluß vorkommendes pflanzliches Photosyntheseprodukt und Polysaccharid. Dem Menschen dient sie als wichtiges Nahrungsmittel und ihre Verwendung als technischer Hilfsstoff kann auch bereits bis in die Frühzeit der Menschheitsgeschichte zurückverfolgt werden. In den Speicherorganen der Pflanzen (Körner, Knollen, Wurzeln, Früchte, Mark, etc.) wird sie als sog. Reservekohlenhydrat zusammengefasst und kann bei Bedarf über Enzymsysteme durch Veratmung zur Energiegewinnung oder zur Bildung von Zell- und Gerüstsubstanz verwendet werden. Wichtigste industrielle Rohstoffquellen sind Getreidestärken von Weizen und Mais sowie Knollenstärken von Kartoffel und Tapioka. Weitere relevante Stärkelieferanten sind Gerste, Roggen, Hirse, Reis, Erbsen, Süßkartoffel, Pfeilwurz und andere Pflanzen. Die Stärkeproduktion erfolgt üblicherweise so, dass zuerst der Stärkerohstoff zerkleinert und die Stärke danach ausgewaschen und entwässert wird. Für jeden dieser drei Arbeitsschritte gibt es vielfältige Maschinen und Apparaturen, die auf den jeweiligen Rohstoff zugeschnitten sind, da sich diese in Zusammensetzung und Stärkegehalt relativ stark unterscheiden. Die technisch wichtigste Eigenschaft von Stärke ist es, in heißem Wasser zu verkleben und zu verkleistern. Mittels Stärke und Stärkederivaten als Additiv können die rheologischen Eigenschaften behandelte Stoffe eingestellt werden. Industriell wird Stärke in erster Linie hydrolysiert um Süßungsmittel (Glucose) für die Lebensmittelindustrie, Sirup oder Hilfsstoffen für Pharma- und Brauindustrie zu gewinnen. Der Rest der nativen Stärke wird hauptsächlich in der Papierindustrie als

Einsatzgebiet	Funktion	Celluloseether
Bauprodukte		MC - Methyl Cellulose MHEC - Methyl Hydroxyethyl C. MHPC - Methyl Hydroxypropyl C.
Gipsputze	Wasserrückhalteigenschaften, verhindert Abrutschen der Putze, verbessert Klebeeigenschaften und Verarbeitbarkeit	
Kalkputze		
Zementputze		
Fliesenkleber		CMC, PAC - Na-Carboxymethyl c.
Fugenspachtel		
Tapetenkleister		
Farben und Lacke		HEC - Hydroxyethyl C. MHEC - Methyl Hydroxyethyl C. MHPC - Methyl Hydroxypropyl C. EC - Ethyl Cellulose EHEC - Ethyl Hydroxyethyl C.
Wasser gebundene Latexfarben	Pigmentsuspension, Verdickungsmittel, Streichfähigkeit, Flexibilität	
Losungsmittelbasierte Beschichtungen	Emulgator	
Olbohrkonstruktion		
Zementierung		
Bohrflüssigkeiten	Wasserrückhaltmittel Verzögerer, Verdickungsmittel	CMC, PAC HEC, CMHEC - Na-Carboxymethyl hydroxyethyl C. HEC MHPC MHEC
Keramik	Binder Wasserrückhaltmittel	

Tab.5. Anwendungsgebiete von Celluloseethern im Bauwesen



Abb.17 Maniokwurzeln - Liefreant von Tapiokastärke

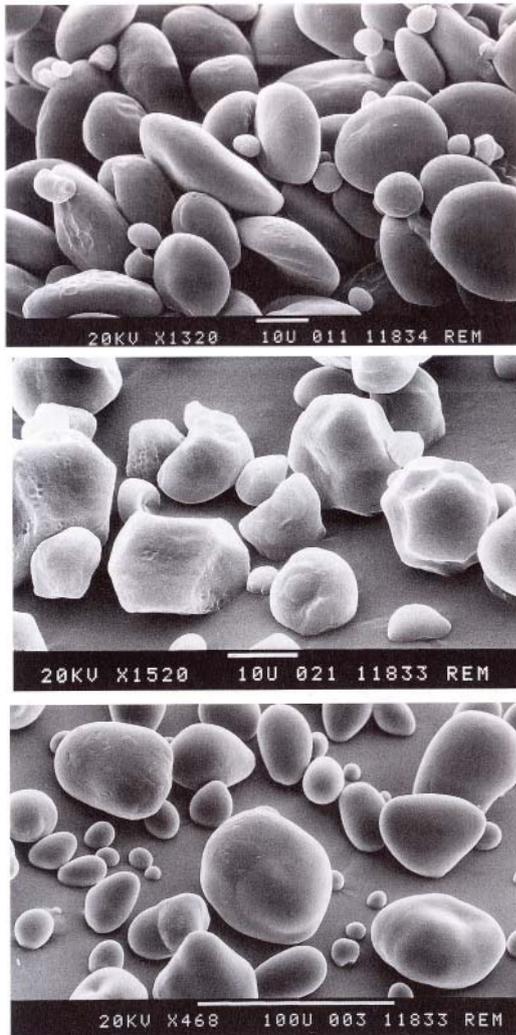


Abb.18 Elektronenmikroskopische Aufnahmen
(v.o.n.u.) Weizen, Mais- und Kartoffelstärke

Leim oder zur Oberflächenbehandlung verwendet. Weitere große Teile finden als Geschmacksverstärker, Geliermittel und zur Herstellung von Nudeln, Brot, Backwaren, Saucen, Babynahrung, Glacierungen, etc. in der Lebensmittelindustrie Verwendung. Weitere Anwendungsgebiete sind in der Textil- und Klebstoffindustrie anzutreffen.²³ Vor allem auch als Rohstoff in der Herstellung von biologisch abbaubaren Verpackungsmaterialien besitzt Stärke große Wichtigkeit.

2.1.2.2 Chemischer Aufbau

Auf molekularer Ebene besteht Stärke aus den beiden Bestandteilen Amylose (übl. etwa 20-30%) und Amylopektin (etwa 70-80%). Es gibt allerdings auch sog. wachshaltige Stärken (bis zu 99% Amylopektin) und hochamylosehaltige Stärken (bis zu 70%). Bei beiden handelt es sich um α -D 1,4 Glucosemoleküle wobei Amylopektin pro Molekülkette zusätzlich etwa 4% 1,6 Verknüpfungen aufweist und im Gegensatz zur beinahe linear aufgebauten Amylose eine verzweigte Molekülstruktur bildet.²⁴ Amylose befindet sich zumeist in einem amorphen Zustand und weist ein Molekulargewicht von etwa 10^5 bis 10^6 während Amylopektin teilweise kristalline Strukturen bildet und ein Molekulargewicht von 10^7 bis 10^9 aufweist.²⁵ In der Pflanze formen sie Stärkekörner die, je nach Rohstoff, ein charakteristisches Aussehen besitzen.

Die verschiedenen Amylose- und Amylopektin Gehälter der einzelnen Stärkearten beeinflussen Möglichkeiten in der Weiterverarbeitung maßgeblich. Weiters enthalten natürliche Stärken zu geringen Teilen nicht stärkehaltige Bestandteile (Lipide, Proteine), die eine Verarbeitung und Performance von Stärkekunststoffen nachhaltig beeinflussen können. Stärke wird auf vielfältige Art modifiziert. Die wichtigste Art der Stärkebehandlung ist die hydrothermische Behandlung mit Wasser und Wärme bei der sog. „Quellstärken“ erzeugt werden. Außerdem lassen sich Stärkeeigenschaften durch eine Behandlung mit Säure verändern. Übliche Behandlungsmethoden sind ferner ein gezielter Abbau durch Oxidation oder, wie bereits erwähnt, durch Hydrolyse. Wie auch bei der Cellulose sind die Hydroxylgruppen der Glucoseeinheiten für eine chemische Modifikation angreifbar. Bereits geringe Substitutionsgrade bewirken hier gravierende Eigenschaftsveränderungen. Über gentechnische Entwicklung und die Erzeugung transgener Pflanzen versucht man maßgeschneiderte Stärken für bestimmte Prozesse zu erzeugen und erhofft sich einen Ersatz für chemisch modifizierte Stärken zu finden.

2.1.2.3 Anwendungsgebiete im Bauwesen

Im Bauwesen werden fast ausschließlich Quellstärken und andere modifizierte Stärken eingesetzt. Sie werden zum Beispiel dem Gipsgemisch in der Erzeugung von Gipskartonplatten zugesetzt. Durch die Stärke wird die Kartonoberfläche mit dem Gipskörper verklebt. Im Betonbau werden Stärkederivate als Additiv zugegeben um das sog. Entmischen zu verhindern. Außerdem lassen sich mittels Stärkegele Leichtbetone erzeugen – die Stärke entzieht durch ihr Wasserbindungsvermögen dem Zement das nötige Wasser zum Abbinden und lässt so gleichmäßige Poren im Beton entstehen. Hydroxypropylstärke wird Wandputzen zugesetzt und erhöht deren Viskosität und Klebefähigkeit auf der Wand. Sie verhindert so das nachträgliche Abrutschen des Putzes von der Wand und verstärkt darüber hinaus das Wasserrückhaltevermögen der anderen Stoffe. Hierbei genügen allerdings Massenanteile des Additivs von etwa 0,01% im Putz.²⁶ Durch die Behandlung mit alkalischen Substanzen, Säuren oder Salzen, Oxidations- und Quellmittel lassen sich außerdem äußerst widerstandsfähige, feuchtigkeitsbeständige Klebstoffe herstellen. Diese werden zwar zumeist in der Papierindustrie verwendet, finden aber, zusammen mit Kondensations- und Proteinleimen, Verwendung in der Herstellung von Sperrholzplatten. Vor wenigen Jahren ist es außerdem gelungen mittels PVOH (Polyvinylalkohol) vernetzte Stärkekleber herzustellen, die im Holzleimbau eingesetzt werden könnten.²⁷ Generell dienen Stärkeprodukte häufig als günstige Füll-, Streck- und Verstärkungsmittel in der Klebstoff- und Gummierzeugung. Auch als Füllstoffe in der Herstellung von biologisch abbaubaren Kunststoffen sind sie in letzter Zeit Ziel intensiver Forschungen gewesen. Eine interessante Entwicklung der Verpackungsindustrie ist auch die Entwicklung von auf Stärke basierenden Schaumstoffen (z.B. geschäumte Lebensmitteltassen oder Schaumstofflocken als Füllmaterial). Hydrophilie und Verlust der mechanischen Eigenschaften unter Einwirkung von Feuchtigkeit zählen zur größten Schwäche von reinen Stärkeprodukten.

2.1.3 CHITIN

2.1.3.1 Vorkommen und Verwertung

Chitin stellt ein weiteres sehr weit verbreitetes Polysaccharid dar und dient der Strukturbildung. Im Gegensatz zu vielen anderen Polysacchariden wird sein Potential noch nicht so weitreichend ausgeschöpft. In erster Linie findet man Chitin in den Skeletten, Schalen und Exoskeletten



Abb.19 Verpackungsmaterialien auf Stärkebasis
(o.) Stärke-PVA Blend (u.) Verpackungsflocken aus einer extrudierten Stärkeacetat-Wasser Lösung

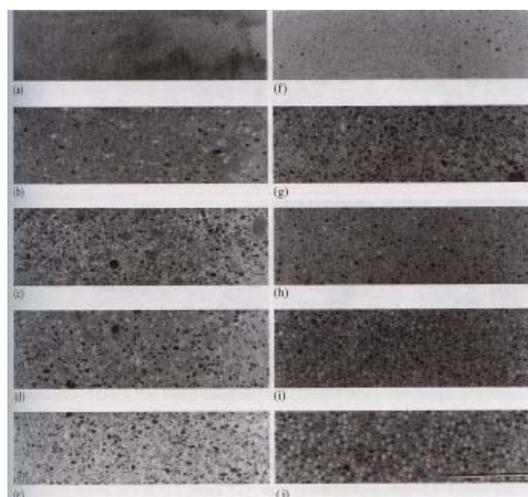


Abb.20 Porenbeton

- a) reiner Beton
- b) Weizenstärkegel / Beton 0.03
- c) Weizenstärkegel / Beton 0.07
- d) Weizenstärkegel / Beton 0.13
- e) Weizenstärkegel / Beton 0.21
- f) Perlite / Beton 0.35
- g) Weizenstärkegel / Beton 0.21
- h) Hochamylosehaltige Maisstärke / Beton 0.067
- i) Algine / Beton Mischung 0.0084

25 - D.L. Kaplan (Hg.), *Biopolymers from Renewable Resources*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1998, S.31 [18]

26 - A. Steinbüchel (Ed.), *Biopolymers..Volume 10..*, Wiley-VCH, Weinheim, 2003 S.63 [27]

27 - A.K. Mohanty, *Natural Fibers ...*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2005 S.663 [26]



Abb.21 Quelle der Chitin-/Chitosangewinnung: Garnelen

Kügelchen	Metallchelatlignand Abwasserreinigung Heilmittelabgabe
Beschichtungen	Oberflächenbehandlung Textilfinishes verbessert Keimeigen- schaften durch Saatbe- schichtung Papierleimung
Fasern	Medizinische Textilien Wundnähte
Folien	Membrane Wundpflege
Pulver	Verpackungsmittel Abwasserreinigung Zusatz in Tiernahrung
Objects	Orthopädie Kontaktlinsen
Lösungen / Gele	Kosmetika Abwasserreinigung

Tab.6 Potentielle Anwendung von
Chitin und Chitosan Produkte

von Insekten und maritimen Schalentieren. Zwar hat es strukturbildende Eigenschaften, ist aber für die Flexibilität der Skelette verantwortlich und erreicht seine Härte erst im Zusammenspiel mit diversen Proteinen. Eine Quelle für Chitin stellen auch einige Pilzarten dar. Allerdings ist hier das Chitin oft an andere chemische Bestandteile gebunden, was die Isolation erschwert. Der Chitinanteil in diversen Pilzzellen liegt bei 5-20%, zwischen 20 und 38% in Würmern und kann bis zu 70% in den Panzern von Krebsen erreichen.²⁸ Neben Pilzen stellen für eine industrielle Verwertung die großen Mengen an Abfällen, die in der Fischerei (z.B. durch den Garnelenfang) anfallen - und bis heute größtenteils ungenutzt bleiben, teilweise sogar ein ökologisches Problem darstellen – die wichtigsten Rohstoffquellen dar. Für eine Verarbeitung wird das Chitin zumeist zu Chitosan deacetyliert (Acetylgruppe -CO-CH₃). Im Gegensatz zu Chitin ist dieses in schwachen organischen Säuren löslich.

2.1.3.2 Chemischer Aufbau

Strukturell besteht Chitin aus sog. β -1,4 2-Acetamido-2-Deoxy-D-Glucose Einheiten, die teilweise deacetyliert sein können.²⁹ Der Grad der Acetylierung ist ein entscheidender Parameter für die Charaktereigenschaften von Chitin. So wie Chitin nie vollständig acetyliert vorliegt, kann auch Chitosan, außer unter strengsten Bedingungen, nicht vollständig deacetyliert werden. Natürliches Chitin wird in drei polymorphen Formen, nach kristalliner Form und Acetylierungsgrad, unterschieden. Die Extraktion von Chitosan aus tierischen Abfällen erfolgt in drei Stufen. Erstens Entmineralisierung mit Hilfe einer schwachen Mineralsäure, zweitens eine „Entproteinisierung“ mit Hilfe von schwachen Alkalien unter Hitze, wobei das Chitin ausfällt und schließlich Hydrolyse mittels konzentrierter Alkalien, ebenfalls unter Hitze. Die Aminogruppe in Chitin und Chitosan ist angreifbar für eine Reihe von chemischen Reaktionen und macht das Molekül somit für chemische Modifikation zugänglich.

2.1.3.3 Anwendungsgebiete

Chitosan lässt sich in vielfältiger Weise verarbeiten und es werden daraus Folien, Fasern, Objekte, Gele, Pasten und mikrokristalline Puder hergestellt. Für eine Verarbeitung in größerem Stil wird gelöstes Chitosan oder Chitosanpulver verwendet. Der Fokus liegt auf der Erzeugung von qualitativ hochwertigen Materialien als Zuschlag- und Zusatzstoff in geringen Mengen, sodass höhere Produktionskosten gerechtfertigt sind. Tab. 6 zeigt potentielle Anwendungsgebiete von Chitin und Chitosan.

28 - <http://www.voneinanderlernen.uni-kiel.de/typo3/index.php?id=30> [40]

29 - D.L. Kaplan (Hg.), *Biopolymers from Renewable Resources*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998 S.101 [18]

2.1.4 POLYSACCHARIDE VON ALGEN

2.1.4.1 Vorkommen und Verwertung

Agar, Alginate und Karrageen sind Polysaccharide, die in den Zellwänden verschiedener Algenarten vorkommen. Sie werden hauptsächlich als Emulgatoren, Gelier- oder Verdickungsmittel für Lebens- oder Arzneimittel verwendet. Agar ist auch als Nährboden für Bakterienkulturen in der Mikrobiologie weit verbreitet. Aus Alginaten werden verschiedene Biomaterialien für den medizinischen Bereich hergestellt (Wundauflagen und Kompressen, Haftmittel für Zahnprothesen, Herstellung präziser Körperabformungen, etc.). Salze von Alginaten besitzen die einzigartige Eigenschaft sich zunächst in kaltem Wasser zu lösen dann aber durch Zugabe von Kalzium größere Viskosität auszubilden und unter weiterer Zugabe schließlich vollständig zu gelieren. Sehr hohe Kalziumkonzentrationen führen zur Bildung von Kalziumalginat, welches wasserunlöslich ist.

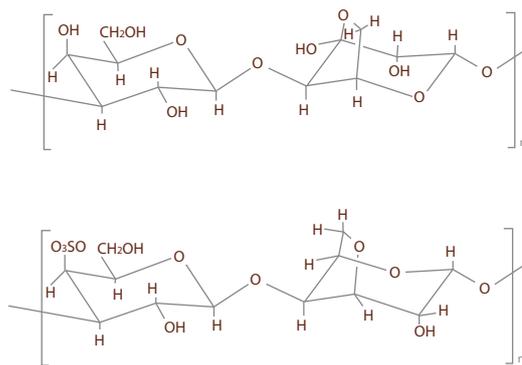


Abb.22 Strukturformeln Agarose (o.) und Karrageen (u.)

2.1.4.2 Anwendungsgebiete im Bauwesen

Im Bauwesen tauchen Alginate zum Teil als Bestandteil von Farben auf. Da Bausysteme häufig Kalzium (als Bestandteil von Zement oder Gips) enthalten, könnten auch hier Alginate zur Stabilisierung oder zum Erreichen bestimmter Viskositäten eingesetzt werden. Karrageen wird allgemein in verdickendes oder gelierendes Karrageen unterteilt, wobei letzteres in der Lage ist elastische bis starke, spröde Gele zu bilden. Über Zugaben von Kalzium oder Pottasche können auch hier spezifische Eigenschaften bezüglich der Viskosität bzw. Gelbildung eingestellt werden.³⁰ Tabelle 7 zeigt einige derzeitige industrieller Anwendungen von Alginaten.

2.1.5 BAKTERIELL ERZEUGTE POLYSACCHARIDE

2.1.5.1 Arten und Herstellung

Eine ganze Reihe von Polysacchariden wird heute gezielt in Bioreaktoren von Bakterien hergestellt. Diese werden mit günstigen energiereichen Substanzen „gefüttert“ und bilden üblicherweise einen viskosen Brei, aus dem sie dann extrahiert werden. Die größte Menge wird derzeit von Xanthan produziert, das vor allem als Verdickungsmittel in der Lebensmittelproduktion eingesetzt wird. Weitere Polysaccharide aus fermentativer Produktion sind zum Beispiel Dextran, Gelan, Welan, Rhamsan, Curdlan, Levan, Scleroglucan, Succinoglucan und Pullulan. Sie besitzen alle

Kontrolle rheologischer Eigenschaften	Papierbeschichtungen	Wasserrückhalte-eigenschaften
Verbesserung von Oberflächeneigenschaften und Tintenakzeptanz	Papierverleimung	Gelbildung
Kontrolle der Durchdringung	Kleber	Emulgator
feine Liniendrucke	Textildruck	Stabilisierungsmittel
produziert beständige Gele in Kaltwassersystemen	Lufterfrischer	
elastische Gele in Reaktion mit Boraten	Sprengstoffe	
nichttoxisches Material für Abformungen	Spielzeug	
hält auf schrägen Oberflächen und beschleunigt Keimung	Hydroseeding/-mulching	
emulgiert Öl	Polituren	
emulgiert und stabilisiert	Antischäumer	
stabilisiert Emulsion und bietet Viskosität	Latex	
löst Feststoffe	Keramik	
löst Feststoffe	Reinigungsmittel	

Tab.7 Anwendungsgebiete von Alginaten

das Potential als erneuerbare Rohstoffe der Kunststoffherstellung zu dienen.

2.1.5.2 Anwendungsgebiete im Bauwesen³¹

Xanthan stellt auch im Bauwesen das mengenmäßig am häufigsten eingesetzte bakteriell erzeugte Polysaccharid dar. Es wird vor allem als viskositätssteigerndes Mittel Bohrflüssigkeiten zugesetzt. Xanthan zeigt dabei interessante strukturviskose Eigenschaften – bei einer Erhöhung der Scherkräfte behält es eine niedrige Plastizität. Dies ermöglicht ein leichtes Einbringen der Bohrflüssigkeit und stellt eine hohe Viskosität sicher, sobald das Hineinpumpen der Flüssigkeit gestoppt wird. Ab Temperaturen von 60°C beginnt Xanthan allerdings sein Eigenschaften zu verlieren, bzw. verliert sie ab 120° vollständig. Weitere Einsatzgebiete findet Xanthan als Zuschlag von hochflüssigen Estrichen (verhindert das Ausbluten) und in Gipsputzen oder Lacken (erhöht die Klebefestigkeit).



Abb.23 Labor zur Fermentation von Biopolymeren

Scleroglucan weist ebenfalls interessante strukturviskose Eigenschaften auf und wird als Zuschlag für Bohrflüssigkeiten verwendet. Im Gegensatz zu Xanthan hat sich gezeigt, dass es weniger stark am Felsen haftet. Scleroglucan wird deshalb häufig beim Bohren horizontaler Schächte verwendet bei welchen der Hohlraum nicht auszementiert wird, sondern lediglich mittels Sandschichten ausgekleidet ist. Auch die Temperaturbeständigkeit von Scleroglucan liegt mit 150° höher als die von Xanthan. Eine weitere Nischenapplikation findet Scleroglucan als Emulgator in Spritzasphalt.



Abb.24 Pilz *Sclerotium rolfsii*
zur Gewinnung von Scleroglucan

Welan besitzt, im Gegensatz zu den anderen mikrobiell erzeugten Polysacchariden die besten Stabilisierungseigenschaften für hochflüssigen Beton und verhindert sog. „bluten“. Als sog. Superplastifizierer wird es auch zementhaltigen Injektionsmörteln zugesetzt. Das zweite große Einsatzgebiet findet Welan als Trennmittel bei der Herstellung von Bohrlochkonstruktionen.

Succinoglycan wird selbstnivellierenden Ausgleichsmassen zugesetzt, die strukturviskose Zuschläge erfordern. Es weist hier ähnlich Eigenschaften wie Casein (s. Protein-basierende Materialien) auf. Der größte Nachteil von Succinoglycan liegt in seinem hohen Preis.

Curdlan wird bis zu einem gewissen Grad, ähnlich wie Welan, zum Stabilisieren von selbstverdichtendem Beton verwendet.

31 - A. Steinbüchel (Ed.), *Biopolymers..Volume 10., Wiley-VCH, Weinheim, 2003 S.72-80 [27]*

32 - Ebda S.90 [27]

Die höchsten Viskositäten und größten Reduktionen von Blutungswasser konnten durch den Einsatz von **Rhamsan** erzielt werden. Es wird aber auf Grund seines noch sehr hohen Preises nur bedingt eingesetzt.

Dextran und **Pullulan**³² werden im Bauwesen noch nicht eingesetzt. Pullulan zeigt interessante, extrem starke Klebeeigenschaften auf Holz. Wässrige Lösungen von Pullulan zeigten bessere Klebefähigkeit auf Holz als Stärke, Celluloseether und Phenolharze.

2.1.6 WEITERE POLYSACCHARIDE

Neben den bereits erwähnten gibt es noch eine Reihe weiterer Polysaccharide, die in Pflanzen oder Lebewesen vorkommen. Eine wichtige Klasse industriell verwendeter Polysaccharide sind zum Beispiel pflanzliche Gummi, die - wie so viele andere Polysaccharide - gebräuchliche Lebensmittelzusätze (z.B. als Verdickungs-, Gelier- oder Stabilisierungsmittel) sind. Die Pflanzengummi sind in den Samen verschiedener Pflanzen eingelagert und dienen, ähnlich wie Stärke, der ersten Energieversorgung der Jungpflanzen. Teilweise wird der Gummi auch aus dem Exsudat verschiedener Pflanzenarten gewonnen. Einige Pflanzenarten, die zur Herstellung von Pflanzengummi genutzt werden, sind die Guarbohne, Johannisbrot (Carob), Teufelszunge (Konjakwurzel), Tamarinden, Kassien, Akazien (Gummi Arabicum), Garaya und Tragant.

Ein weiteres Polysaccharid, das in pflanzlichen Zellwänden neben Cellulose und Hemicellulose vorkommt, ist Pektin. Hydratisiertes Pektin weist die außergewöhnliche Eigenschaft auf, das 15-25fache des Eigengewichts an Wasser binden zu können. Ein Beispiel für Polysaccharide, die in höher entwickelten Tieren vorkommen, sind Glykosaminoglykane. Hierzu zählt die Hyaluronsäure, die einige biomedizinische Anwendungen besitzt und aus Hahnenkämmen extrahiert wird.³³ Weitere Glykosaminoglykane sind Heparin, Chondroitin- und Keratansulfat.

2.1.6.1 Pflanzliche Gummi im Bauwesen³⁴

Im Bauwesen finden nur Guar- und Johannisbrotkernmehl Anwendung. Guargummi dient, chemisch modifiziert als Hydroxypropyl-Guar, in geringen Mengen in der Farbenherstellung also viskositätserhöhendes Mittel und Stabilisator. Er wird als Wasserrückhalteadditiv und viskositätssteigerndes Mittel auch Gipsputzen und Spachtelmassen zugesetzt, und scheint dabei synergistische Effekte mit Methylcellulose zu zeigen. Auch Bohrflüssigkeiten wird er zugesetzt wobei



Abb.25 historische Zeichnungen von
Acacia Senegal - Gummi Arabicum (o.)
Johannisbrotbaum (u.)

33 - 17 - E.S. Stevens, *Green Plastics*, Princeton University Press, Princeton, 2002 S.89 [5]

34 - A. Steinbüchel (Ed.), *Biopolymers..Volume 10.*, Wiley-VCH, Weinheim, 2003 S.68-70 [27]

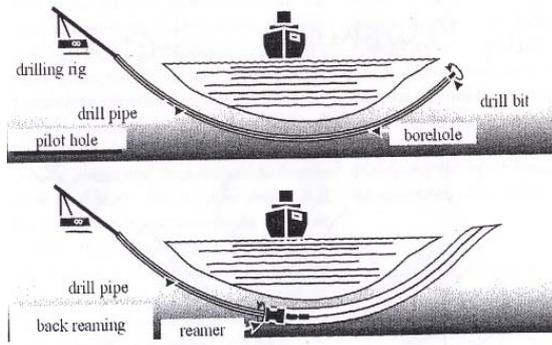


Abb.26 grabenlose Bohroperation

Mikroorganismen im Boden folglich zu einem raschen biologischen Abbau des Gummis führen. Dies kann technisch ein Problem darstellen, aber, z.B. beim grabenlosen Bohren von Kabelkanälen unter Flüssen oder Autobahnen aus ökologischer Sicht durchaus erwünscht sein. Johannisbrotkernmehl zeigt als viskositätssteigerndes Mittel zusammen mit Xanthan, Agar oder Karrageen außergewöhnliche synergistische Effekte (um ein vielfaches erhöhte Viskosität), hat sich auf Grund seines hohen Preises allerdings noch nicht durchsetzen können. Tamarind und Kassiengummis zeigen ähnliche Eigenschaften wie Guar- und Johannisbrotkernmehl. Die Exsudatgummis Gummi Arabicum, Garaya und Tragantgummis werden derzeit hauptsächlich in der Lebensmittelindustrie eingesetzt. Gummi Arabicum weist interessante Klebeeigenschaften auf während Garaya- und Tragantgummis als Emulgatoren und Stabilisatoren von Öl-Wasser-Dispersionen dienen könnten.

2.2 PROTEINE

Proteine, umgangssprachlich auch Eiweiß genannt, sind eine Klasse von Biopolymeren, die große Hoffnungen und utopische Pläne und Träume erwecken können: hochfeste Fasern mit nahezu perfektem elastischem Verhalten oder stärkste Klebeverbindungen werden in natürlichen Systemen durch sie erreicht. Großer Aufwand in Herstellung bzw. Gewinnung machen sie relativ teuer, allerdings haben sie durch ihre biologische Abbaubarkeit und ihre Produzierbarkeit aus NAWARO großes Interesse auf sich gelenkt. Zusammen mit Polysacchariden und Nukleinsäuren bilden sie die essenziellen Biomakromoleküle aus denen lebendes Gewebe aufgebaut ist. Ihr chemischer Aufbau ist exakt durch die DNA gesteuert und je nach Zusammensetzung können Proteine enzymatische oder strukturbildende Funktionen übernehmen. Während ihre chemische Synthese seit den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts untersucht und durchgeführt wird, bieten Entwicklungen in Bereichen der DNA -Technologie und genetischem Design seit nunmehr etwa zwanzig Jahren auch die Möglichkeit Proteine bis zu einem gewissen Grad maßzuschneidern.

Auf chemischer Ebene werden Proteine durch die Kondensationspolymerisation von Aminosäuren gebildet – die Carboxylgruppe einer Aminosäure verbindet sich dabei unter Abspaltung von Wasser mit der Aminogruppe einer anderen. Man spricht hier von sog. Peptidbindungen.

Die je nach Aminosäure charakteristischen Kohlenwasserstoffrückstände (R) besitzen unterschiedliche physiochemische Eigenschaften (Ladung, Reaktionsfähigkeit, Lösbarkeit) und sind charakteristisch für die Eigenschaften des jeweiligen Proteins. Die Proteine von Lebewesen bestehen aus zwanzig standardmäßig vorkommenden Aminosäuren: Glycin (Gly), Alanin (Ala), Phenylalanin (Phe), Valin (Val), Leucin (Leu), Isoleucin (Ile), Asparaginsäure (Asp), Glutaminsäure (Glu), Tyrosin (Tyr), Asparagin (Asn), Glutamin (Gln), Lysin (Lys), Arginin (Arg), Serin (Ser), Threonin (Thr), Cystein (Cys), Methionin (Met), Histidin (His), Tryptophan (Trp) und Prolin (Pro). Die Aminosäuresequenz von Proteinen wird als deren primäre Struktur bezeichnet, darüber hinaus können sie auch noch einen charakteristischen sekundären, tertiären und unter Umständen quartären räumlichen Aufbau besitzen. Der hierarchische Aufbau von Proteinen ist in Abb.29 schematisch dargestellt.

Als sekundäre Struktur üblich sind sog. α -Helices oder β -Faltblatt Konstellationen. α -Helices sind stabile, rechtsdrehende Helices bei denen die R-Gruppen der Aminosäuren nach außen weisen.

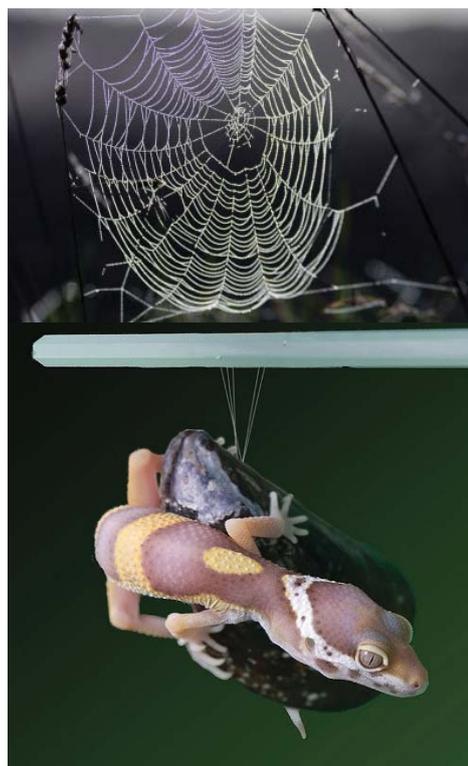


Abb.27 Spinnennetz, Gecko und Muschel
(Geckel ist ein Kleber der die Haftwirkung von Geckos mit dem Klebprotein von Muscheln kombiniert)

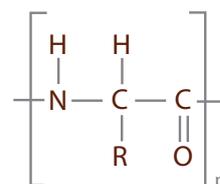
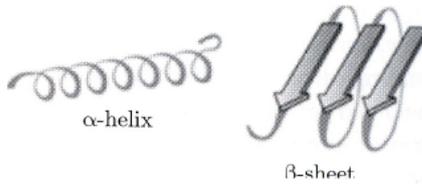


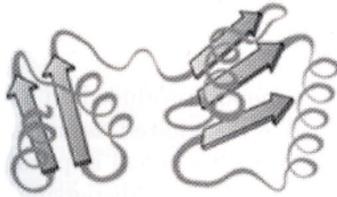
Abb.28 Allg. Strukturformel von Proteinen

Ala–Glu–Val–Thr–Asp–Pro–Gly–

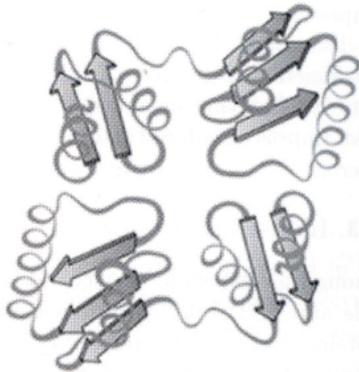
(a) Primary structure



(b) Secondary structure



(a) Tertiary structure



(a) Quaternary structure

Abb.29 Strukturelle Hierarchie von Proteinen

Nach durchschnittlich 3,6 Aminosäurerückständen wird eine Umdrehung beendet. β -Faltblätter sind hingegen weiter gedehnt und die Molekülketten liegen dabei mehr oder weniger Seite an Seite. Werden die Wasserstoffbrückenkräfte der α -Helices (z.B. durch Hitze) gestört, kann ein Übergang zur β -Schleifen Konformation herbeigeführt werden. Besitzt das Protein keine sekundäre Struktur spricht man von sog. Random-Coil Konformationen. Die tertiäre Struktur ist der sekundären übergeordnet und kann sich durch verschiedene Bindungskräfte aus den Aminosäureresten ergeben. Manchmal lagern sich diese zu ganzen Proteinkomplexen zusammen, die dann die quartäre Struktur darstellen. Wie bereits angedeutet sind die sekundären, tertiären und quartären Strukturen der Proteine recht instabil, das heißt sie können durch relativ einfache Methoden denaturiert werden (Behandlung mit Säuren oder Basen, erhitzen oder bestrahlen, etc). Die Eigenschaften wie Löslichkeit, Wasseraufnahmefähigkeit, Viskosität, Reduzierung biologischer Aktivität und die Sensibilität für einen Angriff von Peptidasen können dadurch verändert werden.³⁵

Aus der Vielzahl von Proteinen gibt es einige, die für technische Anwendungen nutzbar gemacht wurden und auch in größeren Mengen produziert werden. Dazu zählen Kollagen (Gelatine), Milchproteine (Kasein und Molke), verschiedenste Getreideproteine sowie Keratin. Zwar handelt es sich bei Proteinmaterialien zumeist um hochwertige Spezialprodukte, allerdings gibt es auch einige Versuche günstige Konsumgüter aus ihnen herzustellen. Im Bauwesen werden im Moment lediglich Kasein und Proteinhydrolysate aus tierischen Abfallprodukten verwendet. Letztere dienen zur Erzeugung von Schaumbeton. Zwar sind sie in ihrer Handhabung anspruchsvoller als synthetische Schäume, ermöglichen aber die Erzeugung von höherwertigem Schaum. Während synthetische Schäume Schaumbläschen mit hexagonaler Form erzeugen, besteht der Schaum von Proteinhydrolysaten aus sphärischen Bläschen. Der damit erzeugte Beton weist eine 20-30% höhere Druckfestigkeit auf.³⁶

35 - S. Fakirov, Handbook of Engineering Biopolymers., Carl Hanser Verlag, München, 2007, S.467ff [42]

36 - A. Steinbüchel (Ed.), Biopolymers., Volume 10 .., Wiley-VCH, Weinheim, 2003, S.61 [27]

2.2.1 KOLLAGEN

2.2.1.1 Vorkommen, Aufbau und Verwertung

Ein bemerkenswertes Protein mit einer langen Geschichte technischer Nutzung ist Kollagen, das uns in seiner denaturierten Form als Gelatine gut bekannt ist. Die Geschichte der Gelatine kann bis zu 6000 Jahre zurückverfolgt werden. Sie wurde als klare Flüssigkeit beim Kochen von Knochen entdeckt und zeigte Klebeeigenschaften beim Trocknen (Gelatine von lat. *gelatus* - gefroren). Kollagen ist ein unlösliches tierisches Struktur- bzw. Faserprotein, das den Knochen Flexibilität und Stärke verleiht.³⁷ Es stellt das am häufigsten vorkommende Protein in Säugetieren dar und man findet es in Häuten, Fellen, Blutgefäßen, Sehnen, Bändern und Ossein, dem Bindegewebeprotein von Knochen. Mit einem Anteil von 25% am Gesamtprotein stellt es auch im menschlichen Organismus das häufigste Protein dar.³⁸ Kollagen besteht aus etwa 20 verschiedenen Aminosäuren, hauptsächlich ist allerdings Glycin (27%), Prolin (16%) und Hydroxyprolin (14%) zu finden.³⁹ Letztere sind cyclische Aminosäuren und ihr ungewöhnlich hoher Anteil im Kollagen macht dieses so unverwechselbar. Die Aminosäuren bilden jeweils drei spiralenförmige Peptidketten, die umeinander gewunden sind und durch kovalente Bindungen zusammengehalten werden. So bilden sich quasi steife Molekülstangen, die die Hauptwiderstandselemente des Bindegewebes darstellen. Durch Säurebehandlung kann sog. Typ-A Gelatine, durch Alkalibehandlung sog. Typ-B Gelatine aus tierischen Abfallprodukten gewonnen werden. Entgegen landläufiger Meinung enthalten Hörner oder Hufe kein Kollagen und werden daher nicht zur Gelatineerzeugung herangezogen. Gelatine wird vor allem in der Lebensmittelherzeugung verwendet – so kommt die Gelatine z.B. in großen Mengen als Verdickungsmittel in Nachspeisen, Eiscreme, Süßigkeiten und Backwaren zum Einsatz, aber auch Wursthäute und Medikamentkapseln werden aus Gelatine erzeugt. Sie bietet eine ganze Reihe von besonderen Eigenschaften, die sie für die verschiedensten technischen Anwendungen interessant machen.

2.2.1.2 Anwendungsgebiete von Gelatine

Ganz prinzipiell weist Gelatine gegenüber anderen Polymermaterialien und Biopolymeren herausragende mechanische Eigenschaften auf. Diese sind der nebenstehenden Tabelle zu entnehmen. Als größter Nachteil hat sich die hohe Sprödigkeit der Gelatine im trockenem Zustand erwiesen. Die positiven Eigenschaften der Gelatine können wie folgt zusammengefasst werden:

Polymer	Zugmodul (Mpa)	Bruchspannung (Mpa)	Bruchdehnung (%)
Low-density Polyethylen	102 - 240	6,9 - 16	100 - 800
Medium-density Polyethylen	205 - 307	8,7 - 21	50 - 600
High-density Polyethylen	900 - 1200	25 - 45	50 - 900
Polystyrene	2400 - 3340	35 - 57	1,6 - 2,4
Gelatine	1300 - 2200	85 - 140	12 - 22

BAK	Glasübergangstemperatur °C	Bruchfestigkeit (Mpa)	Bruchdehnung (%)
Stärke	230	-	-
Celluloseacetat	190	17 - 25	10 - 30
Polyvinylalkohol	58 - 85	40 - 50	300 - 400
Polycaprolacton	bis 60	21 - 31	600 - 1000
Poly(lactic acid) PLA	50 - 59	50	3
Gelatine	217	65 - 140	12 - 22

Tab.8 Vergleich mechanischer Eigenschaften von Gelatine gegenüber verschiedenen Polymeren



Abb.30 typische Speisegelatineplatten

37 - S. Fakirov, Handbook of Engineering Biopolymers., Carl Hanser Verlag, München, 2007, S.420 [42]

38 - J. Markl, Biologie (Originaltitel: Life – The Science of Biology), Elsevier GmbH, 7. Auflage, München, 2004, S.969 [45]

39 - A. Steinbüchel (Ed.), Biopolymers., Volume 10., Wiley-VCH, Weinheim, 2003, S.85 [27]

-) Erzeugung aus Abfallmaterial, -) Herstellungsverfahren unter milden Bedingungen und ohne Einsatz aggressiver Chemikalien, -) Hohe Bruchfestigkeit und hoher E-Modul, -) extrem hohe Mikrohärtigkeit, -) Wasserlöslichkeit und starkes Schwellen, -) die Möglichkeit mit Kondensationspolymeren zu reagieren, -) biologische Abbaubarkeit, -) Biokompatibilität, -) Lebensmittelqualität, -) Lebensmittelpreis vergleichbar mit jenem von Polyolefinen, -) Umweltfreundlichkeit.⁴⁰

Gelatine ist außerdem in der Lage thermoreversible Gele zu bilden – eine Eigenschaft die einzigartig unter Proteinen ist. Dies bedeutet, dass Gelatine, sobald sie in kaltem Wasser gelöst wird, schwillt und dabei das 5-10fache an Wasser absorbiert. Wird diese Mischung auf 50-60° erwärmt, löst sich die Gelatine und bildet eine Lösung, ein sog. „Sol“, das, wieder abgekühlt, in den Gelzustand übergeht. Die Sol/Gel Transformation ist immer wieder umkehrbar und lässt sich über viele Zyklen wiederholen. Im Gegensatz zu synthetischen Polymeren ist Gelatine reaktionsfreudiger, da sie viele freie Amino- und Carboxylgruppen besitzt. Dadurch wird sie angreifbar für eine chemische Modifikation z.B. für Vernetzungsreaktionen, über die man der Sprödigkeit entgegenwirken kann. Die Tatsache, dass Gelatine als Stabilisierungsmittel für kolloidale Lösungen und Emulsionen verwendet wird, könnte sie auch als Zusatzmittel in der Baustoffindustrie interessant machen.

2.2.2 KERATINE

2.2.2.1 Vorkommen und Aufbau

Eine weitere wichtige Klasse von Strukturproteinen sind die Keratine (griech. *Kératos* – Horn), welche nun in Fingernägeln, Hörnern, Federn, Klauen und Reptilienschuppen vorkommen. Sie können in Bezug auf die Sekundärstruktur in α - oder β -Konformation vorliegen. Als α -Helix kommen sie in Haaren und Hufen vor, als β -Faltblatt in Schuppen und Federn.⁴¹ Die Aminosäuren formen im Keratin rechtsdrehende Helices, die sich wiederum zu linksdrehenden Protofibrillen verbinden. Mikrofibrillen setzen sich aus jeweils acht Protofibrillen zusammen, die die grundlegende Struktur von keratinhaltigem Gewebe darstellen.

Im Zusammenspiel mit anderen Proteinen bilden die Strukturproteine verschiedenen Gewebe. So erhalten Strukturproteine in Verbindung mit Elastin mehr Elastizität. Ein Material wie Seide setzt sich einerseits zum größten Teil aus Fibroin, einem Faserprotein, das zur Klasse der β -Keratine gezählt wird und Serin, auch Seidenleim genannt, zusammen. Natürliche Gewebe setzen sich aus verschiedenen Schichten

⁴⁰ - S. Fakirov, *Handbook of Engineering Biopolymers...*, Carl Hanser Verlag, München, 2007 S.420 [42]

⁴¹ - J. Markl, *Biologie (Originaltitel: Life – The Science of Biology)*, Elsevier GmbH, 7. Auflage, München, 2004 S.52 [45]

und Materialkombinationen zusammen und können, wie auch viele synthetische Materialien, als komplexe Blends oder Compositmaterialien verstanden werden.

2.2.2.2 Schafwolle und ihre Verwendung

Ein überaus interessanter Stoff, der zu weiten Teilen aus Keratin und keratinähnlichen Proteinen besteht, ist die Schafwolle. Auf Grund ihrer einzigartigen Eigenschaften soll sie hier kurz vorgestellt werden. Auch sie blickt auf eine sehr lange Geschichte der technischen Nutzbarmachung zurück und es ist bekannt, dass sie seit ca. 35.000 Jahren vom Menschen verwendet wird. Sie besteht zu 80% aus Keratin und zu 17% aus anderen Proteinen, den Rest machen Polysaccharide und andere Moleküle aus.⁴²

Wie bei allen natürlichen Rohstoffen differiert auch die Wolle in ihrer Zusammensetzung je nach Herkunft. Ökologische und ökonomische Bedingungen beeinflussen ihre Qualität. So wurden in manchen Ländern Schafe zur reinen Wollproduktion gezüchtet (Australien, Südafrika), in anderen zur Woll- und Fleischproduktion (Neuseeland, Argentinien, Uruguay). Eine typische und weit verbreitete Schafrasse ist das Merinoschaf. Schafe passen sich gut an klimatische Verhältnisse an und kommen auch unter extremen Bedingungen und mit mäßigem Nahrungsangebot gut aus. Ein Merinoschaf liefert ca. 2kg Wolle und wird ein bis zweimal im Jahr geschoren. Abb. 31 zeigt den komplexen Aufbau einer Schafwollfaser.

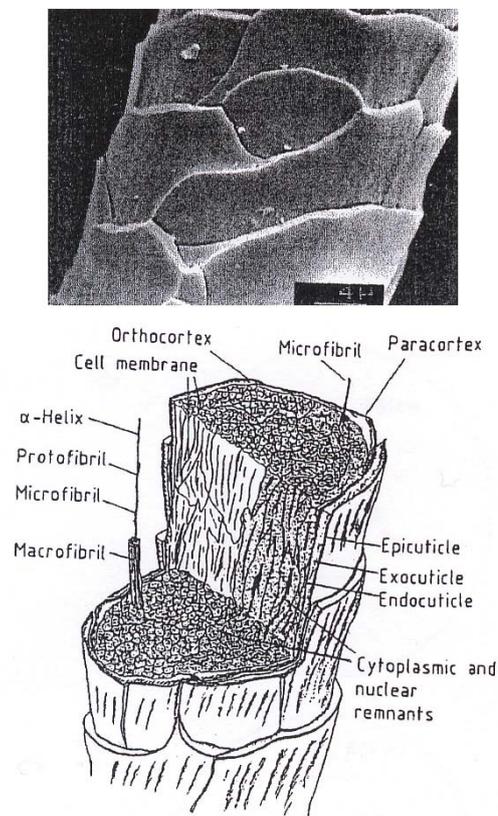


Abb.31 Oberfläche einer Wollfaser, darunter Längs- und Querschnittansicht einer Merinowollfaser

Vereinfacht erklärt sind die Keratinfibrillen von einer Kortex aus spindelförmig verflochtenen Zellen umgeben und diese wiederum von plattenförmigen Zellen, der Cuticula (Nagelhaut), die sich der Länge nach überlappen, überlagert. Die Wolle dient dem Schaf als Schutz vor Regen, Sonne, Wind und mechanischen Einwirkungen. Im Laufe der Evolution ist so ein ausgezeichnetes Dämm- und Isoliermaterial entstanden. Die Wolle fühlt sich leicht an und die zwischen ihren Fasern eingeschlossene Luft stellt die Dämmeigenschaften sicher und hält warm bzw. kühl. Neben den Dämmeigenschaften sind aber vor allem die hygroskopischen Eigenschaften der Schafwolle hervorzuheben. Wolle zählt zu den hydrophilsten innerhalb der Naturfasern. Ihre spezielle Struktur ermöglicht ihr bis zu 30% ihres Eigengewichts an Wasser aufzunehmen ohne sich feucht anzufühlen. Sie nimmt Perspiration auf und lässt diese wieder langsam an die Umgebung verdunsten. Dies schützt vor Unterkühlung im Winter bzw. sorgt für angenehme Verdunstungskühle in heißen Perioden. Weiters ist zu bemerken, dass die Wolle Wärmeenergie freisetzt, sobald sie Feuchtigkeit aufnimmt. So gibt ein Gramm Wolle 27 Kalorien Hitze ab, wenn es von



Abb.32 Schafwolldämmstoffe
(im Bild Isolena)

42 - E.S. Stevens, *Green Plastics*, Princeton University Press, Princeton, 2002 S.100 [5]

43 - A. Steinbüchel (Ed.), *Biopolymers.., Volume 8.., Wiley-VCH, Weinheim, 2003, S.181 [44]*

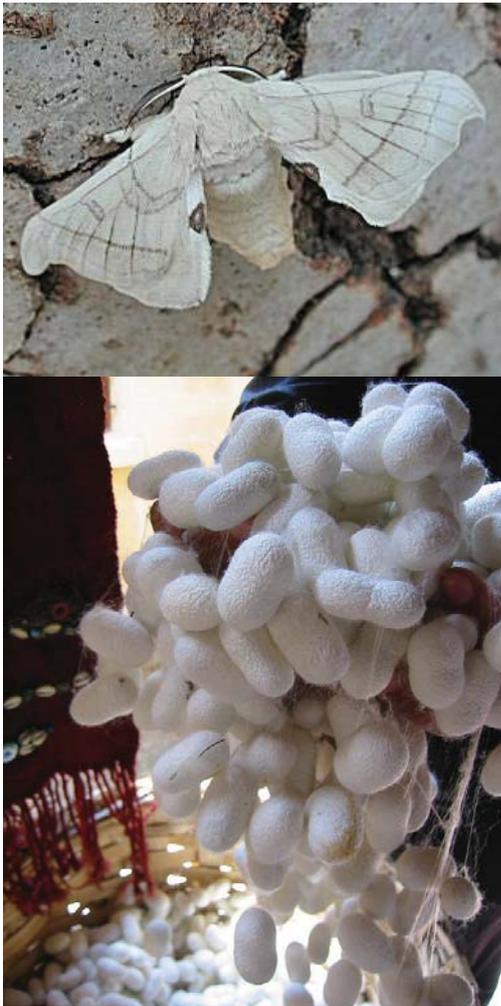


Abb. 33 männl. Seidenspinne, Kokons

trockenen in feuchten Zustand übergeht.⁴³ Das Keratin und der Wassergehalt machen Wolle äußerst hitzebeständig und verleihen ihr einen hohen Flammpunkt. Außerdem besitzt sie selbstverlöschende Eigenschaften, da sie nicht brennt, sondern in der Hitze schmilzt. Auch im Bauwesen wird sie als Dämmstoff eingesetzt. Ihr hoher Preis limitiert dabei allerdings die Anwendung.

Wolle besitzt heute nur mehr lediglich einen Anteil von etwa 3 Gew.% an der gesamten Textilfasererzeugung. Allerdings liegt sie im Wert etwa beim Fünffachen gegenüber anderen Textilfasern (natürlich oder synthetisch) und macht somit etwa einen Anteil von etwa 12% am Fasermarkt aus.⁴⁴ Eine Verknappung der Wolle mit immer mehr potentiellen Anwendungen und immer weiter steigender Nachfrage wird die Preise wohl noch weiter in die Höhe treiben, was nicht unbedingt zu einer Stärkung der Wolle am Fasermarkt führen wird. In Bezug auf die Konkurrenz zu anderen Faserstoffen, kann man ihre Vorteile und positiven Eigenschaften herausstreichen und meiner Meinung nach hoffen, dass durch die technische Weiterentwicklung ihre Position erhalten bleibt bzw. wieder gestärkt wird.

2.2.2.3 Seidenproteine und ihre Verwendung

Ein weiteres wichtiges Proteinmaterial stellt Seide dar. Es ist das wohl am intensivsten genutzte Proteinmaterial in der Menschheitsgeschichte. Seide wird von Spinnen und Insekten produziert und kommerziell hauptsächlich durch die Seidenraupe *Bombyx Mori* hergestellt. Zwar hat die Seide seit der Einführung von Polyamidfasern (Nylon) in den 1930er Jahren große Marktanteile verloren, durch ihre Ökofreundlichkeit und Aussicht auf eine synthetische Herstellung über die rekombinante DNA-Methoden bleibt sie von Interesse für die Wirtschaft. Derzeit scheint die Seide sogar ein regelrechtes Revival zu erleben. Nicht zuletzt sind die Lege- und Falteigenschaften von Textilien aus natürlichen Fasermaterialien nach wie vor unerreichbar.

Seide besteht zu 78% aus dem Strukturprotein Fibroin, den Rest macht der sog. Seidenleim, das Protein Sericin, aus.⁴⁵ Fibroin wird der Klasse der β -Keratine zugerechnet. In der Fachliteratur werden Seidenproteine aber zumeist als eigenständige Materialklasse behandelt. Bei der Herstellung der Seide werden die verpuppten Kokons der Seidenspinnerlarven vor dem Schlüpfen abgetötet. Der Seidenfaden wird danach abgewickelt und bei dem Degummieren vom Sericin befreit. Dies geschieht im heißen Wasserbad, das gegebenenfalls Additive wie Waschmittel oder Salze enthält. Die Seidenfäden können eine Länge von rund 1500m aufweisen.⁴⁶ Seidenfasern sind gleichzeitig widerstands-

44 - Ebda, S.192 [44]

45 - E.S. Stevens, *Green Plastics*, Princeton University Press, Princeton, 2002, S.100 [5]

fähig, fest und zäh – eine einmalige Eigenschaftskombination. Grundsätzlich zeigt Seide gute Wärmebeständigkeit (zur Schmelztemperatur liegen keine Daten vor, sie liegt wohl bei über 370°C). Interessanterweise wird bei einem Absenken der Temperatur auf -60°C nicht nur Steifigkeit und Festigkeit, sondern auch die Bruchdehnung erhöht, das heißt die Belastbarkeit insgesamt erhöht sich. Wie auch Schafwolle besitzt Seide einen komplexen strukturellen Aufbau und hygroskopische Eigenschaften, was sich wiederum auf die mechanische Belastbarkeit auswirken kann. Das Fibroinmolekül besteht aus Regionen zu etwa sechzig Aminosäurebausteinen, die der Sequenz –Ser-Gly-Ala-Gly-Ala-Gly- folgen und von flexibleren, etwa dreißig Bausteinen langen Abschnitten, getrennt sind. Die längeren Abschnitte bilden Helices und kristalline Bereiche, während die dazwischen liegenden amorphen Regionen für Flexibilität sorgen. Seidenfibroin besitzt eine sehr hohe Molekularmasse von 700kDa. Sericin ist von amorpher Natur und besteht aus verschiedensten Aminosäuren.⁴⁷

Neben einer natürlichen Faserproduktion kann das Seidenfibroin in sog. Regenerationsverfahren auch gelöst und danach industriell versponnen oder zu Folien weiter verarbeitet werden. Über das Elektrosponnenverfahren kann die Seidenfibroinlösung zu Fasern versponnen werden. Der Schwankungsbereich in der Zugkraft der Fasern wird zwar wesentlich reduziert, trotzdem weist die regenerative Seide weitaus schlechtere mechanische Eigenschaften als die natürlich gesponnene auf. Die Möglichkeit Seidenproteine nachträglich zu verspinnen erlaubt auch die Gewinnung und Verarbeitung von synthetischer Seide aus transgenen Wirtorganismen. Bei der sog. rekombinanten DNA Technologie werden heterologen Wirtorganismen mit neuen Genen - d.h. mit Genen Seide-produzierender Spinnen oder Seidenwürmern - ausgestattet, um so zu Rohstofflieferanten für die Seidenproduktion zu werden. Auf diese Weise hat z.B. die in Kanada ansässige Nexia Biotechnologies Inc. ihr BioSteel erzeugt. Hierbei wurde Ziegen Seidengene von Spinnen eingepflanzt, wonach die Ziegen Anteile von Seideproteinen in ihrer Milch lieferten. Diese konnten dann isoliert, aufbereitet und gelöst verarbeitet werden. Die so erzeugten Produkte wichen in ihren Eigenschaften entscheidend von jenen der natürlichen Seide ab und ähnelten eher den regenerierten Produkten (gelöstes und nachträglich verponneses Seidenprotein). Zudem wird gezielt versucht die physio-chemischen Eigenschaften der Seide einzustellen. Seide wird auch als Verstärkungsfasern für Kunststoffe und diverse Biokompositmaterialien getestet.

Typ	Faser	Dichte (g/cm ³)	E-Modul (Gpa)	Zugbelastung		
				Festigkeit (Mpa)	max. Dehnung (%)	Bruchwiderstand (MJ/m ²)
Tierekretion	Seidenspinner	1,3	6-7	600	14-18	~1,2
	Dragline Seide					
	Araneus diadematus	1,3	10	1100	27	~160
	Dragline Seide					
	verschiedener Spinnen	1,3	9-30	700-2300	<30	-
Tierhaar	Viskose Seide	1,3	<1	100-500	<300	-
	verschiedener Spinnen	1,3	0,5	200	50	~160
	Wolle					
Pflanzenbast	Flachs	1,5	30	750	2	-
	Hanf	1,5	70	600	2	-
Polymerfasern	Polyamid 66 (Textil)	1,1	4-5	1000	18-20	~160
	Polyester (Textil)	1,4	15	1200	15	-
	Aramid (Kevlar)	1,5	130	3600	3	-50
	Carbon	1,8	240	3700	1,5	-
mineralisch	synthetische Gummi	-1,2	0,001	50	850	100
	Glas	2,5	80	3500	4	-
metallisch		7,8	200	>1500	>1	>6
	Stahl					

Tab.9 Eigenschaften natürlicher und synthetischer Fasern im Vergleich

2.2.3 MILCHPROTEINE – CASEIN UND MOLKE

2.2.3.1 Vorkommen und Verwertung

Caseine werden die verschiedenen Proteine genannt, die als Mizellen zusammengeslossen in der Milch vorkommen. Dem Menschen dienen sie bereits seit alters her zur Erzeugung von Farben und Klebstoffen und sind als umgewandelter Naturstoff in Form von Galalith zu den Wegbereitern der vollsynthetischen Kunststoffe zu zählen.

Es gibt verschiedenste Möglichkeiten Casein aus Milch zu extrahieren. Eine herkömmliche Weise ist die Behandlung mit Säuren. Ab einem bestimmten pH-Wert fällt im erhitzten Säurebad sog. Säurecasein aus und kann abfiltriert werden. Eine weitere übliche Methode erfolgt durch den Einsatz von Lab, einem Enzymgemisch aus dem Labmagen junger Wiederkäuer, durch das die Milch ab einer gewissen Zeit gerinnt. Dieses Verfahren kommt üblicherweise in der Herstellung von Käse zum Einsatz. Durch die Behandlung von Säurecaseinen mit entsprechenden Basen erhält man Caseinate. Ein weiteres Verfahren zur Caseinherstellung aus Milch verläuft über die Behandlung von Milch mit CO₂ unter Druck. Milchcasein wird in vier Haupttypen α 1-, α 2-, β - und κ -Casein unterteilt. Sie unterscheiden sich in Aminosäurezusammensetzung und räumlicher Struktur.⁴⁸ Natives Casein wird nur in seltensten Fällen als Material eingesetzt, spielt aber in modifizierter Form oder im Zusammenspiel mit anderen Materialien eine wichtige Rolle auf vielen Gebieten. Aus Caseinlösungen können Membrane und Folien erzeugt oder woll- und seideähnliche Fasern gesponnen werden. Caseine werden außerdem oft als Beschichtungen für Kunststoffe und Papiere eingesetzt oder dienen als Klebmittel (z.B. für Etikettierungen). Die biologische Verträglichkeit (Abbaubarkeit und manchmal auch Essbarkeit) hat in der Verpackungs- und Kunststoffindustrie dazu geführt, auch verschiedene Möglichkeiten in der Herstellung von Biokunststoffen und Biokompositen zu erproben.

In der Käseherstellung bleibt weiters noch der lösliche Teil der Milch, die Molke, übrig. Sie besteht zum größten Teil aus Wasser, enthält aber auch noch Molkeproteine, die ein gewisses Potential als Biopolymere Rohstoffe besitzen. Sie sind heute in erster Linie als Füllstoffe für Lebensmittel im Einsatz oder finden sich auch als Bestandteil in Eiweißpräparaten zum Muskelaufbau.

2.2.3.2 Anwendungsgebiete im Bauwesen

Als viskositätssteigerndes Mittel wird Casein in Farben auch im Bauwesen angewendet. Es gibt hierfür synthetische Ersatzstoffe, aus ökologischen Gründen wird jedoch



Abb.34 Selbstnivellierende Ausgleichsmassen

oft caseinbasierten Produkten der Vorzug gegeben. Ihr Nachteil liegt allerdings im raschen biologischen Abbau, der einen zügigen Verbrauch der Farbe notwendig macht. Eine weitere Anwendung hat Casein als Zuschlag in selbstnivellierenden Ausgleichsmassen gefunden. Durch das Casein werden selbstheilende Eigenschaften im Material erzeugt. Wird die Oberfläche z.B. mit einem Messer eingeritzt, so verschließt sich die „Narbe“ innerhalb kürzester Zeit wieder und bildet von selbst eine absolut plane Oberfläche.⁴⁹ Diese einzigartige Eigenschaft hat Casein zu diesem Zweck seit Jahrzehnten zum bevorzugten Material in diesem Bereich gemacht, selbst wenn die genauen Mechanismen dahinter noch nicht umfassend verstanden werden. Erst Ende der 90er Jahre konnte man auf Basis von Polycarboxylaten basierende Superverflüssiger mit ähnlichen Eigenschaften entwickeln.

2.2.4 PFLANZLICHE PROTEINE

Auch die Proteine verschiedener Nutzpflanzen werden für technische Anwendungen kommerziell genutzt. Die wichtigsten sind Soja-, Getreide-, Kartoffel-, Reis- und Erbsenproteine.

2.2.4.1 Sojaprotein und seine Verwendung

Die Sojabohne ist üblicherweise reichhaltig an Öl und Proteinen und wird deshalb gerne zu deren Gewinnung herangezogen. Die Inhaltsstoffe haben eine lange Geschichte technischer Nutzbarmachung und werden heute zur Erzeugung von Biokunststoffen herangezogen. Als Anhänger der Chemurgie ist Henry Ford als Vorreiter in der Entwicklung von Sojakunststoffen zu nennen und hat deren Entwicklung bereits in den 1940er Jahren vorangetrieben. Die Sojabohne besteht zu etwa 40% aus komplexen Proteinen, die aus 20 verschiedenen Aminosäuren aufgebaut sind und deren Charakterisierung noch immer nicht ganz abgeschlossen ist.⁵⁰ Zur Isolierung des Sojaproteins gibt es verschiedenste Verfahren, die unterschiedliche Endprodukte liefern. Grundsätzlich wird zunächst das Öl abgetrennt und man erhält danach Sojaflocken oder Sojamehl, aus dem Proteinkonzentrate erzeugt werden. Drei Verfahrensmethoden zur weiteren Isolierung des Proteins aus den Flocken oder dem Mehl sind üblich. Es gibt die Denaturierung durch Hitze oder die Behandlung mit Säure oder Alkohol. Zur Gewinnung der reinsten Isolate wird das Protein durch mildes Alkali und einer anschließenden Säurebehandlung aus den Sojaflocken extrahiert. Produkte mit niedrigem Proteingehalt (Mehl, Flocken) sind üblicherweise sehr günstig, während mit einem hohen Reinheitsgrad auch der Preis steigt. Im



Abb.35 Sojapflanze, mit unreifen und reifen Hülsen

49 - A. Steinbüchel (Ed.), *Biopolymers.., Volume 8.., Wiley-VCH, Weinheim, 2003 S.60 [44]*

50 - D.L. Kaplan (Hg.), *Biopolymers from Renewable Resources, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998 S.144 [18]*



Abb.36 (v.o.n.u.) Maiskorn, Mais, Weizen

Moment werden nur rund 0,5% des erzeugten Sojaproteins für technische Zwecke verwendet.⁵¹ Vor allem wegen seiner Klebeeigenschaften wird das Sojaprotein verwendet. Heute wird es in diesem Zusammenhang vor allem in der Papierherstellung eingesetzt. Großes Interesse gilt ihm auch in der Entwicklung von Klebern für Holzwerkstoffe.

In der Entwicklung von biologisch abbaubaren Kunststoffen hat Sojaprotein heute wieder Aufmerksamkeit auf sich gezogen. Umfassende Studien zur chemischen Modifikation und als Bestandteil von Blends liegen vor. Diese zielen oft darauf ab, die schlechte Feuchtigkeitsbeständigkeit und Wasserabsorption zu verbessern und so wurden bereits einige Verpackungsmaterialien auf Basis von Sojaprotein entwickelt. Sojafolien haben sich dabei als gute Sauerstoff- und UV-Barrieren erwiesen. Eine weitere interessante Entwicklung ist die Produktion von Schaumstoffprodukten auf Sojabasis, die Styrolprodukte ersetzen könnten.

2.2.4.2 Getreideproteine und ihre Verwendung

Getreidekörner enthalten neben der Stärke als Bestandteile auch noch Öle, Wasser und vor allem Proteine. Diese werden nach ihrer Löslichkeit in Albumine (wasserlöslich), Globuline (salzlöslich), Zeine (alkohollöslich) und Gluteline (säure-, alkalilöslich) unterteilt.⁵² Technisch wird heute vor allem das Zein genutzt, welches hauptsächlich aus Mais gewonnen wird. Gluten, auch Klebereiweiß, wird zumeist aus Weizen gewonnen und hat in der Lebensmittelindustrie für die Backeigenschaften von Teigen zentrale Bedeutung.

Im Gegensatz zu den vielen anderen thermoplastisch verarbeiteten Biopolymeren zeigt Zein eine relativ gute Wasserbeständigkeit. Weiters ist es transparent und besitzt gute Gasbarriere- und mechanische Eigenschaften. Neben Gelatine ist es das einzige Protein, das extensiv in der Herstellung von essbaren Folien, z.B. für Medikamente, genutzt wird. Eine Behandlung mit natürlichen Ölen kann die Wasserbeständigkeit der Zeinfolien noch weiter erhöhen. Nachteile liegen in der Sprödigkeit der Zeinprodukte und ihren hohen Kosten. Zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und zur Erzeugung von BAK wurden verschiedenste Mischungen aus synthetischen (PLA, LDPE, LLDPE, PVOH) und natürlichen (Stärke, Latex, etc.) Additiven mit Zein - bzw. wird umgekehrt Zein als Additiv - untersucht. Weitere proteinreiche Nutzpflanzen für eine Produktion von Kleber, Kunststoffen und Additiven sind Kartoffeln, Reis und Erbsen.

51 - D.L. Kaplan (Hg.), *Biopolymers from Renewable Resources*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998 S.172 [18]

52 - S. Fakirov, *Handbook of Engineering Biopolymers...*, Carl Hanser Verlag, München, 2007 S.541 [42]

2.3 POLYESTER

Als Polyester werden heute synthetische Polymere auf mineralischer Basis bezeichnet, die in ihrer Hauptkette die Esterbindung - [CO-O] - tragen. Anfang des 20. Jh. hat Maurice Lemoigne granuläre Einschlüsse im Zytoplasma von Bakterien gefunden⁵³, die in den folgenden Jahren als eine Art wissenschaftliche Kuriosität genauer untersucht wurden. Dabei handelt es sich um die sog. Polyhydroxyalkanoate oder auch Polyhydroxyfettsäuren, die eine Klasse natürlich vorkommender Polyester darstellen. In der Herstellung von Biokunststoffen haben diese in den vergangenen Jahren großes Interesse auf sich ziehen können. Dasselbe gilt auch für Polymilchsäuren, kurz PLA von engl. Polylactid oder Poly lactic Acid. Dabei handelt es sich um einen synthetischen Polyester, der vollständig aus der natürlich vorkommenden Milchsäure (Lactic Acid) hergestellt werden kann.

2.3.1 POLYFETTSÄUREN - PHA / PHF

2.3.1.1 Vorkommen, Arten und Verwertung

Bei Polyfettsäuren handelt es sich um submikrone Einschlüsse in Bakterien, die dort als Energiereserve unter Zuführung von Kohlenstoff eingelagert werden. Heute sind über 70 verschiedene Bakterienarten bekannt, die in Bioreaktoren zur Züchtung von Poly-Hydroxy-Alkanoaten (PHA) herangezogen werden. Dabei können die Bakterien am Ende des Prozesses bis zu 80% ihres Gewichts an PHA enthalten. Das am weitesten verbreitete PHA ist Poly-3-hydroxybutyrat, oder Polyhydroxybuttersäure, kurz PHB, welches auch als erstes entdeckt wurde und am besten untersucht ist. Es wird heute auch oft als Copolymer mit Poly-3-hydroxyvalerat, kurz PHBV, fermentativ hergestellt. Dabei handelt es sich allerdings nur um die zwei bekanntesten Kombinationsmöglichkeiten. Über 100 Monomereinheiten könnten innerhalb der Familie heute zu unterschiedlichsten Materialien zusammengestellt werden.⁵⁴

Ein großer Nachteil von PHB liegt im Moment noch in seinem hohen Preis. Diese ergeben sich zum größten Teil aus den Kosten für das Nahrungssubstrat, das die Bakterien zum Heranbilden des PHB brauchen. Darüber hinaus beinhaltet die Herstellung einen schwierigen Isolationsprozess, bei dem während der Extraktion die Polyesterketten nicht zerstört werden dürfen. Die drei gängigsten Methoden zur Isolation sind die Lösungsmittelextraktion, bei der die Bakterienpaste in einem Lösungsmittel gelöst und dann gefiltert wird, die Natriumhypochlorit-Verdauung, bei der durch

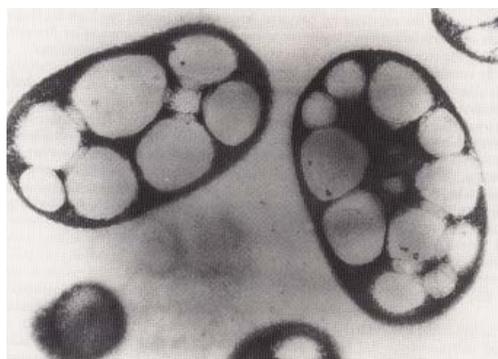


Abb.37 elektronenmikroskopische Aufnahme von PHB Einschlüssen in *Alcaligenes Eutrophus* Bakterien

53 - D.L. Kaplan (Hg.), *Biopolymers from Renewable Resources*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998 S.220 [18]

54 - H. Dominghaus, (Hg.), *Kunststoffe..*, Springer Verlag, 7. Auflage, Berlin, Heidelberg, 2008 S.1308ff [17]



Abb.38 Produkte des brasilianischen PHB Herstellers Biocycle

die Natriumhypochlorit Behandlung die Zellwand zerstört und aufgelöst und lediglich die PHB-Komponenten übrig bleiben, sowie der Enzymatischen Verdauung, bei der über eine Enzymkatalyse die Zellwände angegriffen werden, um danach möglichst unbeschädigtes PHB zu isolieren. Um die Kosten in der Herstellung von PHB zu reduzieren, arbeitet man daran, die teure Glukose durch billigere Nahrungssubstrate zu ersetzen oder versucht PHB in photosynthetisch aktiven Bakterien zu erzeugen. Ein relativ neuer Ansatz ist es, PHA in transgenen Pflanzen zu erzeugen. Gute biologische Verträglichkeit, biologische Abbaubarkeit von PHB bei gleichzeitig ähnlichen Eigenschaften wie von PP, gute Wasser- und relativ hohe Wärmebeständigkeit, machen es zu einem interessanten Polymer. Es wurden bereits einige Bedarfsartikel (hauptsächlich Verpackungsmaterialien) auf der Basis von PHA getestet und vermarktet, doch auf Grund seiner noch immer relativ hohen Kosten, konzentriert sich die Wirtschaft auf PHA im Blend mit günstigeren Biokunststoffen sowie auf Die Entwicklung von Spezialprodukten. Dabei handelt es sich vor allem um medizinische Anwendungsbereiche wie z.B. Wattestäbchen, Wundverbände und Chirurgenhandschuhe. Zielentwicklungen sind Gewebe- und Knochenimplantate und künstliche Blutgefäße.

Im Jahr 2000 wurde auf der Suche nach neuen PHAs eine neue Klasse von Biopolymeren synthetisiert. Die Polythioester (PTE) sind die einzigen bisher bekannten Biopolymere die Schwefel enthalten. Forschungsgebiete in diesem Bereich sind der Stoffwechsel der Bakterien zur Produktion, Verbesserung der Herstellung von PTE und PTE abbauende Bakterien.⁵⁵

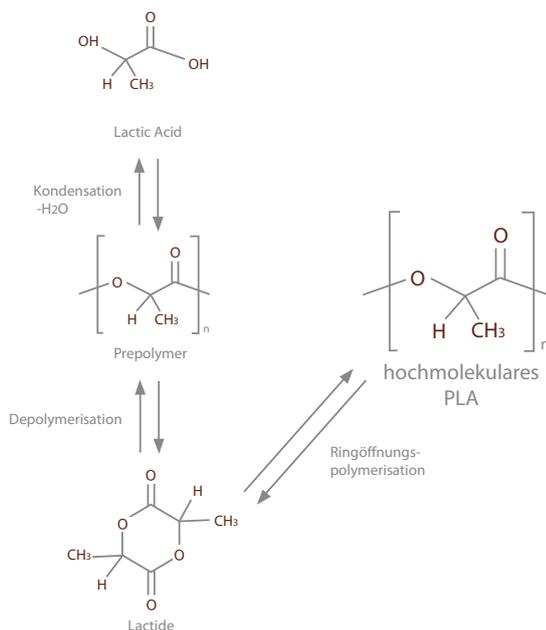


Abb.39 Polymerisation von PLA

2.3.2 POLYMILCHSÄURE - PLA

2.3.2.1 Rohstoffe, Herstellung und Aufbau

Polymilchsäure kann als erster vollständig auf NAWARO basierender Massenkunststoff bezeichnet werden. Seine Anwendung beschränkt sich auch noch eher auf Nischen-segmente, da der Preis etwas höher als für gewöhnliche Kunststoffe liegt. Mit der Errichtung eines Werks von Natureworks (Cargill Dow LLC) mit einer Jahreskapazität von 140.000t zur Herstellung von PLA (von engl. Polylactic Acid) wurde jedoch bereits der Grundstein zur Massenproduktion gelegt.⁵⁶ PLA ist kein natürlich vorkommendes Polymer, lediglich das ihm zu Grunde liegende Monomer, die Milchsäure, kommt natürlich vor und kann vollständig aus NAWARO gewonnen werden. Neben seiner Umweltverträglichkeit liegt der Grund, warum PLA als Massen-

⁵⁵ - mibi1.uni-muenster.de/Biologie.IMMB.Steinbuechel/Forschung/PTE.html [58]

⁵⁶ - <http://www.natureworkslc.com/about-natureworks-llc/from-plants-to-plastic.aspx> [50]

kunststoff in Betracht zu ziehen ist, in seiner vielfältigen Einsetzbarkeit und der Tatsache, dass er mit den üblichen Polymerwerkzeugen verarbeitet werden kann, begründet. In vielerlei Hinsicht verhält er sich wie PET, weist aber auch Eigenschaften ähnlich wie PP auf.

Derzeit sind zwei Methoden zur Herstellung von PLA bekannt. Im von Cargill Dow LLC entwickelten Verfahren erfolgt die Synthese durch eine Mischung aus Kondensations- und Ring-Öffnungspolymerisation. Für die Herstellung wurde ein kontinuierliches Verfahren entwickelt, das in der erwähnten Anlage zum Einsatz kommt. Zunächst wird hierbei die Milchsäure durch Fermentation von Dextrose (die z.B. aus Maisstärke gewonnen wurde) erzeugt und diese wiederum danach durch eine Kondensationsreaktion zu einem PLA-Prepolymer verknüpft. Die PLA-Oligomere werden zu Stereoisomeren umgewandelt und durch Vakuumdestillation purifiziert. Durch sog. Ringöffnungspolymerisation wird dann schließlich der hochmolekulare PLA Polymer erzeugt. Die Polymerisation wird durch Katalysatoren in Gang gesetzt. Ökologisch bedenkliche Lösungsmittel sind nicht erforderlich und die nach der Polymerisation anfallenden Monomerrückstände können unter Vakuum dem Prozess rückgeführt und recycled werden.⁵⁷

Für das auf diese Weise hergestellte PLA wurde von verschiedenen Seiten bereits Ökobilanzen, kurz LCAs von engl. Life Cycle Assessments errechnet, die ein positives Bild zeichnen. Sie beinhalten sämtliche Faktoren, von der Rohstoffherzeugung, über Wasser- und Luftverschmutzung bis hin zum Energieverbrauch. Es hat sich gezeigt, dass bei dem von Cargill Dow LLC erzeugten PLA rund 20-50% weniger Erdöl verbraucht wird⁵⁸, als bei herkömmlichen Kunststoffen.

Weiters wird der CO₂ Ausstoß, der durch den biologischen Abbau hervorgerufen wird, durch die CO₂ Aufnahme während des Pflanzenwachstums ausgeglichen und könnte längerfristig gesehen sogar eine negative CO₂-Bilanz produzieren, wenn Agrarabfälle oder andere Biomasse zur Produktion herangezogen würden. PLA ist vollständig abbaubar und kann auch vollständig recycled werden, indem es durch Hydrolyse zunächst wieder zu Milchsäure aufgeschlossen und danach wiederaufbereitet der Polymer-synthese zugeführt wird.

2.3.2.2 Anwendungsgebiete

Abb.40 zeigt einige mögliche PLA Produkte. Neben medizinischen Anwendungen und Agrarprodukten (Pflanzen-, Boden- und Mulchfolien, etc.) wird es vor allem als

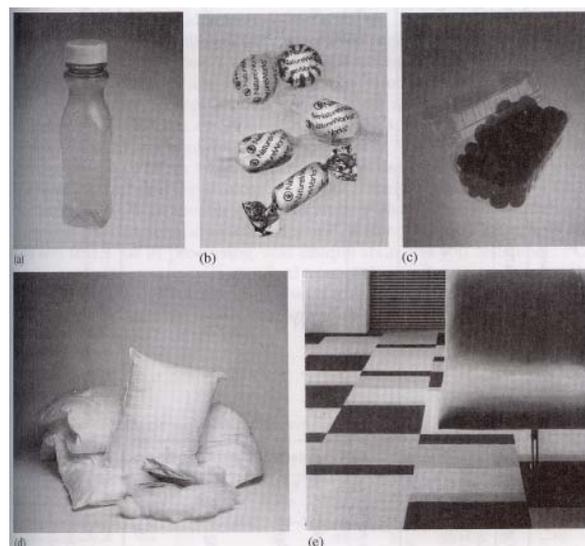


Abb.40 PLA Produkte

- a) Injektions- und Spritzstreckformen
- b) Folien
- c) Extrudierte, Thermoverformte Behälter
- d) Fasergefüllte Produkte
- e) Teppiche, Verkleidungen

57 - A.K.Mohanty, *Natural Fibers..*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2005 S.529f [26]

58 - Ebda S.534 [26]

Verpackungsmaterial vermarktet. Folienerzeugung ist eine übliche Herstellungsmethode. Daneben wird versucht PLA als Faserprodukt am Markt zu etablieren. Die PLA Fasern sind auf den herkömmlichen Anlagen verarbeitbar und lassen sich mit natürlichen, regenerierten oder synthetischen Fasern kombinieren. PLA bietet außerdem die Möglichkeit vollständig biobasierte Konstruktionswerkstoffe herzustellen (naturfaserverstärktes PLA).

2.4 WEITERE BIOPOLYMERE

2.4.1 LIGNIN

2.4.1.1 Vorkommen und Aufbau

Lignin stellt nach der Cellulose eines der am häufigsten vorkommenden natürlichen Polymere dar. In Pflanzen entsteht Lignin im Zuge der Ausbildung des vaskulären Systems und dient der Widerstandsfähigkeit gegenüber biologischen Abbau und ökologischen Veränderungen. In Verbindung mit Cellulose und Hemicellulose formt es das Kompositmaterial „Holz“, ein widerstandsfähiges, massives natürliches Material. In Weich- und Harthölzern beträgt der Ligninanteil 30 bzw. 20%.⁵⁹ Die Schwierigkeit, Biopolymere in möglichst reiner Form zu isolieren, trifft insbesondere auf Lignin zu. So wurde das Material zwar umgehend erforscht und beschrieben, doch herrscht über die exakte chemische Struktur noch immer eine gewisse Uneinigkeit. Zwar gibt es einige Methoden Lignin zu gewinnen, doch keine liefert authentisches Material und wie Pearl sagt: *„It is practically impossible to isolate two Lignin preparations with identical properties, even by the same procedure“*.⁶⁰

2.4.1.2 Verwertung

Lignin ist trotz dieser Problematik bereits seit den 1930er Jahren auch in der Herstellung von Kunststoffen in Verwendung. Der Großteil des heute produzierten Lignins fällt bei der Cellulosegewinnung, also in der Papierindustrie, an und wird hier zum größten Teil zur Energiegewinnung auch gleich wieder verbrannt. Nur wenige Prozent werden für eine stoffliche Verwertung aufbereitet. Lignin weist hier eher schlechte Eigenschaften als Energielieferant auf und würde dabei doch ein günstiges, ungiftiges und kommerziell erhältliches Polymer zur Herstellung von Biokunststoffen darstellen. Inhomogenität in chemischer Zusammensetzung und Molekulargewicht machen die Gewinnung einheitlicher Rohstoffe schwer und stellen die größten Hürden für eine Verarbeitung dar. Dennoch gibt es Entwicklungen zu lignin-basierten Thermoplasten. Ein Beispiel wäre ARBOFORM, der auf den üblichen Kunststoffverarbeitungsmaschinen verarbeitet werden kann. Lignin-basierte Werkstoffe weisen eine angenehme Haptik auf, besitzen einen holzähnlichen Geruch und auch ein ähnliches Brandverhalten wie natürliches Holz. Ein weiteres Feld interessanter Nutzung von Lignin stellt die Produktion ausgeklügelter Kompositfasern aus Lignin und synthetischen Polymeren dar. So kann Lignin zu spinnbaren Schmelzprodukten und Lignin-basierten Carbonfasern verarbeitet werden. Neben Versuchen, die

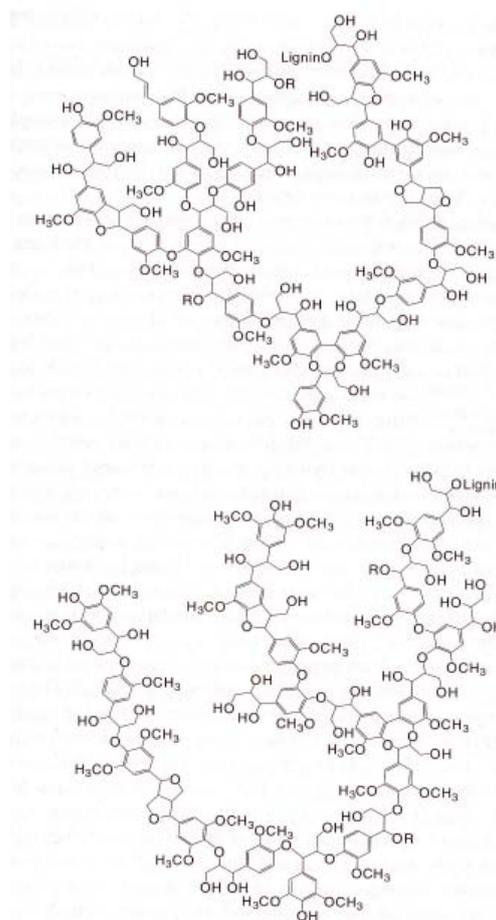


Abb. 41 Modellstrukturen von Weichholzlignin (o.), Hartholzlignin (u.)

59 - D.L. Kaplan (Hg.), *Biopolymers from Renewable Resources*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998 S.292 [18]

60 - Edda S.309 [18]

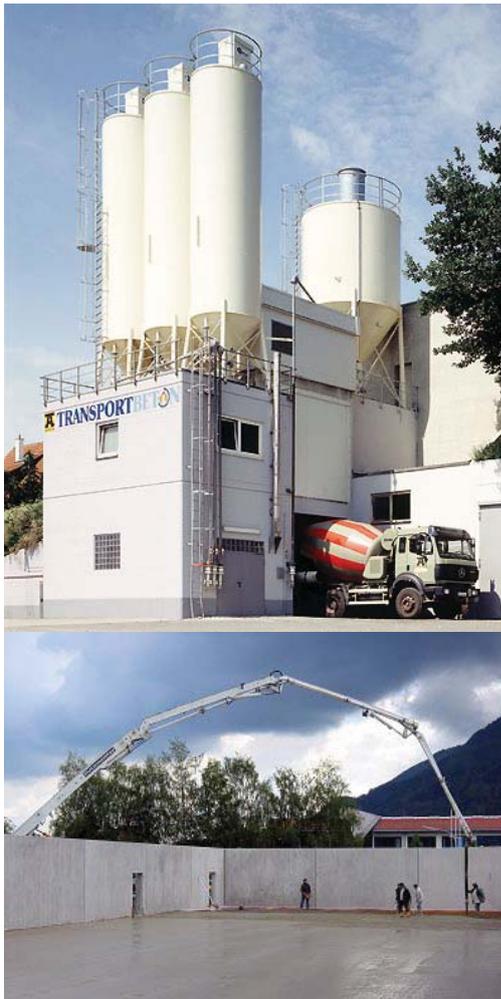


Abb.42 Transportbetonwerk (o.)
Einbringen von Transportbeton (u.)

einzelnen chemischen Komponenten des Holzes einer Kunststoffproduktion zuzuführen, wird auch versucht das Holz selbst für eine direkte Umformung weich zu machen. Grundsätzlich wurden bereits eine ganze Reihe von Methoden entwickelt, um Holz für plastische Verformung zugänglich zu machen. Heute stellen sie wichtige Herstellungsprozesse für die Holzverarbeitende Industrie dar: so z.B. durch das Einlegen in kaltes Wasser, das Erhitzen mit heißem Wasser oder Dampfbestrahlung oder durch das Erhitzen mit Radiostrahlen. Dabei hat sich erwiesen, dass vor allem die Kenntnis des Gehalts der Feuchtigkeit, die in Form von freiem und gebundenem Wasser im Holz vorkommt und die Verarbeitungstemperatur als Schlüsselkriterien in Bezug auf die späteren Eigenschaften der Produkte zu sehen sind. Es hat sich auch gezeigt, dass neben Wassergehalt und Holzart sogar die Höhe, Größe, Geometrie und der Zeitpunkt des Baumfällens Einfluss auf das Eigenschaftsprofil der aus den verwendeten Holzproben gewonnenen Werkstoffe ausübt.

2.4.1.3 Anwendungsgebiete im Bauwesen

Im Bausektor zählt Lignin, in chemisch modifizierter Form als verschiedene Ligninsulfonate, zu den mengenmäßig am öftesten eingesetzten Biopolymeren. Als Verflüssiger sind sie ein übliches Betonzusatzmittel. Dabei dienen sie entweder der Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Betons bei einem gleichbleibenden W/Z-Wert bzw. ermöglichen eine Verringerung des W/Z-Wertes bei gleich bleibender Konsistenz. Generell wird eine Wasserreduktion von 5-15%, über hochveredelte Produkte bis zu 20%, erreicht. Dies ist erwünscht da durch die Wasserreduzierung auch eine Druckfestigkeitssteigerung erreicht wird. Durch Verwendung von synthetischen Polymeren kann zwar eine Wasserreduzierung von bis zu 60% erreicht werden⁶¹, aber das geringere Preisniveau der Ligninsulfonate führt zu ihrer vermehrten Anwendung in weniger anspruchsvollen Bereichen (z.B. bei Fertig- und Transportbeton). Als Nebeneffekt erzeugen sie außerdem Luftporen im Beton und wirken verzögernd. Diese Eigenschaften können durch chemische Behandlung der Ligninsulfonate, je nach dem ob erwünscht oder nicht, noch etwas beeinflusst werden. 1995 wurden über eine Million Tonnen Ligninsulfonate verwendet – ein Anteil der weit über jenem der synthetischen Additive liegt.⁶² Der Trend weist aber in eine andere Richtung. Auf Grund von Umweltschutzproblemen mussten einige Zellstoffhersteller die Produktion einstellen, wodurch der konkurrenzfähige Preis allmählich in die Höhe getrieben wurde und einige Additivhersteller nach alternativen Stoffen zu suchen begannen.

61 - A. Steinbüchel (Ed.), *Biopolymers..*, Volume 10 .., Wiley-VCH, Weinheim, 2003 S.54 [27]

62 - Ebda S.54 [27]

2.4.2 NATURKAUTSCHUK

2.4.2.1 Vorkommen und Gewinnung

Naturkautschuk kann - als erster abgewandelter Naturstoff - als der klassische Kunststoff schlechthin betrachtet werden. Er wird der Stoffgruppe der Lipide zugerechnet, weist aber sehr spezielle Eigenschaften auf. Den Europäern ist er seit den Entdeckungen durch Kolumbus bekannt und wurde wahrscheinlich auch davor schon seit langer Zeit von indigenen Völkern zur Imprägnierung und als Abdichtungsmaterial verwendet. Bereits Maya und Azteken verarbeiteten Kautschuk für rituelle Spiele zu Gummibällen. Mit der Erfindung der Kautschukvulkanisation wurde ab 1839 der kommerziellen Produktion von Naturlatexprodukten der Weg geebnet.

In der Natur dient der Kautschuk verschiedenen Pflanzenarten als Schutz vor Bakterienbefall. Er wird an verletzten Stellen abgesondert, ist wasserabweisend und besitzt natürliche Antioxidantien. Es sind über 79 verschiedene Pflanzenfamilien bekannt, die gummiproduzierende Arten enthalten. Insgesamt sind an die 2000 verschiedene gummiproduzierende Pflanzenarten bekannt.⁶³ Im Laufe der Zeit sind viele Pflanzen zur Kautschukproduktion gezüchtet und „getestet“ worden. Die Pflanzenarten *Parthenium argentatum* (Guayule) und *Palaquium gutta* (Guttaperchabaum) haben sich als gute Lieferanten profiliert. Aus verschiedensten Gründen jedoch erwies sich der Kautschukbaum *Hevea brasiliensis* als beste Pflanze zur Kautschukproduktion und stellt auch heute noch den kommerziell am wichtigsten Lieferanten von natürlichem Gummi dar. Die Ernte des Latex erfolgt über die ganze Wachstumssaison des Baumes über ein recht kompliziertes, arbeitsintensives Anstichverfahren. Durch eine starke Nachfrage und verkürzte Verarbeitungsmethoden von getauchten Naturlatexprodukten wie Kondomen und Gummihandschuhen, ausgelöst durch die Besorgnis über eine Verbreitung von AIDS und Hepatitis im Lauf der 80er Jahre, kamen Produkte mit hohem Proteingehalt in Umlauf. Wie man festgestellt hat, konnten dadurch Latexsensibilität und selbst Allergien ausgelöst werden, die vereinzelt sogar zu Todesfällen führten. Dieser Umstand hat von neuem zur Verbesserung der Produktionsmethoden von Hevea-Produkten bzw. der Erforschung weniger proteinhaltigen Gummisorten (z.B. Guayule, *Ficus elastica*) motiviert.



Abb.43 Kautschukplantage und Latexgewinnung

2.4.2.2 Chemischer Aufbau

Natürlicher Gummi ist aus cis-1,4-Isopreneinheiten aufgebaut, die jeweils „Kopf- an Schwanzende“ miteinander verbunden sind. Die Vorsilbe cis- bezieht sich hierbei

63 - D.L. Kaplan (Hg.), *Biopolymers from Renewable Resources*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998 S.325 [18]

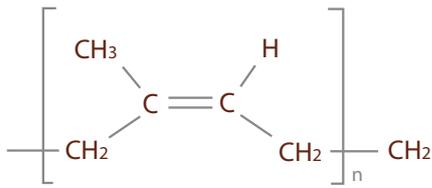


Abb.44 cis 1,4 Polyisopren



Abb.45 Kautschukprodukte

wiedermum auf den stereospezifischen Aufbau der Moleküle. Das Polymer der Hevea b. besteht in etwa aus 10.000-15.000 Isopreneinheiten und besitzt ein Molekulargewicht von $0,7 \cdot 10^6$ Da.⁶⁴ Der frisch gewonnene Latexsaft hat einen Gummigehalt von ca. 30% und einen pH-Wert von 6.5-7.0 und gelangt in verschiedenster Form zur endgültigen Verarbeitung.⁶⁵ Dies wären sog. Ribbed Smoked Sheets (durch koagulieren mit Säure hergestellt), Pale Crepes (geringe Begleitbestandteile), Estate Brown-, Compo Crepes und Remills (die bestimmte Arten von Abfällen enthalten können), technisch spezifizerte Kautschuke TSR, die eine spezifizerte Qualität besitzen und Flüssiglatex, aus konzentriertem Latex mit einem Gummigehalt von 60-65%, der mit Ammoniak haltbar gemacht wird und zur Herstellung von getauchten Produkten verwendet wird. Rohrer Naturkautschuk ist weich, leicht verformbar, in der Hitze klebrig und hart in der Kälte und wird daher mit verschiedensten Additiven wie schwarzen Füllstoffen, Weichmachern, Pigmenten und Vulkanisationsmitteln compoundiert, um ihn fester, widerstandsfähiger und ganz prinzipiell dauerhafter zu machen. Eine große Zahl von Kautschuken mit verschiedensten Eigenschaften wird heute auch auf rein synthetischem Weg hergestellt.

2.4.2.3 Anwendungsgebiete⁶⁶

Naturkautschuk besitzt eine hohe Elastizität und gute dynamische Beständigkeit und findet nach wie vor vielfältig Anwendung. Seine hauptsächlichen Einsatzgebiete liegen in der Produktion von LKW- und PKW Reifen sowie in der Herstellung verschiedenster technischer Artikel (Motoraufhängungen, Maschinenlagerungen, Schwingungsdämpfer, Membrane, etc.) und auf Grund seiner besonderen Eigenschaften wird Naturkautschuk auch in Zukunft ein wichtiger Naturstoff bleiben. Außerdem werden immer weitere neue Kautschukmaterialien entwickelt. Einige Beispiele sind „Entproteinisierte“ Kautschuke (DPNR – deproteinized natural rubber), Flüssigkautschuk (LNR – liquid natural rubber) oder thermoplastischer Gummi (TPNR – thermoplastic natural rubber) bei dem durch Copolymerisation mit Polyolefinen Eigenschaftskombinationen erzeugt werden. DPNR besitzt gute Elastizitätseigenschaften und ist für den Gebrauch als Abdichtung, Dichtungsring oder Vibrationsabsorber geeignet. Außerdem ist es für einen Einsatz im Gesundheits- und Lebensmittelbereich zugelassen. LNR wird als Kleber oder Dichtungsmittel und TPNR für Abdichtungen, Schläuche, Stoßdämpfer und Spoiler im Automobilbau sowie in Schuhen und Sportgeräten verwendet.

64 - Ebda S.329 [18]

65 - Ebda S.338 [18]

66 - H. Dominghaus, (Hg.), *Kunststoffe..*, Springer Verlag, 7. Auflage, Berlin, Heidelberg, 2008 S.1251ff [17]

2.4.3 HARZE - SCHELLACK⁶⁷

Als Schellack wird die Harzsekretion der Lackschildläuse bezeichnet, die diese im Larvenstadium zu ihrem Schutz absondern. Es ist das einzige tierisch produzierte, kommerziell verwertbare Harz. Neben guten wasserabweisenden Eigenschaften ist es biologisch verträglich und wird außer der Verarbeitung zu kleineren Festkörpern, Polituren und Siegellack auch als Lebensmittelüberzug (z.B. für Süßwaren oder Früchte) verwendet. Weitere tierische und pflanzliche Harze würden interessantes Potential als Biopolymer erforscht zu werden bieten (verschiedene Baumharze, Akroidharz, Kolophonium, Elemi, Tallharz, etc.).



Abb.46 Schellack

2.4.4 POLYPHOSPHATE⁶⁸

Sie sind, obwohl sie keine entscheidende Rolle für den Stoffwechsel besitzen, in fast allen lebenden Organismen zu finden. Sie wurden 1928 zum ersten Mal von Karl Lohmann untersucht und beschrieben. Zum Hauptthema ihrer Erforschung sind die vielfältigen Funktionen geworden, die sie innerhalb von Organismen übernehmen. Heute sind Polyphosphate eine übliche, weithin eingesetzte Chemikalie in Düngemitteln und als Komplexbildner in Reinigungs- und Waschmitteln, Pharmazeutika, Kosmetika und vielen anderen Bereichen vertreten. Auch als Composit in der Kunststoffherstellung besitzen sie eine gewisse Bedeutung. Es liegen heute über 6000 ihnen zurechenbare Patente vor, von denen etwa 15% in Bezug zu Kunststoffen stehen.

2.4.5 LIPIDE

Als Lipide werden alle in einer Zelle vorkommenden wasserunlöslichen, oder wenig löslichen Verbindungen zusammengefasst. Als Monomer zur Polymerisation hat eine Klasse der Familie der Lipide, die Triglyceride, als Rohstoff zur Polymerisation in letzter Zeit eine gewisse Wichtigkeit erlangt. Je nach dem ob sie bei Raumtemperatur in flüssiger oder fester Form vorliegen, werden sie als Öle bzw. Fette bezeichnet. Neben Pflanzenölen kommt, als eine weitere Klasse der Lipide, auch Wachs im Bauwesen zum Einsatz.

2.4.5.1 Aufbau, Gewinnung und Verwertung von Ölen

Öl wird in die drei Gruppen der nicht trocknenden, halbtrocknenden und trocknenden Öle unterteilt. Letztere, wie Flachs und Tungöl, trocknen zu elastischen Folien und werden in Farb- und Lackherstellung eingesetzt.

67 - D.L. Kaplan (Hg.), *Biopolymers from Renewable Resources*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998 S.24 [18]

68 - A. Steinbüchel (Ed.), *Biopolymers.., Volume 9.., Wiley-VCH, Weinheim, 2003 S.181 [52]*

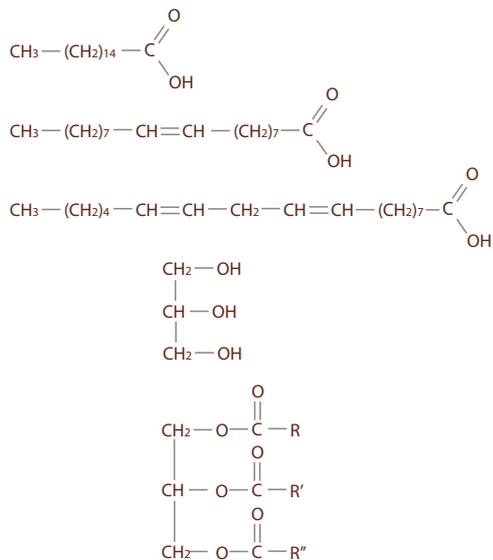


Abb. 47 Strukturformeln von Fettsäuren

(v.o.n.u.) Palmitinsäure (10% in Sojaöl)

Ölsäure (22% in Sojaöl)

Linolsäure (55% in Sojaöl)

sowie Glycerin und Triacylglycerid

wobei R für den Kohlenwasserstoffrest der Fettsäuren steht

Halbtrocknende Öle, wie Soja- und Maisöl, werden hauptsächlich zum Kochen verwendet. Nicht trocknende Öle, wie Rizinus- und Rapsöl, bleiben schmierig, bzw. können unter Umständen ranzig werden.

Die Öle werden aus den Pflanzensamen der genannten Pflanzenarten gewonnen. Mit einem Anteil von rund 30% ist Sojaöl weltweit das am häufigsten produzierte Pflanzenöl⁶⁹ und wird wie bereits erwähnt auch zumeist zur Lebensmittelherstellung verwendet. Neben Pflanzenölen besitzt auch Fischöl ein Potenzial zur Derivatisierung. Als Triglyceride werden dreiwertige Ester des Alkohols Glycerin bezeichnet (Ester entstehen durch Kondensationsreaktionen von Säuren mit Alkoholen). Triglyceride mit Carbonsäuregruppen werden als Triacylglyceride bezeichnet. Diese bilden den Hauptbestandteil von Fetten und Ölen. Die Komposition der verschiedenen Fettsäuren wirkt sich charakteristisch auf die Eigenschaften der Öle aus.

Neben einer direkten Verwendung der Öle stellen sie einen interessanten Rohstoff zur Polymerisation dar. Die Doppelbindungen der Triglyceridmonomere sind dabei angreifbar für verschiedene Vernetzungsreaktionen. Über kationische-, thermische- und Radikalpolymerisation lassen sich die Fettsäuren zu Biokunststoffen polymerisieren. Diese Kunststoffe besitzen zwar gute mechanische und thermische Eigenschaften, doch konnten bis jetzt erst wenige, für ihre Herstellung notwendige Comonomere gefunden werden. Allerdings gibt es eine große Zahl an Petroleum basierten Comonomeren, die zur Polymerisation zur Verfügung stehen. Über ein Vernetzung mit Diisocyanaten (Petroleum basiert) lassen sich zu etwa 50% biobasierte Polyurethane mit Eigenschaften gleich jenen der petrobasierten Polyurethane erzeugen.⁷⁰

2.4.5.2 Anwendung von Ölen und Wachsen im Bauwesen⁷¹

Wichtigkeit haben die Pflanzenöle vor allem als ökologische Alternative zu nicht biologisch abbaubaren mineralischen Bohrflüssigkeiten auf Off-shore Bohranlagen erlangt. Öle werden auch als Schalöle verwendet. Sie verhindern ein Festkleben des Betons an der Schalung. Als Emulgator dienen verschiedene Pflanzenöle auch als Zusatz in Farben und Lacken. Pflanzliche Wachse, als Schutzschicht gegen Austrocknen auf Blättern gebildet, werden als Holzpolituren für Fußböden und Möbel eingesetzt.

69 - A.K.Mohanty, *Natural Fibers...*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2005 S.728 [26]

70 - Ebd. S.800 [26]

71 - A. Steinbüchel (Ed.), *Biopolymers...*, Volume 10..., Wiley-VCH, Weinheim, 2003 S.57f [27]

2.4.6 NUKLEINSÄUREN⁷²

Neben Kohlenhydraten, Proteinen und Lipiden stellen die Nucleinsäuren die letzte große Gruppe von natürlichen Makromolekülen dar. Sie dienen der Übertragung von Erbinformation, durch die die Aminosäuresequenz von Proteinen festgelegt wird. Es existiert einzelsträngige RNA (Ribonucleinsäure) und die DNA (Desoxyribonucleinsäure) mit ihrer charakteristischen Doppelhelix-Struktur. *Bei der Fortpflanzung fließt Information von DNA zu DNA, bei den nichtreproduktiven Zelltätigkeiten fließt die Information jedoch von der DNA zur RNA und weiter zu den Proteinen, welche die in der DNA codierten Aufgaben schließlich ausführen.*⁷³ Im Gegensatz zu den Proteinen, deren Eigenschaften im dreidimensionalen Aufbau begründet liegen, besitzt das Makromolekül der DNA einen relativ einheitlichen Aufbau. Ihre Monomereinheiten bestehen aus sog. Nucleotiden, das sind Pentosen (Zucker mit 5 C-Atomen), an die eine Phosphatgruppe sowie eine stickstoffhaltige Base gebunden ist. Bei den Basen handelt es sich um Purin (Adenin A, Guanin G) oder Pyrimidin (Cytosin C, Thymin T, Uracil U). In DNA kommt lediglich Adenin, Cytosin, Guanin und Thymin vor, die hier über Wasserstoffbrückenkräfte komplementäre Paare bilden (A-T oder G-C), durch deren Sequenz im Makromolekül die zu übertragende Information definiert wird. Die RNA besteht nur aus einem Strang und anstelle der Base T ist bei ihr die Base U vorhanden. Sie kann sich unter Umständen auf sich selbst zurückfalten. In solchen Fällen kann die RNA einen spezifischen räumlichen Aufbau erhalten und, ähnlich wie Proteine, biokatalytische Funktionen übernehmen.

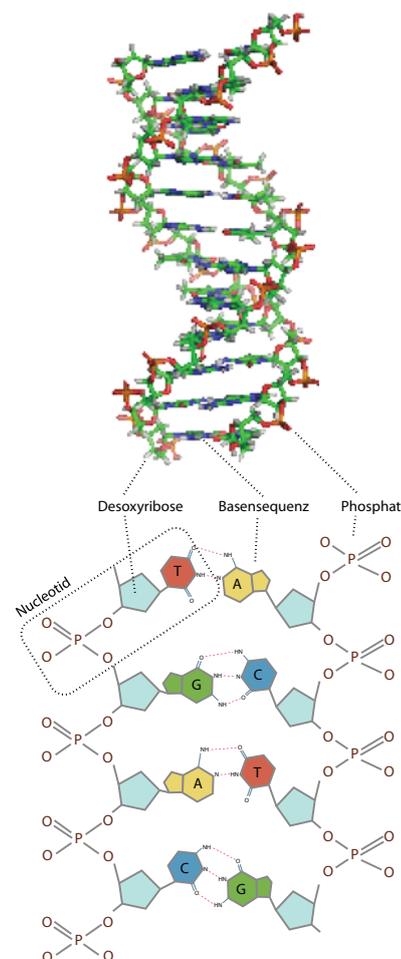


Abb.48 Aufbau der DNA

Desoxyribose wird hierbei die Pentose der DNA genannt, sie unterscheidet sich nur um ein Sauerstoffatom von der Ribose, der Pentose von RNA, erhält dadurch aber bereits sehr unterschiedliche chemische Eigenschaften

2.4.7 PETROCHEMISCH BASIERTE BIOPOLYMERE⁷⁴

Wie bereits erwähnt können einige petrochemische Polymere biologisch abbaubar erzeugt werden. Beispiele sind Polyvinylalkohol (PVA oder PVOH), Polyglykolsäure (PGS), Polycaprolacton (PCL) und Polyethylenoxid (PEG von Polyethylenglykol). Anwendungen reichen von landwirtschaftlichen Produkten, Papierbeschichtungen, Druckertintenzusatz bis hin zu pharmazeutischen (z.B. Medikamentenkapseln) und medizinischen Anwendungen (z.B. Wundauflagen, Nähte). Große Herausforderung besteht in der Entwicklung von biologisch verträglichen Stoffen und Werkstoffen mit kontrollierten Lebenszyklen unter bestimmten Bedingungen. Das Vorhandensein von Nicht-Kohlenstoffatomen im Polymerrückgrat macht sie angreifbar für einen biologischen Abbau.

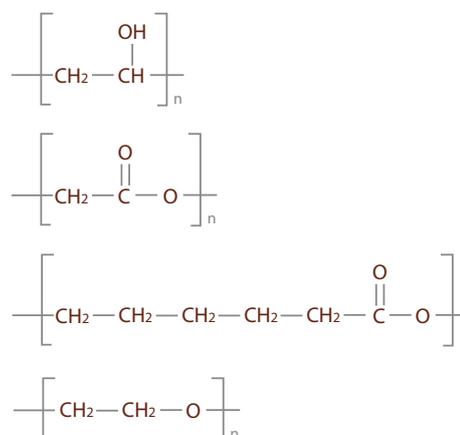


Abb.49 Biologisch abbaubare Polymere

(v.o.n.u.) Polyvinylalkohol, Polyglykolsäure, Polycaprolacton und Polyethylenoxid

72 - J.Markl, *Biologie, Elsevier GmbH, 7.Auflage, München, 2004 S.66-70* [45]

73 - Ebd. S.66 [45]

74 - E.S. Stevens, *Green Plastics, Princeton University Press, Princeton, 2002 S.46ff und S.54ff* [5]

Die -OH Gruppen in PVA machen diesen z.B. angreifbar für Hydrolyse. Zusammen mit Oxidation, Photodegradation und Kompostierung stellt die Hydrolyse eine der wichtigsten Arten des biologischen Abbaus dar. Die C-C Einfachbindungen der herkömmlichen Massenkunststoffe sind nicht für derartige Reaktionen angreifbar. Durch einen Einbau von „sensitiven“ Molekülen können allerdings auch sie auf einen gezielten biologischen Abbau programmiert werden.

2.5 NATURFASERN

Faserverstärkte Kunststoffe stellen für sich genommen einen Multimillionenmarkt dar. Sie werden heute mit 95% Anteil zwar noch immer von den Glasfasern dominiert⁷⁵, doch gewinnen Naturfasern seit den 1990er zusehends an Bedeutung. Da besonders Bauprodukte ein wichtiges Marktsegment darstellen, wird im folgenden Abschnitt auf die Naturfasern eingegangen.

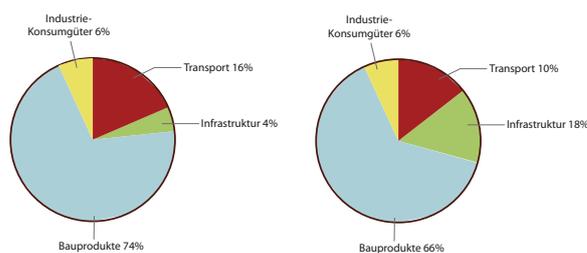
2.5.1 Aufbau, Gewinnung und Verwertung

Innerhalb der Gruppe der natürlichen Fasern wird zwischen Pflanzen-, Tier- und mineralischen Fasern unterschieden. Alleine die Pflanzenfasern stellen ein riesiges Spektrum an verschiedenen Rohstoffen dar. Innerhalb dieser Gruppe der Naturfasern wird zunächst auch noch zwischen Pflanzen- und Holzfasern unterschieden. Bei letzteren handelt es sich um preisgünstige Abfälle der Holzindustrie, die veredelt und zu Wood-Plastic-Composites (WPC) weiterverarbeitet werden können.

Bei Pflanzenfasern handelt es sich um Cellulose bzw. Lignocellulosematerialien, die aus dem Bast (Teilen der Rinde) oder den Stämmen, Blättern, Samen und Früchten von Pflanzen gewonnen werden können. Neben der Cellulose und dem Lignin tauchen als Bestandteile noch Hemicellulose und zu geringen Teilen Pektin und Wachse auf. Es ist zu beachten, dass Pflanzenfasern immer auch einen Feuchtigkeitsanteil (bis zu 20%) enthalten.

Pflanzenfasern sind komplexe natürliche Kompositematerialien. Eine einzelne Elementarfaser besitzt eine Länge von 1 bis 50mm. Semikristalline Mikrofibrillen, mit einem Durchmesser von 10-30nm aus 30-100 Cellulosemolekülen, umgeben in verschiedener hierarchischer Anordnung das Lumen und sorgen so für mechanische Stabilität der Pflanzenzelle. Die heute industriell isolierten Pflanzenfasern setzen sich zumeist aus mehreren Elementarfasern, Faserbündeln, mit einer Länge bis zu etwa 1m und einem Durchmesser von etwa 50-100 μm zusammen.⁷⁶

Nach der Ernte der Pflanzen werden die Fasern über verschiedene Prozesse vom Holzgewebe getrennt. Bastfasern werden über sog. Röst- oder Rottprozesse gewonnen. Angewandt werden vor allem biologische (Tau-, Wasserrösten) und mechanische Röstprozesse. Beide besitzen allerdings Nachteile: bei der Tauröste verbleibt der Rohstoff auf dem Feld, bis Mikroorganismen die Fasern von Kortex und Xylem gelöst haben. Hier beeinflussen die Wetterverhältnisse auf unvorhersehbare Weise die Qualität des Produkts. Wasserröstverfahren (Kalt- oder Warmwasserrösten)



Diagr.7 Naturfasercomposites (31.000t) nach Sektoren (li)
Holzfasercomposites (308.200t) nach Sektoren (re)

Nordamerika 2002

Faser	Arten	Produktion weltweit (10 ³ t)	Quelle
Holz	>10.000 Arten	1.750.000	Stamm
Bambus	>1.250 Arten	10.000	Stamm
Baumwolle	<i>Gossypium sp.</i>	18.450	Frucht
Jute	<i>Corchorus sp.</i>	2.300	Stamm
Kenaf	<i>Hibiscus cannabinus</i>	970	Stamm
Flachs	<i>Linum usitatissimum</i>	830	Stamm
Sisal	<i>Agave sisalana</i>	378	Blätter
Roselle	<i>Hibiscus sabaderriffa</i>	250	Stamm
Hanf	<i>Cannabis sativa</i>	214	Stamm
Kokosfaser	<i>Cocos nucifera</i>	100	Frucht
Ramie	<i>Boehmeria nivea</i>	100	Stamm
Abaca	<i>Musa textiles</i>	70	Blätter

Tab.10 Kommerziell wichtige Fasern

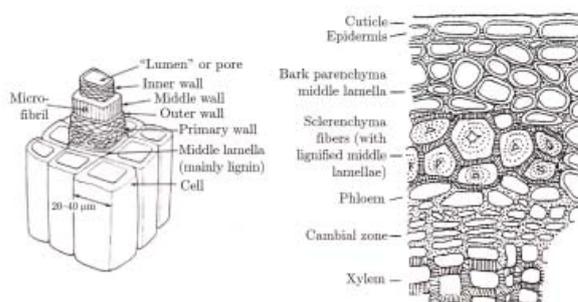


Abb.50 Schematischer Aufbau einer Faser (li)
unterschiedliche Zellen in einem Flachsstamm (re)

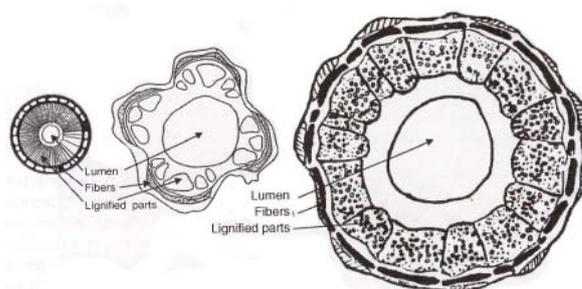


Abb.51 schematischer Vergleich von Stammquerschnitten
(v.l.n.r.) Flachs, Nessel und Hanf

75 - A.K.Mohanty, *Natural Fibers...*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2005 S.5 [26]

76 - Edda S.47f[26]



Abb.52 (v.o.n.u.) Flachs, Hanf, Jute, Kenaf, Ramie

wiederm gehen mit erheblichen Umweltbelastungen einher. Mechanische Röstverfahren stellen zwar eine einfachere und günstigere Möglichkeit dar, liefern allerdings gröbere Fasern. Neuere alternative Verfahren sind physikalische (Ultraschall-, Dampfexplosions-, Duralin- und Enzymprozess) sowie chemische Röstprozesse.

Pflanzenfasern werden nicht nur auf Grund ihrer ökologischen Vorteile von der Industrie verwendet. Neben niedrigem Energieaufwand in der Herstellung stellen CO₂-Neutralität, Recyclierbarkeit, Kosten- und mögliche Gewichtseinsparungen von 10-30% die Hauptgründe für ihren Einsatz dar.⁷⁷ Allerdings ist die hydrophile Natur und mangelnde Adhäsion zwischen Faser und Polymermaterial eine große Herausforderungen für ihre technische Entwicklung. Durch chemische und physikalische Oberflächenbehandlungsmethoden wird versucht diesen Schwierigkeiten zu begegnen.⁷⁸

2.5.2 wichtige Pflanzenfasern⁷⁹

Bastfasern

Flachs (*Linum usitatissimum*) - als Leinen eines der ältesten Textilfasern und seit ungefähr 10.000 Jahren als Pflanze kultiviert; in 80-100 Tagen erfolgt ein Pflanzenwachstum auf 80-150 cm Höhe; Faserbündel 60-140 cm lang mit einem Durchmesser von 40-80 μ m; die Faser dehnt sich nur gering unter Beanspruchung; verlieren Festigkeit im Sonnenlicht; relativ teuer und daher für hochpreisige Anwendungen

Hanf (*Cannabis sativa*) - wird seit ungefähr 12.000 Jahren als Pflanze kultiviert; die Pflanze benötigt kaum Pflanzenschutzmittel; Tiefwurzler, wächst bis zu 5 m Höhe; Faserbündel mit einer Länge von 1,8 m und mehr; Elementarfaser 13-25 mm; gute Feuchtigkeitsbeständigkeit und gute mechanische Eigenschaften

Jute (*Corchorus capsularis*) - wichtigste Pflanzenfaser für Textil neben Baumwolle; Einjahrespflanze; 2 - 3,5 m hoch; Faserlänge 1,5 - 3 m; glänzend und belastbar; sehr hygroskopisch; trocken allerdings unbegrenzt haltbar

Kenaf (*Hibiscus cannabinus*) - Einjahrespflanze mit einer Höhe von 2,4 bis 6 m in 5 Monaten; höchste CO₂-Absorptionsrate aller Pflanzen; Elementarfaserlänge 1,5 - 6 mm; grob, brüchig und schwierig zu gewinnen; weitere Schwächung wenn nass

77 - Ebda S.235 [26]

78 - S. Fakirov, Handbook of Engineering Biopolymers., Carl Hanser Verlag, München, 2007 S.49 [42]

Ramie (*Boehmeria nivea*) - wird sechs mal im Jahr geerntet und wächst bis zu einer Höhe von 2,5m; zählt zu den längsten und stärksten Textilfasern; besitzt sogar noch eine leicht höhere Festigkeit

Brennnessel (*Urtica dioica*) - Kultivierung kann bis 3000 v.Chr. zurückverfolgt werden; äußerst feine und reißfeste Fasern mit einer durchschnittlichen Länge von 4cm; sie besitzt nichtlignifizierte Fasern in der Barke; bis zum 2. Weltkrieg wurden noch häufig Textilien aus ihr hergestellt; die Produktion danach aber fast vollständig eingestellt

Blattfasern

Sisal (*Agave sisalana*) - bereits von Maya und Azteken kultiviert; wächst zu einer Höhe von bis zu 2m; Fasern werden maschinell aus den frischen Blättern gewonnen; diese bestehen aus hohlen Subfasern und besitzen eine Länge von 0,6 - 1,5m und einen Durchmesser von 100 - 300µm; schneller biologischer Abbau in Salzwasser; schlechte Oberflächenhaftung mit Polymermatrix; verschiedene mechanische Eigenschaften der Fasern entlang des Blattes; verschlechterte Eigenschaften unter hohen Temperaturen

Ananas (*Ananas comosus*) - ursprünglich wegen der Frucht gezüchtet; ihre Blattfasern besitzen feine Qualität und gute mechanische Eigenschaften (hoher Celluloseanteil)

Abaca (*Musa textilis* Nee) - Bananengewächs; wächst zu einer Höhe von 3 - 4m; ihre Faser zählt zu den widerstandsfähigsten Pflanzenfasern (dreifache Zugfestigkeit von Baumwolle, doppelte von Sisal); nicht so leicht durch Salzwasser angreifbar; technische Fasern besitzen eine Länge von 2 - 4m; die Einzelfaser eine Länge von 4 - 6mm und einen Durchmesser von 17 - 21µm

Ölpalme (*Elaeis guineensis*) - wird für die Erzeugung von Palmwein, Lebensmittel, Medizin, Baumaterialien, Palmöl und einige weitere Zwecke kultiviert; Produktion im 20. Jh. stark gesteigert; da die Faserabfälle auf den Feldern eine große Umweltbelastung darstellen versucht man diese für technische Zwecke zu verwerten; schlechtere Festigkeitswerte als die meisten anderen Pflanzenfasern

Samenfasern

Baumwolle (*Gossypium sp.*) - wichtigste Textilfaser; Pflanzenfamilie *Gossypium hirsutum* liefert 87% der Baumwollproduktion; erste Baumwollzüchtungen können auf 5800 v.Chr. zurückdatiert werden; reife Pflanzenfrucht



Abb.53 (v.o.n.u.) Brennnessel, Sisal, Ananas, Abaca, Ölpalmen, Baumwolle



Abb.54 Kokospalmen, -fasern

Faser	Dichte (g/m ³)	Durchmesser (µmeter)	Zugfestigkeit (Mpa)	E-Modul (Gpa)	Bruchdehnung (%)
Flachs	1,5	40 - 600	345 - 1500	27,6	2,7 - 3,2
Hanf	1,47	25 - 500	690	70	1,6
Jute	1,3 - 1,49	25 - 200	393 - 800	13 - 26,5	1,16 - 1,5
Kenaf			930	53	1,6
Ramie	1,55	-	400 - 938	61,4 - 128	1,2 - 3,8
Nessel			650	38	1,7
Sisal	1,45	50 - 200	468 - 700	9,4 - 22	3 - 7
Ananas		20 - 80	413 - 1627	34,5 - 82,5	1,6
Abaca		430 - 760			
Ölpalme	0,7 - 1,55	150 - 500	248	3,2	25
Baumwolle	1,5 - 1,6	12 - 38	287 - 800	5,5 - 12,6	7 - 8
Kokosfaser	1,15 - 1,46	100 - 460	131 - 220	4 - 6	15 - 40
Glasfaser	2,55	< 17	3400	73	2,5
Kevlar	1,44		3000	60	2,5 - 3,7
Karbon	1,78	5 - 7	3400 - 4800	240 - 425	1,4 - 1,8

Tab.11 charakteristische Eigenschaften von pflanzlichen- und synthetischer Fasern im Vergleich

bricht durch den Druck der Samenhaare auf und legt so faustgroße Faserbällchen aus einzelligen Fasern mit einer Länge von 25 - 60mm und einem Durchmesser zw. 12 und 45µm frei; Baumwolle ist stark hydrophil und setzt Wärme unter Feuchtigkeitsaufnahme frei; trocknet langsam; beständig in Feuchtigkeit; nass belastbarer als trocken

Fruchtfasern

Kokos (*Cocos nucifera*) - Kokosfasern werden aus der Hülle der Früchte gewonnen, die bei der Kokosölgewinnung anfallen; aus 100 Nüssen lassen sich ca. 7,5 - 8,2kg Kokosfasern gewinnen; wird traditionell in langwierigen und umweltbelastenden Röstprozessen - Salzwasserrösten mit einer Dauer von 10 - 12 Monaten - gewonnen; die Fasern selbst zählen zu den widerstandsfähigsten erhältlichen Pflanzenfasern

Stroh

Stroh - Reisstroh wurde bereits seit antiker Zeit in Lehmziegel eingelegt, es fällt in großen Mengen als Nebenprodukt in der Getreideproduktion an und stellt, vor allem in Ländern in denen es an Bauholz mangelt, eine günstige Alternative in der Herstellung von Bauplatten dar

2.6 ÖKOLOGIE VON BIOPOLYMEREN

Zur Ökologie von Biopolymeren Werkstoffen liegen zahlreiche Studien vor. Hat man sich früher zumeist auf die Erstellung von (Primär-) Energiebilanzen beschränkt, wird heute üblicherweise über ein Produkt über die Ökobilanz bewertet (englisch: LCA von Life cycle assessment). Das bedeutet es wird versucht die gesamten Prozessketten von der Herstellung bis zur Aufbereitung eines Materials in die Bilanz mit einzubinden.

Die ökologischen Bewertungen biopolymerer Werkstoffe zeigen oft ein recht unterschiedliches Bild, je nach dem welche Faktoren berücksichtigt wurden. Vor allem PHA Produkte wurden in der Vergangenheit als negative Beispiele für Biopolymerprodukte angeführt, da Studien auf einen sehr viel höheren Energiebedarf als in der Erzeugung von herkömmlichen Massenkunststoffen hindeuten. Es hat sich aber auch gezeigt, dass sich diese Werte im Laufe der letzten Jahre durch eine Weiterentwicklung der Produktionsmethoden bereits entscheidend verbessert haben. Dies trifft auch auf andere Biopolymerprodukte zu. So kann, ausgehend von einer aktuellen Meldung (vom 13.02.2009), die CO₂ Emission des PLA Produkts Ingeo laut Hersteller um 77% auf 0,75kg pro kg Kunststoff reduziert werden.⁸⁰ Generell lässt sich allerdings nur schwierig eine Aussage darüber treffen, ob Biokunststoffen herkömmlichen Kunststoffen aus ökologischer Sicht vorzuziehen sind, doch unterstützen Studien generell deren Weiterentwicklung. Neben den primären Gewinnen (Rohstoffgewinnung, Treibhausgasentwicklung und Abfallentsorgung) spielen oft sekundäre Einsparungen (Faktoren die den Gebrauch eines Produkts betreffen) eine entscheidende Rolle, wenn es um ein Argument für den Ersatz herkömmlicher Kunststoffe geht. So kann z.B. eine Gewichtsreduzierung eines Fahrzeugs durch die Verwendung von naturfaserverstärkten Kunststoffen entscheidende Einsparungen mit sich bringen.

Seit den 1980er Jahren werden auch, ausgehend von der Entwicklung stärkegefüllter Polyolefine und zu diesem Thema folgende Studie „Green report“ in den USA, die Grundsteine für eine Standardisierung über die biologische Abbaubarkeit von umweltfreundlichen Kunststoffen gelegt.⁸¹ Seit 2000 werden in Europa die Merkmale biologisch abbaubarer Kunststoffe nach EN 13432 und EN 14995 definiert und über standardisierte Untersuchungsmethoden getestet. Produkte, die den Richtlinien entsprechen, werden demnach auch zertifiziert und dürfen mit einem „Keimling“ gekennzeichnet werden.⁸² In den USA werden Eigenschaften und Terminologie zu den Biokunststoffen durch ASTM 6400 und 6866 geregelt.

Kunststoff	funktionelle Einheit FE (kg)	"cradle-to-gate" Energieverbrauch (nicht erneuerbar) (MJ/FE)	für Emissionsberechnung angenommene Abfallbehandlung	Treibhausgasemissionen (kgCO ₂ /FE)
HDPE	1	80	Verbrennung	4,84
LLDPE	1	72,3	Verbrennung	4,54
LDPE	1	80,6	Verbrennung	5,04
LDPE	1	91,7	80% Verbr. 20% Deponierung	5,20
Nylon 6	1	120	Verbrennung	7,64
PET (Fischengüte)	1	77	Verbrennung	4,93
PS	1	87	Verbrennung	5,98
EPS	1	84	Verbrennung	5,88
EPS	1	88	keine ("cradle to gate")	2,80
TPS	1	25,4	Verbrennung	1,14
TPS	1	25,5	80% Ver. 20% Dep.	1,2
TPS	1	25,4	100% Kompostierung	1,14
TPS + 15% PVCH	1	24,9	Verbrennung	1,73
TPS + 60% PCL	1	52,3	Verbrennung	3,60
Stärke	1	18,5	keine ("cradle to gate")	1,08
Mater-Bi (geschäumt)	1	32,4	Kompostierung	0,89
Mater-Bi (Folie)	1	53,5	Kompostierung	1,21
PLA	1	57	Verbrennung	3,84
PHA (Fermentation)	1	81	kA	kA
PHB (versch.)	1	81	kA	kA
Produktionsmethoden)		66 - 573		
TPS: Thermoplastische Stärke				

Tab.12 Zusammenfassung einiger LCA-Schlüsselindikatoren



Abb.55 Keimling

Kennzeichnung nach EN 13432 und 14995 zertifizierter Produkte

80 - http://www.plastemart.com/plasticnews_desc.asp?news_id=14414&P=P [59]

81 - R.Smith (Ed.), *Biodegradable polymers for...*, Woodhead Publishing Limited und CRC Press, Abington bzw. Boca Raton, 2005 S. 316 [51]

82 - <http://www.european-bioplastics.org/index.php?id=57> [60]

Segmente / Deskriptoren	Verpackungen / Lebensmittelindustrie	Mulchfolien & Pflanztüpfe / Garten- & Landschaftsbau	Dauerhafte Produkte / Konsumgüter-industrie	Interieur / Automobilindustrie
Gesamtmarktgröße 2005 in t	<ul style="list-style-type: none"> 3,5 Mio. t Kunststoffverpackungen Davon 1,8 Mio. t kurzlebige Produkte 	<ul style="list-style-type: none"> 230.000 t Gesamtmarkt Landwirtschaft (Kunststoffe) Davon ca. 30.000 t bes. geeignet für Substitution „bgfS“) 	<ul style="list-style-type: none"> 1,8-2,7 Mio. t Kunststoffe Konsumgüter 	<ul style="list-style-type: none"> 800.000 t Gesamtmenge Kunststoffe in Fahrzeugen ca. 400.000 t Kunststoffe im Automobil-Interieur*
Bio-Polymere Marktgröße in t	<ul style="list-style-type: none"> 2005: < 15.000 t 2010: 110.000 t (5% der kurzlebigen Verpackungen) 2020: 520.000 t (20% der kurzlebigen Verpackungen) 	<ul style="list-style-type: none"> 2005: < 100 t (mehrere Produkte in Markteinführung) 2010: 3.500 t (10% von bgfS) 2020: 13.000 t (30% von bgfS) 	<ul style="list-style-type: none"> 2005: < 100 t 2010: 24.000 t (ca. 1% des Gesamtmarktes) 2020: 290.000 t (ca. 10% des Gesamtmarktes) 	<ul style="list-style-type: none"> 2005: < 10 t 2010: 48.000 t (ca. 10% der Kunststoffe Auto Int.) 2020: 230.000 t (ca. 40% der Kunststoffe Auto Int.)
Bio-Polymere Marktgröße in €	<ul style="list-style-type: none"> 2005: < 45 Mio. € 2010: 165 Mio. € 2020: 780 Mio. € 	<ul style="list-style-type: none"> 2005: < 300.000 € 2010: 5 Mio. € 2020: 20 Mio. € 	<ul style="list-style-type: none"> 2005: < 300.000 € 2010: 35 Mio. € 2020: 440 Mio. € 	<ul style="list-style-type: none"> 2005: < 30.000 € 2010: 72 Mio. € 2020: 350 Mio. €
Bio-Polymer-Marktwachstum in % p.a.	<ul style="list-style-type: none"> 2005-2010: > 30% 2010-2020: ca. 16% 	<ul style="list-style-type: none"> 2005-2010: > 70% 2010-2020: ca. 15% 	<ul style="list-style-type: none"> 2005-2010: > 160% 2010-2020: ca. 29% 	<ul style="list-style-type: none"> 2005-2010: > 380% 2010-2020: ca. 17%
Absatz- u. Einkommenspotenzial für dt. Land-/Forstwirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> 2005: 23.000 t 2010: 200.000 t 2020: 940.000 t Weizenstärke 	<ul style="list-style-type: none"> 2005: < 200 t 2010: 6.500 t 2020: 25.000 t Weizenstärke 	<ul style="list-style-type: none"> 2005: < 200 t 2010: 45.000 t 2020: 520.000 t Weizenstärke 	<ul style="list-style-type: none"> 2005: < 20 t 2010: 86.000 t 2020: 415.000 t Weizenstärke

Bei den Preisabschätzungen wurde stets der Granulatpreis angesetzt, nicht der Endproduktpreis!

Annahmen: Durchschnittlicher Bio-Polymer-Preis 2005: 3 €/kg, 2010/2020 1,50 €/kg

* Grobe Schätzung: Kunststoff Interieur ca. 50% von Volumen Kunststoff Fahrzeuge

Tab.13 Marktanalyse über den Einsatz von Biopolymeren in vier Marktsegmenten mit Prognose bis 2020 (Deutschland, 2006)

Segmente / Deskriptoren	Interieur und Exterieur/ Automobil PKW	Interieur u. Exterieur / Transport*	Dauerhafte Produkte / Konsumgüter-industrie	Profile / Bau- & Möbelindustrie
Gesamtmarktgröße 2005 in t	<ul style="list-style-type: none"> 800.000 t Gesamtmenge Kunststoffe in Fahrzeugen 600.000 t Kunststoffe in PKWs¹ 	<ul style="list-style-type: none"> 800.000 t Gesamtmenge Kunststoffe in Fahrzeugen 200.000 t Kst. Transport¹ 	<ul style="list-style-type: none"> 1,8-2,7 Mio. t Kunststoff Konsumgüter Gesamtmarkt (GM) 	<ul style="list-style-type: none"> 2,8 Mio. t Kunststoff 6,6 Mio. t Holz Gesamtmarkt Bau- und Möbelindustrie
NFK & WPC Marktgröße in t	<ul style="list-style-type: none"> 2005: 80.000 t (vor allem NF u. Holz, kein Cotton) 2010: 120.000 t ** 2020: 200.000 t ** 	<ul style="list-style-type: none"> 2005: >80.000 t vor allem Cotton u. Holz 2010: 100.000 t ** 2020: 150.000 t ** 	<ul style="list-style-type: none"> 2005: < 100 t 2010: 24.000 t ** (1% GM) 2020: 145.000 t ** (5% GM) 	<ul style="list-style-type: none"> 2005: < 10.000 t 2010: 100.000 t ** 2020: 200.000 t ** hauptsächlich WPC
NFK & WPC Marktgröße in €	<ul style="list-style-type: none"> 2005: > 400. Mio. € 2010: 500 Mio. € 2020: 600 Mio. € 	<ul style="list-style-type: none"> 2005: > 400. Mio. € 2010: 500 Mio. € 2020: 550 Mio. € 	<ul style="list-style-type: none"> 2005: < 200.000 € 2010: 36 Mio. € 2020: 220 Mio. € 	<ul style="list-style-type: none"> 2005: < 15 Mio. € 2010: 150 Mio. € 2020: 300 Mio. €
NFK & WPC-Marktwachstum in % p.a.	<ul style="list-style-type: none"> 2005-2010: ca. 4,5% 2010-2020: ca. 2% 	<ul style="list-style-type: none"> 2005-2010: ca. 4% 2010-2020: ca. 4% 	<ul style="list-style-type: none"> 2005-2010: > 200% 2010-2020: ca. 18% 	<ul style="list-style-type: none"> 2005-2010: > 60% 2010-2020: ca. 7%
Absatz- u. Einkommenspotenzial für dt. Land-/Forstwirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> 2005: 40.000 t 2010: 60.000 t 2020: 100.000 t Je 50% NF, 50% Holznebenprodukte (Hnp) 	<ul style="list-style-type: none"> 2005: >16.000 t Hnp u. >24.000 t NF 2010: 20.000 t Hnp. u. 30.000 t NF 2020: 30.000 t Hnp. u. 45.000 t NF 	<ul style="list-style-type: none"> 2005: < 30 t Hnp und < 20 t NF 2010: 8.000 t Hnp. und 4.000 t NF 2020: 50.000 t Hnp. und 23.000 t NF 	<ul style="list-style-type: none"> 2005: < 5.000 t Hnp und < 500 t NF 2010: 60.000 t Hnp. und < 5.000 t NF 2020: 120.000 t Hnp. und < 10.000 t NF

Bei den Preisabschätzungen wurde der Granulat- bzw. Zwischenprodukt-(Halbzeug-)Preis angesetzt, nicht der Endproduktpreis!

Annahmen: WPC/NFK-Granulate 1,50 €/kg (Extrusion, Spritzgießen, Fließpressen), Formpressteile: 5 €/kg (spätere Prozessstufe als Granulat)

1) Grobe Schätzung: Kunststoff PKW ca. 75%, Transport ca. 25%

*) Transport: NFZ, Schiene, Wasser, Luft **) teilweise mit Bio-Polymermatrix

Tab.14 Marktanalyse über den Einsatz von NFK und WPC mit Prognose bis 2020 (Deutschland, 2006)

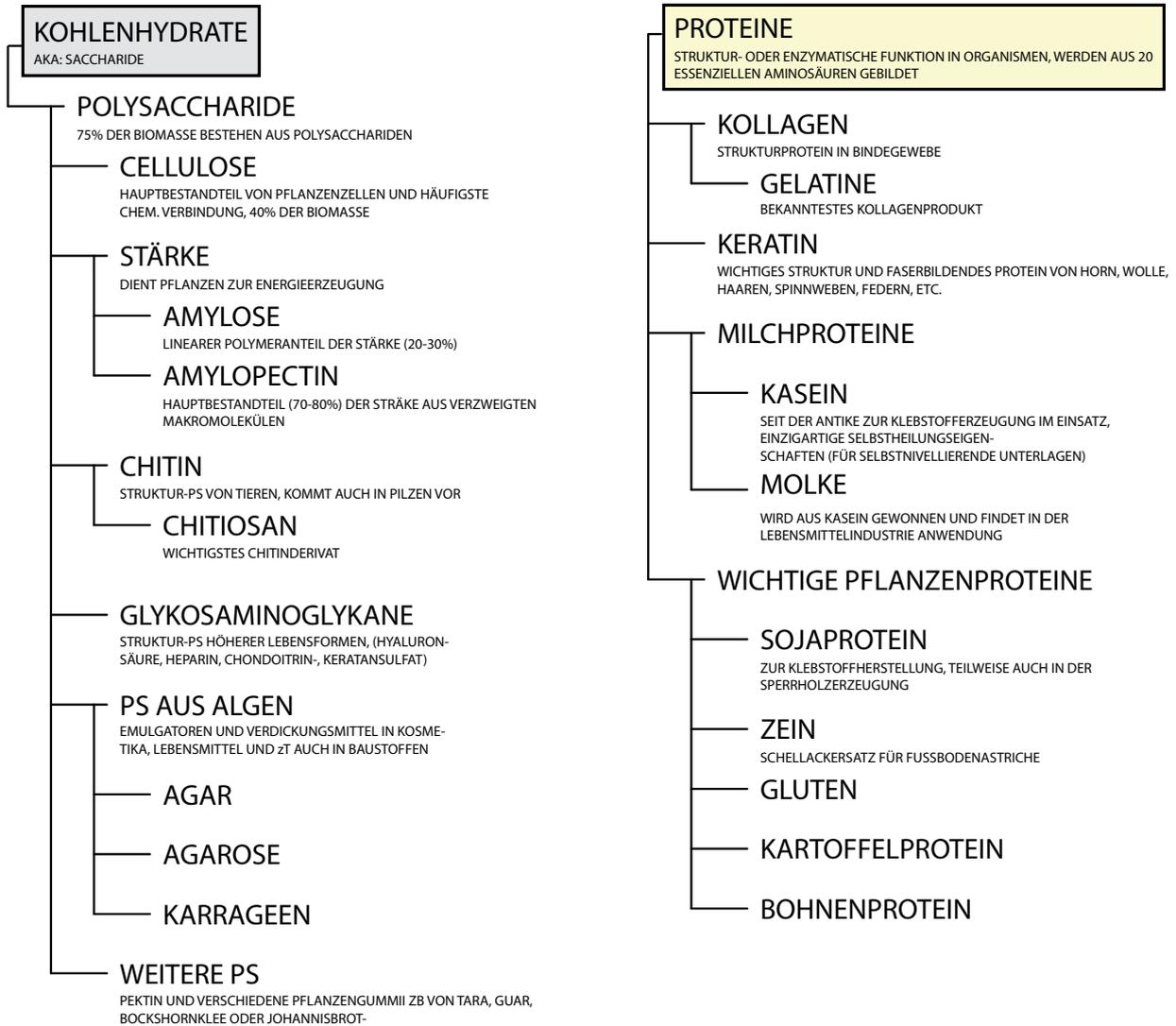
2.7 ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG

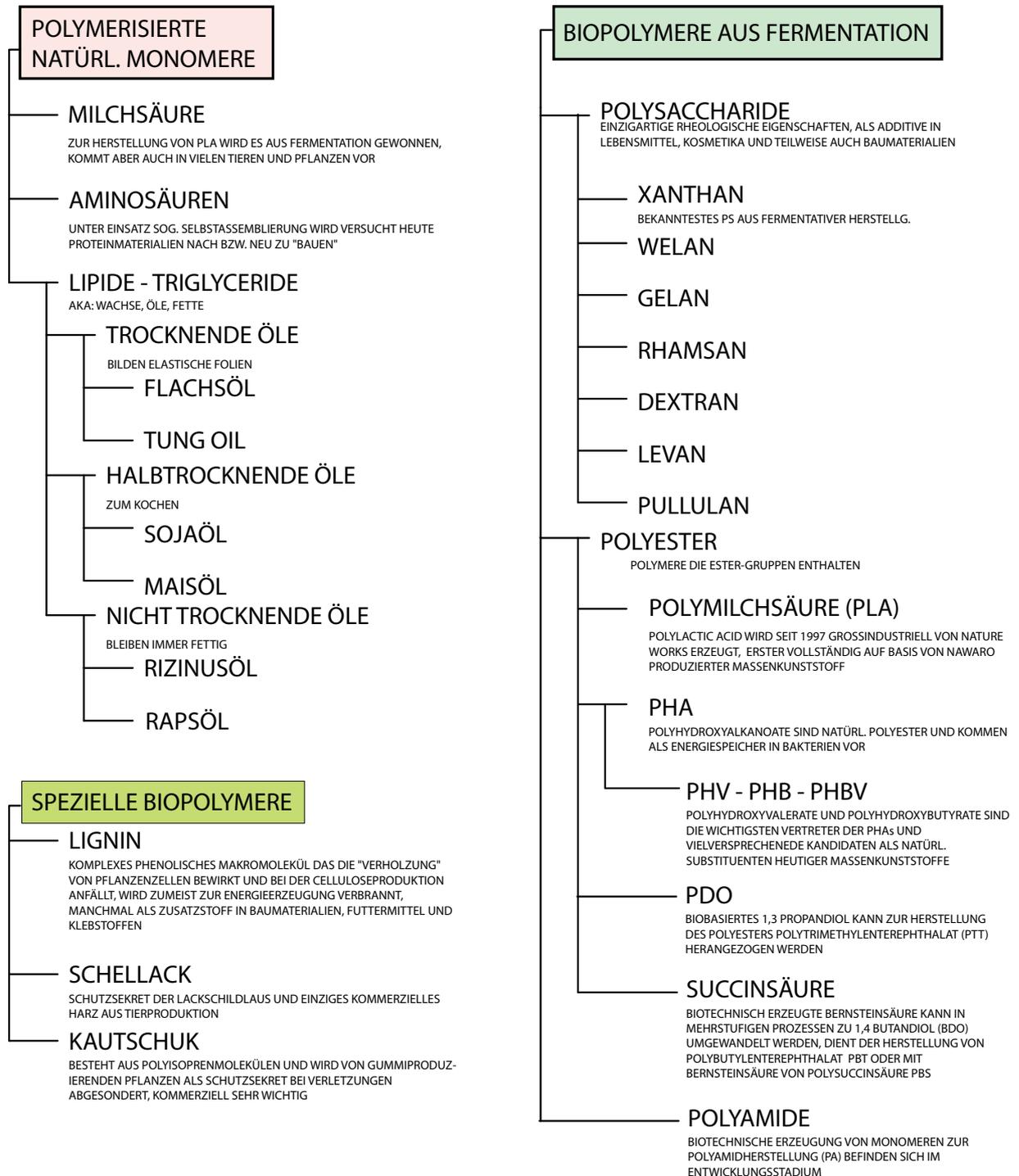
Materialien werden nach Preis und Eigenschaftsprofil ausgewählt. Abbaubarkeit und Nachhaltigkeit sind für verschiedene Agrar- und Gartenprodukte und vor allem für kurzlebige Verpackungsmittel zu entscheidenden Kriterien geworden. BAK, bei denen es sich zu 90% um Biopolymerwerkstoffen aus NAWARO handelt, sind aus diesen Gründen für einige Nischenmärkte bereits sehr wichtige Produkte geworden.⁸³ Das Gros unter ihnen bilden dabei nach wie vor Stärkeprodukte. Andere Produkte befinden sich allerdings erst seit kurzem auf dem Markt, bzw. stehen noch vor ihrer Einführung. Als impulsgebend für die Entwicklung und Anwendung neuer biobasierter Konstruktionskunststoffe ist vor allem die Automobilindustrie zu sehen. In der Herstellung von dauerhaften Konsumgütern werden momentan nur irrelevante Mengen an Biokunststoffen eingesetzt. Biologische Abbaubarkeit ist hier nicht erwünscht und eine Entwicklung wird stark davon abhängen, ob biopolymere Werkstoffe gleichwertige mechanische Eigenschaften wie ihre synthetischen Pendanten erreichen werden. Des Weiteren wird sich das Rohölpreisniveau, an das die Preise der herkömmlichen Kunststoffe gekoppelt sind, entscheidend auf eine Entwicklung der Biopolymerwerkstoffe auswirken, zumal es sich bei den Kunststoffgranulaterzeugern in der Regel um Großkonzerne (in Deutschland 50 Unternehmen) mit einer Nähe zur petrochemischen Industrie handelt. Als Kalkulationsgrundlage für die nebenstehende Prognose wurde ein durchschnittlicher Granulatpreis für Biopolymere von €3,-/kg bzw. €1,20/kg für konventionelle Kunststoffe angenommen. Für 2010/2020 wurde ein Preis für Biopolymere von €1,50/kg angenommen.⁸⁴ Aktuellen Angaben zu Folge kann der Biokunststoff Cereplast bereits zum Preis von 85 US Cent/Pfund (etwa €1,4/kg) produziert werden - auf Grund der aktuellen Rohölpreise liegt der Preis für konventionelle Kunststoffe allerdings bei etwa 50 - 60 US Cent/Pfund. Hybride Kunststoffe liegen bei einem Preis von 55 - 60 US Cent/Pfund.⁸⁵ Neben der Ölpreisentwicklung wird sich auch die Beantwortung von bioethischen Fragen aus dem Bereich der Gentechnik oder der Landwirtschaft (hierbei insbesondere im Bezug auf Anbauflächen) auf die Entwicklung von Biokunststoffen auswirken. Als zentraler Punkt in der Bioethik stellt sich die Frage, inwieweit natürliches Erbgut verändert werden darf. Eine Beurteilung muss von Fall zu Fall einzeln getroffen werden. Bezüglich der Anbauflächen ist zu sagen, dass konkurrenzfähige Preise zwar nur durch Großwirtschaft erzielt werden können, doch nimmt die Biokunststoffindustrie hier bis jetzt nur einen geringen Stellenwert ein - so liegt der Stärkeverbrauch für BAK in etwa bei einem tausendstel Prozent der gesamten produzierten Stärke.⁸⁶

⁸⁵ - <http://greenlight.greentechmedia.com/2009/02/24/bioplastics-close-in-price-to-regular-plastic-and-trader-joes-coconut-packages-1138/> [61]

⁸⁶ - Ebd. [61]

2.8 ÜBERSICHT BIOPOLYMERE





Tab.15 Biopolymere im Überblick

3 BIODERIVATE

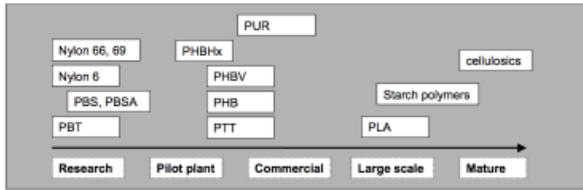


Abb.56 Entwicklungsstadien biobasierter Polymere

Inwieweit Biopolymerwerkstoffe als Kunststoffe Potential für bautechnische Anwendungen besitzen, wird im folgenden Kapitel gezeigt. Wirtschaftliche Bedeutung besitzen sie bisher nur für Anwendungen, die einen gezielten biologischen Abbau erfordern. Als Konstruktionswerkstoffe spielen vor allem hybride und teilweise NAWARO basierte Kunststoffe sowie WPC eine entscheidende Rolle. Man ist allerdings (vor allem in der Automobilindustrie) bereits daran gegangen, vollständig biobasierte Konstruktionswerkstoffe zu entwickeln.

Anhand der folgenden Liste wird ein Überblick über den derzeitigen Entwicklungsstand in Bezug auf biobasierte Polymerwerkstoffe gegeben werden. Der Fokus liegt hierbei auf den weltweit wichtigsten Kunststoffhersteller. Biomedizinische Anwendungen, Holzwerkstoffhersteller sowie Chemikalien- und Additivhersteller werden nur exemplarisch ausgesucht und angeführt. Die Auflistung erfolgt nach chemischer Zusammensetzung sowie alphabetisch nach den Herstellern. Anhand ausgewählter Produkte wird in einem weiteren Abschnitt näher auf die Eigenschaften der Stoffe eingegangen.

3.1 ÜBERSICHT BIOPOLYMERWERKSTOFFE

3.1.1 PETROCHEMISCH BASIERTE BIOPOLYMERE

Bei abbaubaren Polymeren fossilen Ursprungs handelt es sich entweder um Polyester, Polyvinylalkohole oder modifizierte Polyolefine. Zur ersten Gruppe gehören PCL, PGS sowie PBS, PBS- und PBT-Derivate. Neueste Entwicklungen gehen in die Richtung PBS und PBT über biotechnologische Routen fermentativ zu produzieren. Diese sind noch nicht am Markt erhältlich, bieten allerdings interessante Alternativen zu andern Biofermentationskunststoffen wie PLA und PHA.⁸⁷ Häufig werden petrochemisch basierte Biopolymere zur Eigenschaftsverbesserung von Stärkepolymeren eingesetzt (z.B. als wasserbeständige Beschichtung). PET und PBT können durch den Einbau hydrolysensitiver Monomere für eine biologische Abbaubarkeit empfänglich gemacht werden. Außerdem stehen Additive zur Verfügung, die die chemische Struktur von Polyolefine für einen Abbau zugänglich machen können. Beispiele wären TDPA (totally degradable plastic additives) und DCP (degradable and compostable plastics) von EPI environmental technologies.⁸⁸ Ihre Wirkungsweise wurde in den letzten Jahren zwar entscheidend verbessert, doch ist ihr Einsatz noch immer umstritten. Neben diesen gibt es eine ganze Reihe von hybriden Materialien, die unter anderem Recyclete- oder NAWARO-Rohstoffe beinhalten bzw. teilweise auf Basis von NAWARO erzeugt werden, und daher von den Herstellern als „Biomaterialien“ beworben werden.

ABK	HERSTELLER	PRODUKT	KURZBESCHREIBUNG
-----	------------	---------	------------------

3.1.1.1 PCL - POLYCAPROLATONE

Bei PCL handelt es sich um ein biologisch abbaubares thermoplastisches Polymer auf mineralischer Basis. Es ähnelt in der Kristallstruktur PE, besitzt einen Schmelzpunkt von 60°C, eine Reißfestigkeit von 26-42 MPa und eine Reißdehnung von 600-1000%.⁸⁹ Es ist mit vielen gängigen Kunststoffen kompatibel und neben Anwendungen für Verpackungs- und Folienmaterial wird es für verschiedene medizinische Anwendungen verwendet. Caprolactone Monomere werden außerdem zu Zuschlägen in der Kunststoffindustrie verarbeitet.

PCL	Anderson Development Comp., US	Andur 6 APLM	Prepolymer zur Erzeugung hochfester Elastomere
PCL	Daicel Chemical Industries, JP	Celgreen	BAK
PCL	DowPlastics, US	Tone	BAK für Behälter, Folien und medizinische Erzeugnisse
PCL	Durect Corporation, US	Lactel	abbaubare PCL, PGA und PLA Polymere für medizinische Anwendungen
PCL	Perstorp, SE	CAPA	PCL Produktpalette für die Herstellung von PU-Produkten (Klebe-, Schaumstoffe, Beschichtungen) und thermoplastischen, hochkristallinen BAK

3.1.1.2 PVOH - POLYVINYLALKOHOL

PVOH oder auch PVA ist ein wasserlöslicher Polymer, wirkt emulgierend und adhäsiv. Zudem ist er gut schichtbildend und als solches fett-, öl-, lösungsmittelbeständig, besitzt eine hohe Zugfestigkeit und Sauerstoffbarrierewirkung. Neben der Verarbeitung zu thermoplastischen Polymerwerkstoffen wird er vor allem als Adhäsions-, Verdickungsmittel und Beschichtung in verschiedensten Bereichen eingesetzt. Mengenmäßig wichtig sind Papier-, Textil- und Klebstoffherstellung. Als bautechnisch wichtige Anwendungssparte sind PVOH Additive in Keramik-, Beton- und Holzkleberherstellung zu nennen.

PVOH	A.Schulmann Inc, US	AquaSol	medizinische Einwegartikel
PVOH	Celanese, US	Celvol Produkte	PVOH Chemikalien, alle Einsatzzwecke

⁸⁸ - R.Smith (Ed.), *Biodegradable polymers for...*, Woodhead Publishing Limited und CRC Press, Abington bzw. Boca Raton, 2005 S. 316 [51]

⁸⁹ - http://www.inaro.de/Deutsch/Suche_index.htm [62]

PVOH	Chris Craft Industrial Products Inc., US	Mono-Sol	PVOH wasserlösliche Folien für versch. Anwendungen
PVOH	Denka, JP	Poval	PVOH Chemikalien, alle Einsatzzwecke
PVOH	DuPont Inc., US	Elvanol	PVOH Chemikalien, alle Einsatzzwecke
PVOH	Kuraray, JP	verschiedene	PVOH Chemikalien, Produkte: Mowioli, Mowiflex, Exceval, Poval, L-, K-, R-Polymer, alle Einsatzzwecke
PVOH	Nippon Synthetic Chemical Industrie Ltd.	Gohsenol	PVOH Chemikalien, alle Einsatzzwecke
PVOH	Synthomer GmbH, D	Alcotex	PVOH Chemikalien, alle Einsatzzwecke
PVOH	Wacker Chemie AG, D	Polyviol	PVOH Chemikalien, hauptsächlich für Papierindustrie

3.1.1.3 WEITERE BIOPOLYMERE AUF PETROCHEMISCHER BASIS

Hier sind weitere wichtige Biopolymere vorgestellt, die auf Grund fehlender Angaben nicht nach chemischer Zusammensetzung angeführt werden können oder einzelne Vertreter einer Gruppe darstellen. Exemplarisch sind Additive und modifizierte herkömmliche Kunststoffe angeführt.

Additive	BioTec Environmental LLC, US	Bio-Batch	Additiv zur Herstellung von abbaubarem PE, PS, PET, PP, PVC
Additive	EPI Environmental Products Inc., CA	TDPA	„Totally Degradable Plastics Additive“ für herkömmliche Kunststoffe
Additive	Green Club Inc., CA	Addiflex	Additiv für biologischen Abbau von Massenkunststoffen
kA	Heritage Plastics Inc., US	Biotuf976	Polyester Copolymer mit mineralischem Anteil, nicht näher spezifiziert **
kA	Honam Petrochemical Corp., CN	Popelen	nicht näher spezifizierte biologisch abbaubare Polyolefine
PBS	IRe Chemical Ltd., KR	EnPol	spezialisiert auf die Herstellung von PBS, PBAT und PBAS für medizinische Zwecke und umweltfreundliche Verpackungen
PBS	NaturePlast, F	PBE, PBI	BAK auf mineralischer Basis für verschiedenste Anwendungen (Agrarfolien, Verpackungsmittel, Schäume, etc.)
PBS	Showa Highpolymer Co. Ltd., JP	Bionolle	BAK mit OK-Compost Zertifikat, unter anderem für temporäre Baustellenprodukte gedacht
PE	Favorite Plastics, US	Favorite Bi523	PE über Additiv biologisch abbaubar gemacht
PE	Petronas Polymer Tech. Center, MAL	EcoPLUS 105	HDPE über Additiv biologisch abbaubar gemacht
PGA/PLA	Boehringer Ingelheim, D	Resomer	abbaubare Polymere und Monomere auf Milchsäure und Glykolsäurebasis für medizinische Anwendungen
PPC	Novomer Inc., US	NB-180	aus CO ₂ und CO katalytisch erzeugtes biolog. abbaubares Polymer
PTMAT	BASF SE, D	Ecoflex	80% der 8000t Jahresproduktion werden zur Verbesserung (Wasserbeständigkeit) von BAK auf NAWARO Basis eingesetzt, sehr gute mechanische Eigenschaften * **

3.1.2 HYBRIDE WERKSTOFFE

3.1.2.1 PRODUKTE NATÜRLICHER ÖLE

Wie bereits beschrieben können natürliche Öle als Rohstoffe in der Kunststoffherzeugung dienen. Hauptsächlich werden sie zu Polyolen in der Herstellung von Polyurethanprodukten verwendet. Diese werden durch Additionsreaktionen mit Isocyanaten erzeugt, die wiederum aus petrochemischer Produktion stammen. Teilweise NAWARO basierte Polyurethane können vom Eigenschaftsprofil vollständig petrochemisch basierte PUR Produkte ersetzen. Neue Entwicklungen gehen in die Richtung

natürliche Öle als Härter für Epoxy- und Acrylharzsysteme und als PVC-Weichmacher zu nutzen. Einzelne Nylonsorten (PA) könnten gänzlich aus natürlichen Ölen synthetisiert werden.⁹⁰ Diese sind allerdings noch kaum am Markt vertreten. Ein weiteres wichtiges Verfahren zur Herstellung von hybriden Werkstoffen verläuft über (manchmal gentechnische veränderte) Bakterien. Diese Verfahren bieten die Chance petrochemisch basierte Rohstoffe teilweise und in manchen Fällen ganz zu ersetzen. Aus Kostengründen werden diese Verfahren heute allerdings noch nicht im größeren Maßstab angewandt. Näheres im Kapitel Polymere aus Fermentation.

div.	Hobum Oleochemicals GmbH, D	div.	Unternehmen spezialisiert auf die Umwandlung von Pflanzenölen zu oleochemischen Erzeugnissen, Herstellung von PU, PVC Weichmacher, neue Entwicklungen sind Härter für Epoxid- und Acryl-Harzsysteme
PA	Arkema Inc., FR	Rilsan	Polyamide (Nylon 11 und 12) auf Basis von Rizinusöl (Castorsamen) erzeugt, für Extrusion und Spritzgussverarbeitung sowie als Beschichtung und Farbadditiv
PA	BASF SE, D	Ultramid Balance	PA 6 zu 60% aus Sebacinsäure auf Basis von Rizinusöl hergestellt
PA	Gehr Kunststoff Vertriebsgesellschaft mbH	EcoGehr PA	Polyamide 6.10 (60% NAWARO) und 11 (100% NAWARO) auf Basis von Rizinusöl
PUR	BASF SE, D	Lupranol	Polyol auf Basis von NAWARO zur Herstellung von PUR-Weichschäumen
PUR	Cargill Industrial Bio Products	BiOH	Sojaöl-basierte Polyole zur Herstellung von Polyurethan
PUR	Cognis GmbH, D	Sovermol	Polyole auf Basis natürlicher Öle zur Herstellung von PUR
PUR	Demilec Llc., US	Edenol	Fließhilfsmittel auf Basis von NAWARO
PUR	Envirofoam Inc., CA	verschiedene	PUR Dämmschäume, Polyolanteile auf Basis natürl. Öle
PUR	Envirofoam Inc., CA	Envirofoeam	PUR Dämmschaum auf Basis von Sojaöl und Recyclingkunststoffen
PUR	Icynene Inc., US	Icynene	PUR Dämmschaum, Polyolanteile auf Rizinusöl-Basis
PUR	Metzeler Schaum GmbH, D	Rubex Nawaro	Biobasierter PUR Schaum mit Polyolanteil aus Sonnenblumenöl für Matratzen
PUR	Textile Technologies Inc., US	BioCel	PUR Produkte auf Sojaölbasis für Teppichträgerunterlagen
PUR	Urethane Soy Systems Company	Soyol	PUR mit Polyolanteil aus Sojaöl
		SoyMatrix	
		SoyOyl	
		SoyTherm	Dämmschaum für die Bauindustrie
TPE	Arkema Inc., FR	Pebax RNew	thermoplastischer Elastomer als NAWARO-PA (Rilsan) und Polyether Blockcopolymer
TPU	Merquinsa, ES	Pearlthane	thermoplastische Polyurethan Elastomere TPE-U mit etwa 44% NAWARO Anteil
		Pearlbond	
TPU	Polyone Corp., US	OnFlex BIO	TPE-U mit 20% NAWARO Anteil unter Verwendung von Pearlthane, unter dem Namen Polyone Sustainable Solutions werden von Polyone eine Reihe ökologischer Additive und Chemikalien angeboten

3.1.2.2 NAWARO-GEFÜLLTE POLYMERE, NFK & WPC

Bioverstärkte Werkstoffe spielen heute bereits eine wichtige Rolle auf dem Markt für Konstruktionswerkstoffe. Neben ökologischen Vorteilen (gegenüber reinen Kunststoffen) bieten sie, wie bereits angesprochen, den Vorteil einer Dichtereduzierung (geringeres Gewicht) gegenüber glasfaserverstärkten Kunststoffen. Neben den beschriebenen Naturfasern kommen in letzter Zeit immer häufiger sog. Wood-Plastic Composites zum Einsatz. Dabei werden herkömmliche Kunststoffe mit Holzmehl, -schnitzel oder -fasern gefüllt. Neben den erwähnten Einsparungen zeigen sich durchaus verbesserte mechanische Eigenschaften gegen-

über ungefüllten Kunststoffen. Gegenüber Holz besitzen sie eine vollständig freie Formbarkeit und bessere Feuchtigkeitsbeständigkeit. Der Naturfaseranteil in WPC kann bis zu 90% betragen. Übliche Matrixwerkstoffe sind PP (in Europa) sowie recycletes PVC und PE (in Nordamerika und China).⁹¹ Hersteller herkömmlicher Holzwerkstoffe sind nicht angeführt.

LLDPE	MCG Biocomposites LLC, US	MCGB	entwickelt Maiskolbenmehl als Kunststoffzuschlag für herkömmliche Kunststoffe, MCGB LLDPER 2008 besitzt einen Füllstoffanteil von 20%
PLA	Cereplast Inc., US	Cereplast	herkömmliche Kunststoffe (PP) mit bis zu 50% PLA Anteil
NFK	FKur Kunststoff GmbH	Fibrolon	NFK mit bis zu 40% Faseranteil
NFK	JER Envirotech, CA		NFK mit Faseranteil bis 60%
NFK	Kareline Oy Ltd., FI	Kareline	naturfaserverstärktes PP, ABS, PS, POM und PLA
NFK	Northwood Plastics, US	natural fibre filled XR sheet	naturfaserverstärkte Kunststoffe
UFC	Perstorp Compounds, SE	Perstorp Urea	Harnstoff-Formaldehyd Harz mit Cellulosebasierter Füllung
WPC	Futuresoft Technologies Co. Ltd., CN		verschiedene WPC Systeme
WPC	Kleine Wood & Fibre GmbH., D	Flüssigholz	WPC Profile und Platten
WPC	Kosche GmbH, D	Kovalec	verschiedene WPC Profile
WPC	Novo Tech GmbH, D	Megawood	WPC Profile
WPC	Otto Wolff Kunststoffe GmbH, D	TimberStar	WPC Terrassenprofile
WPC	Pinufin GmbH., D	Pinuform	WPC Terrassensystem
WPC	Rehau Gruppe Ag., CH	div.	zählt zu den größten Polymerverarbeitern weltweit (Bau, Automobile, Industrie), entwickelt WPC Systeme
WPC	Tech Wood BV, NL	TechWood	WPC Profile
WPC	UPM Kymmene, FI	div.	Holzwerkstoff und WPC Hersteller
WPC	Werzalit GmbH, D	div.	WPC Bauprodukte

3.1.3 NAWARO BASIERTE POLYMERE

3.1.3.1 STÄRKEPRODUKTE

Stärkebasierte Kunststoffe spielen vor allem als BAK in der Herstellung von Verpackungsmitteln eine große Rolle und werden als solche seit den 1980er Jahren entwickelt. Etwa 70% aller BAK können ihnen zugerechnet werden. Bei Stärke handelt es sich um einen günstigen und einfach zu verarbeitenden Rohstoff. Die Stärkegranulate eignen sich für Spritzguss-, Tiefziehverfahren sowie zur der Herstellung von Folien- und Schaumstoffen. Übliche natürliche Additive sind Glycerol und Sorbitol. Stärkepolymere zeigen sich aber in hohem Maße hydrophil und verlieren unter Einwirkung von Feuchtigkeit schnell ihre ohnehin im Vergleich zu herkömmlichen Kunststoffen schlechten mechanischen Eigenschaften. Stärkepolymere werden daher meist nur im Blend mit eigenschaftsverbessernden (Bio-)Polymeren verwendet. Üblich sind PCL, PVOH und PHA. Preise für Stärkepolymere reichen von etwa €1 - 3 pro kg. Der Preis hängt dabei weniger vom Rohstoffpreis, als von der Art der Modifizierung der Stärke ab. Im Vergleich zu PE können 25 - 75% Energieeinsparungen und 20 - 80% geringere Treibhausgasemissionen bei ihrer Herstellung erzielt werden.⁹² Große europäische Hersteller sind Novamont und Rodenburg.

TPS	Biograde Company Group Ltd., AU	Biograde	BAK auf Stärkebasis, enthält synthetische Biopolymere zur Werkstoffverbesserung * **
TPS	BIOP Biopolymer Technologies AG, D	Biopar	TPS im Blend mit mineralischen Biopolymeren
TPS	Biotec GmbH & Co. KG, D	Bioplast	BAK auf TPS-Basis, nicht näher spezifiziert
TPS	Earthshell, US	EarthShell	Einweggeschirr auf Stärkebasis, Cellulose und Kalksteinzuschläge
TPS	EBM Biodegradable Materials Ltd, HK	Enbiomat	BAK für Verpackungs- und Konsumgüter * **
TPS	Ever Corn Inc., JP	EverCorn	Verpackungsmaterialien auf Stärkebasis

TPS	Greenlight Products Ltd., UK	OpusBio EcoFlo BioCell	verschiedene stärkebasierte Verpackungsmaterialien OpusBio und EcoFlo stärkebasiert, BioCell ohne nähere Angaben
TPS	NNZ, UK	Ökopack	BAK auf Stärkebasis *
TPS	Novamont S.p.A.,IT	Mater-Bi	führendes europäische Unternehmen in der Entwicklung von stärkebasierten Materialien, hauptsächlich BAK für Verpackungsmittel, entwickelt auch Zuschläge für Good-year Reifen
TPS	Plantic Technologies Ltd., AU	Plantic	BAK auf Stärkebasis aus hochamyloser Maisstärke aus nicht gentechnisch veränderter Produktion, k.A. über Copolymere / Blends *
TPS	Potatopak NZ Ltd., NZ	Potato	stärkebasiertes Einweggeschirr und Verpackungsmaterial
TPS	Rodenburg Biopolymers R.V., NL	Solanyl	BAK auf Basis von Kartoffelstärke, nach Tonnage (40.000t/J) größter Hersteller
TPS	Shanghai Disoxidation Macromolecules Co. Ltd., CN	BSR	BAK auf Stärkebasis, keine näheren Angaben über Zusammensetzung
TPS	Starchtec, US	Mighty I	geschäumte TPS-Verpackungschips
TPS	Storopack GmbH, D	LooseFill	Verpackungschips auf Stärkebasis
TPS	Vegeplast S.A.S, FR	Vegemat	transformierte Getreide, hauptsächlich aus Stärke, enthält aber auch Proteine, Lipide und nicht näher spezifizierte natürliche Additive
TPS	Ventura AG, D	Floralat	Stärkeacetat, naturfaserverstärkt, für temporäre Anwendungen
TPS	VTT Technical Research Center, FI	COHPOL	Research Zentrum mit Teilschwerpunkt auf Modifikation und Funktionalisierung natürlicher Polymere, patentierter Stärkepolymer COHPOL

3.1.3.2 CELLULOSE- & LIGNINPRODUKTE

Cellulosekunststoffe zählen zu den ältesten Kunststoffen und ihre technische Entwicklung gilt als weitgehend abgeschlossen. Bekannteste Produkte sind Cellophan, eine durchsichtige Verpackungsfolie, und Viskose, zwei auf dem gleichen Verfahren basierende Arten regenerierter Cellulose. Diese ist zwar biologisch abbaubar, kommt aber zumeist beschichtet und folglich nicht biologisch abbaubar in den Handel. Über eine chemische Modifikation der Hydroxylgruppen der Cellulose durch eine Behandlung mit Säuren und Säureanhydrid können weitere wichtige Produkte wie CA, CAB, CAP und CP hergestellt werden. Mit steigender Zahl substituierter Hydroxylgruppen verringert sich die biologische Abbaubarkeit der auf diese Art hergestellten Kunststoffe. Derartige Cellulosederivate besitzen gute mechanische Eigenschaften, sind kristallklar, widerstandsfähig, antistatisch, kratzfest und wasserfest (nicht witterungsbeständig). Auf Grund der aufwendigen Herstellung sind sie aber auch recht teuer und nur für kleinere Bauteile und Anwendungen in Verwendung. Zwar werden weiterhin neue Verfahren zur Celluloseverarbeitung entwickelt (Lyocell, versch. Beschichtungssysteme) doch stagniert die Cellulose-Kunststoff und -Fasererzeugung im Gegensatz zur generellen Kunststoffproduktion. Für die Zukunft wird noch eine weitere Abnahme an Marktanteilen prognostiziert. Neueste Technologien zielen darauf ab, Cellulose aus bakterieller Fermentation herzustellen.

Auf Grund seiner komplexen Zusammensetzung ist Lignin im Gegensatz dazu ein weit weniger gebräuchlicher Rohstoff zur Kunststoffherzeugung. Als einziger thermoplastischer Lignin-Werkstoff kann Arboform von der Firma Tecnaro genannt werden. Lignin- wie Cellulosechemikalien spielen eine wichtige Rolle als Zuschläge in der Baustoffherzeugung.

CA	Celanese	verschiedene	Chemikalienhersteller, unter anderem CA
CA	Clarifoil	Clarifoil	Zellulosediacetatfolien, Teil der Celanese Corp.
CA	Eastman Chemical Company, US	Chromspun Estron Tenite Acetat	CA Faser für Textilprodukte CA Faser CA, CAB und CAP Produkte

CA	Innovia Films Ltd., UK	Cellophan Cellotherm Natureflex * ** Startwist	CA Folien, hauptsächlich für Verpackungen, auch als Klebebänder, halbdurchlässige Membran in Batterien und als Trennmittel in Glasfaser- und Gummiproduktion, teilw. speziell auf Abbaubarkeit programmiert
CA	La/Es S.p.A.	Cellolux	CA Produkte verschiedener Dauerhaftigkeit
CA	LOFO High Tech Film GmbH, D	Tacphan	Cellulose Triacetat Folien für verschiedene Anwendungen
CA	Mazzucchelli, IT	Setilithe Plastiloid Bioceta	verschiedene Cellulosekunststoffe
CA	Next Speciality Resins, US	Next Signature	CA, CAB und CAP Hersteller
CA	Rhodia SA, FR	Rhodia Acetol	CA für verschiedenste Zwecke (Zigarrettenfilter, Luftfilter, Rhodia Filter Tow, BAK, Autoteile, Beschichtungen)
CA	Rotuba Extruders Inc, Us	Auracell Naturacell	CA, CAP und CAB Produzent, hauptsächlich für Konsumgüter
CA	SKChemicals, KR	SkyAce	CA Faser- und Pulverhersteller
CAP/CAB	Albis Plastic GmbH, D	Cellidor	
CAP/CAB	Flex-O-Glass Inc., US	Flex-O-Film	CAP und CAB Folien und Granulate
div.	Dow Wolff Cellulosics	verschiedene	Hersteller von Cellulosechemikalien, Kooperation von Dow Chemicals und Wolff Walsrode
div.	Lenzing	verschiedene	Chemiekonzern und Cellulosehersteller /-verarbeiter, großer Cellulosefaserhersteller (Viscose)
kA	FKur Kunststoff GmbH	Biograde	Celluloseblend, BAK *
kA	Omodo GmbH, D	Zelfo Zeoform Hempstone	Spezialmaterial, rein aus Cellulosefasern aufgebaut und ohne chemische Zusätze als Granulat zum Pressformen, frühere Produktgeneration enthielt mineralische Bindemittel wie Kreide
kA	Grenidea Technologies Pte Ltd., SG	AgroResin	BAK Verpackungsmaterialien auf Lignocellulose-Basis *
Lignin	Borregaard Lignotech	verschiedene	Ligninchemikalien
Lignin	Tecnaro, D	Arboform	naturfaserverstärkter thermoplastischer Ligninwerkstoff
VF	Dynos GmbH, D	Dynos	Vulkanfiber auf Basis von Cellulose
VF	Vulkanfiber Fabrik Ernst Krüger, D	Hornex	Vulkanfiber auf Basis von Cellulose

3.1.3.3 POLYMERE AUS FERMENTATION

3.1.3.3.1 PHA

PHA sind durch bakterielle Fermentation direkt aus Bakterien gewonnene Polyester. Wichtigster Vertreter ist momentan PHB. Dieses besitzt gute thermoplastische Eigenschaften und kann wie gängige Kunststoffe verarbeitet oder zu Fasern gesponnen werden. Im Gegensatz zu den meisten andern Biopolymeren ist es wasserunlöslich und nicht für hydrolytischen Abbau zugänglich. Des weiteren besitzt es eine gute Lösungsmittel-, UV-Beständigkeit und hohe Sauerstoffbarrierewirkung, zeigt sich jedoch nur schwach beständig gegen Säuren und Laugen. Auf Grund hoher Rohmaterialkosten und geringer Produktionskapazitäten liegt der Preis für PHA noch sehr hoch. Auswirkungen auf die Umwelt (Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen) von PHA werden kontrovers diskutiert. Während ältere Studien je nach Herstellungs- und Abfallverwertungsverfahren zum Teil Werte weit über jenen petrochemischer Polymere zeigen, weist ihnen eine aktuellere ausführlichere Studie aus 2003 durchaus großes Einsparungspotential aus.

PHA	Biocycle, BR	Biocycle	PHB Kunststoffe für abbaubare Verpackungsmaterialien und Gebrauchsgegenstände **
PHA	Biomer, D	Biomer	PHB Kunststoffe für allgemeine Anwendung
PHA	Goodfellow, UK	PHB	für hochpreisige Spezialanwendungen (Medizin, Biologie)

PHA	Mitsubishi Gas Chemical Inc., JP	BioGreen	BAK auf Basis von PHB
PHA	NaturePlast, F	PHE, PHI	verschiedene Konsumgüter
PHA	Polyfea, D	Caprowax	BAK auf NAWARO Basis, Gemisch aus aliphatischen Polyester (vermutlich PHA) und Lipiden für Verpackungs- und Konsumgüter *
PHA	Procter & Gamble Corp., US	Nodax	hat unter dem Namen Nodax PHA entwickelt, arbeitet seit 2005 mit der Kaneka Corp. JP an Kommerzialisierung
PHA	Tianan, CN	Enmat	PHBV Produkte für BAK oder im Blend für dauerhafte Produkte
PHA	Telles (Metabolix und ADM), US	Mirel	nicht näher spezifizierter BAK (vermutl. PHB) * ** Joint Venture von Archer Daniels Midland Company und Metabolix

3.1.3.3.2 PLA

PLA wurde zum ersten Mal vor 150 Jahren synthetisiert und wird heute aus durch Fermentation erzeugter Milchsäure polymerisiert. Dabei sind zwei Verfahren bekannt, die zur Herstellung von Polylactid bzw. Polylactic acid führen und beide als PLA bezeichnet werden. PLA besitzt ausgezeichnete mechanische Eigenschaften und ist biologisch abbaubar. Härte, Steifheit, Schlagzähigkeit und Elastizität sind ähnlich wie bei PET. In Bezug auf Rückfederungskraft besitzt es allerdings einzigartige Eigenschaften, eher vergleichbar mit Papier. PLA kann in seiner Herstellung UV-Schutz, Antistatika, Formtrenn-, Farbstoffe oder Additive gegen Dampfdurchlässigkeit erfordern. Diese sind für den Werkstoff zum Teil noch nicht gänzlich fertig entwickelt. Hauptsächlich wird PLA im Verpackungsmittelsektor eingesetzt, Anwendungen für elektronische Geräte und im Automobilsektor wurden allerdings bereits untersucht.

Blend	BASF SE, D	Ecovio	BAK Blend aus PLA und Ecoflex *
ka	Mazda Motor Corp., JP	Bioplastics	im Forschungsbereich Mazda Bioplastics wurden pflanzenbasierte Biokunststoffe für einen Einsatz im Automobilbau entwickelt
PLA	Cereplast Inc., US	Cereplast	BAK auf PLA Basis * **
PLA	Durect Corporation, US	Lactel	abbaubare PCL, PGA und PLA Polymere für medizinische Anwendungen
PLA	FKur Kunststoff GmbH	Bio-Flex	BAK auf PLA Basis *
PLA	Hycail b.v., NL	Hycail	BAK auf PLA Basis **
PLA	Galactic, BE		Hersteller von PLA und PLA-Derivaten für Pharma-, Lebensmittel-, Kosmetik- und technische Anwendungen
PLA	Gehr Kunststoff Vertriebsgesellschaft mbH	EcoGehr PLA	PLA Hersteller
PLA	Jackdaw Polymers, FR	Jackdaw PLA	PLA Hersteller
PLA	Mitsubishi Chemicals Inc., JP	GS PLA	PLA Werkstoff für Automobilbau
PLA	Mitsubishi Plastics Inc., JP	Ecoloju	PLA Verpackungsmaterial
PLA	Mitsui Chemicals Inc., JP	Lacea	PLA Folien- und Verpackungsmaterialien
PLA	Modiplast, IL	verschiedene	versch. BAK für Lebensmittelverpackungen
PLA	NaturePlast, F	PLE, PLI	BAK Kunststoff für verschiedene Anwendungen
PLA	NatureWorks LLC, US	Ingeo	erster zu 100% auf NAWARO basierter PLA-Massenkunststoff, auch als Faserprodukt erhältlich * **
PLA	Pacovis, CH	Naturesse	PLA Verpackungsmaterialien *
PLA	Polyfilm, FR	Biophan	PLA Folien, frühere Marke von Treofan
PLA	Purac, NL		Hersteller von PLA und PLA-Derivaten für Pharma-, Lebensmittel-, Kosmetik- und technische Anwendungen
PLA	Pyramid Bioplastics Guben GmbH, D	ka	erste industrielle Herstellungsanlage von PLA in Europa,

			wird momentan errichtet
PLA	Redpod, CN		div. PLA-BAK Produkte
PLA	R.O.J. Jongboom Holding, NL	Bioparls	BAK aus modifiziertem PLA * **
PLA	Toyota, JP	Eco Plastic	entwickelt Ökomaterialien für Autoteile, Naturfaser verstärkt
PLA	Unitika Plastics Division, JP	Terramac	PLA Massenkunststoff
WPC	Karelina Oy Ltd., FI	Karelina	naturfaserverstärktes PLA **

3.1.3.3 BIOTECHNISCH PRODUZIERTE POLYMERE

Neben den aufgeführten Möglichkeiten existieren noch eine Vielzahl weiterer Arten Rohstoffe zur Kunststoffherstellung aus Fermentation zu gewinnen. So lassen sich 1,3 Propandiol (PDO) und Bernsteinsäure fermentativ herstellen. PDO wird mit Terephthalsäure oder Dimethylterephthalat zu PTT polymerisiert. Dieses vereint in seinen Eigenschaften Stabilität, Festigkeit und Hitzebeständigkeit von PET mit der guten Verarbeitbarkeit von PBT und besitzt Potential als Faser- und Konstruktionswerkstoff. Im Moment wird es lediglich von Shell (Corterra) und DuPont erzeugt, wobei letztere den biotechnologischen Weg über gentechnisch veränderte Bakterien zur Anwendung bringen. Bernsteinsäure bietet das Potential zu 1,4 Butandiol (BDO) verarbeitet zu werden. BDO dient mit Dimethylterephthalat zur Herstellung von PBT. Bei PBT handelt es sich um einen bereits etablierten Massenkunststoff, der im Gemisch zu Hochleistungswerkstoffen für den Transportbereich, für Elektrogeräte und Installationen Einsatz findet. Weiters kann Bernsteinsäure und BDO zum BAK PBS synthetisiert werden. Eine Markteinführung der beiden Materialien wird im wesentlichen von ihrer Preisentwicklung abhängen. Nach Angaben von Mitsubishi könnte biobasiertes PBS günstiger als PLA produziert werden, im Moment geschieht dies allerdings noch nicht. Außerdem sind biotechnologische Routen über Fermentation zur Erzeugung von PA 6 und PA 66 bekannt, sie befinden sich allerdings noch im Anfangsstadium ihrer Entwicklung und sind sehr teuer.⁹³

PTT	DuPont, US	Sorona Hytrel	Polytrimethylen terephthalate, Hochleistungsthermoplaste aus 1,3 Propandiol (aus Fermentation) und Terephthalsäuren oder Dimethylterephthalat polymerisiert
PDO	DuPont, US	Cerenol Susterra Zemea Selar	mais- und sojabasierte Polyole für verschiedenste Anwendungen Soja-, Palmöl basierter (30%) Polymer für Kunststoffe mit sauerstoffdurchlässigen Eigenschaften

3.1.3.4 PROTEINPOLYMERE

Proteine besitzen für derart vielen Anwendungen große Bedeutung, dass ihr Einsatzspektrum hier nicht vollständig wiedergegeben werden kann. Sie werden vor allem für medizinische Zwecke erforscht. Enzymkatalytische Prozesse oder Proteine als Hilfsstoffe spielen in den verschiedensten Industriezweigen eine wichtige Rolle. Als Konstruktionsstoffe besitzen sie nur eine geringe Bedeutung. Stellvertretend sind hier die in Kap. 2 erwähnten Produkte noch einmal zusammengestellt.

Soja	DuPont, US	Pro-Cote	Sojapolymer als Klebstoff, Binde- oder Verdickungsmittel
Muschel	BD Bioscience, US	Cell Tak	Beispiel für einen Gewebekleber (medizinische Anwendung) auf Basis von Muschelproteinen
Casein	Elotex AG, CH	FL-Reihe	Firma für Baumaterial-Additive, unter anderem caseinhaltige Floor-levelling Systeme
Casein	Hersteller, IT, D	div.	es gibt noch einige wenige Hersteller von Galalith Knöpfen (Casein-Formaldehyd Harz) wie Boart, Silga und Knopf und Knopf
Seide	Nexia Biotechnologies Ltd., CA	BioSteel	Spinnenseide aus Ziegenmilch transgener Ziegen

3.1.3.5 COMPOSITES

Diese sind ähnlich wie WPCs aufgebaut, besitzen aber anstatt einer petrochemisch basierten, eine biobasierte Kunststoffmatrix, die mit Holzmehl gefüllt oder mit Fasern verstärkt wird. Neben Anwendungen als BAK typische Verpackungsmittel, bieten sie auch ein gewisses Potential als biobasierte Konstruktionswerkstoffe. Diese befinden sich zumeist noch im Anfangsstadium ihrer Entwicklung und beschränken sich auf einige wenige Vorreiterprojekte. Der von Mitsubishi entwickelte GS PLA kann zu dieser Gruppe gerechnet werden.

BioNFK	Bio Pack, D	verschiedene	Entwicklung, Produktion und Vertrieb von Produkten aus NAWARO
BioNFK	Fasal Wood KEG, A	Fasal	thermoplastischer Werkstoff aus Holz, Mais und Natur- oder synthetischen Harzen
BioNFK	FKur Kunststoff GmbH	Fibrolon	NFK mit bis zu 40% Faseranteil
BioNFK	Freitec Kunststoffe GmbH	Growie	entwickelt Biokunststoffprodukte
BioNFK	Gehr Kunststoff Vertriebsgesellschaft mbH	EcoGehr C-L	faserverstärkter Cellulose-Lignin-Fettsäurewerkstoff
BioNFK	Kareline Oy Ltd., FI	Kareline	naturfaserverstärktes PLA
BioNFK	Napac AG, CH	Napac Granulat	nach Herstellerangaben vollständig auf NAWARO basiertes Granulat zur Extrusionsverarbeitung, 70% Naturfasern mit natürlichen Bindern, für Verpackungsmaterialien
BioNFK	Treeplast	Treeplast	thermoplastisches Holzprodukt mit MDF ähnlichen Eigenschaften

* EN13432 zertifiziert

** ASTM D 6400 zertifiziert

3.2 AUSGEWÄHLTE PRODUKTE

Anhand einiger ausgewählter Produkte werden nun die Eigenschaften der erwähnten Werkstoffklassen etwas ausführlicher illustriert. Die Auswahl erfolgt mit Augenmerk auf Dauerhaftigkeit und potentielle Anwendung im Bauwesen. In Bezug auf Konstruktionswerkstoffe konnten sich bisher vor allem NFK und WPC Produkte auf dem Markt behaupten, aber auch vollständig biobasierten Verbunden wird ein hohes Potential als Konstruktionswerkstoff zugesprochen. Diese reichen in ihren Eigenschaften bereits an GFK, Abstriche müssen nur in Bereichen mit extremen Umweltbedingungen gemacht werden.⁹⁴

3.2.1 PUR AUS NATÜRLICHEM ÖL - SOY THERM

Das Unternehmen Urethane Soy Systems entwickelt sojaölbasierte Polyole zur Herstellung von PUR. Übliche Einsatzgebiete von PUR sind Lacke, Klebstoffe, Fußböden, Schläuche, Dichtungen, Vergussmassen, Schuhsohlen, Matratzen, Stoßstangen und Innenteile von Autos sowie Booten und vor allem Schaumstoffprodukte für den Möbelbau im Automobil- und Baugewerbe. Gemessen nach Marktanteil spielen die letzten drei mengenmäßig die wichtigste Rolle.

Die Urethane Soy Systems produziert unter dem Namen Soytherm für bautechnische Anwendungen maßgeschneiderte PUR Sprühdämmstoffsysteme. Isocyanat und Harzanteile werden hierfür im Verhältnis 1 : 1 gemischt und bei einer Verarbeitungstemperatur zwischen 48 - 74°C und unter einem Druck von 6,2 - 8,9 MPa mit Wasser als Treibmittel aufgeschäumt.⁹⁵ Nach dem Aufspritzen auf die Oberfläche expandiert die Mixtur auf ein Vielfaches ihres Ausgangsvolumen und es entsteht ein steifer, offenzelliger Schaum. Das Material haftet auf fast allen Oberflächen und deckt Fugen, Sprünge und Unebenheiten ab. Überschüssiges Material wird nach dem Auftragen weggeschnitten. Im Endeffekt, je nach Produkt, kann der Schaum eine Wärmeleitfähigkeit von 0,039 W/mK 0,033 W/mK oder 0,027 W/mK besitzen. Nach ASTM E84 wird das Soytherm 50 mit der geringeren Wärmeleitfähigkeit in Bezug auf Flammenausbreitung und Rauchentwicklung der besten Brandschutzklasse (class 1) zugeordnet und die anderen beiden Produkte (Soytherm 100 und 170) der Klasse 2.⁹⁶ In der Regel besitzen Polyurethane keine gesundheitsschädlichen Eigenschaften nach ihrer Verarbeitung und laut Soy Systems werden vom Produkt auch keine flüchtigen organischen Verbindungen emittiert. Im Umgang mit den zur Herstellung notwendigen Rohstoffen ist allerdings Vorsicht geboten, so stehen Isocyanate im Verdacht Allergien und Krebs zu verursachen. Sicherheitshinweise für die Verarbeitung sind daher zu beachten. Aktuelle Preise für Soytherm konnten nicht ermittelt werden, üblicherweise liegen Sprühdämmmaterialien aber weit über dem Preis von üblichen Faserdämmstoffen.

PUR Schaumstoffe sind in den USA übliche Dämmsysteme in der Baubranche und werden großflächig verwendet. Teilweise pflanzenölbasierte Systeme sind eine Antwort auf die Nachfrage nach ökologischen Produkten und Hersteller werben mit einer CO₂-Reduktion durch die Sojaproduktion. Im Eigenschaftsprofil gleichen sie herkömmlichen PUR Produkten und könnten diese daher auch vollständig ersetzen. Nach europäischen Maßstäben würden derartige Schäume allerdings nicht unbedingt als „Bio“ bezeichnet werden.



Abb.57 Dachschrägenanwendung Soytherm



Abb.58 Auftragen von PUR Spritzschaum
und Dachschrägenanwendung

Produkt Icyrene

95 - Produktdatenblätter Soytherm 50, 100 und 170 via <http://www.soyol.com/insul.htm> [63]

96 - Ebd. [63]



Abb.59 Polyamid 11 - Rilsan
 (v.o.n.u.) Wunderbaum und Rizinussamen
 Spiralschlauch für Druckluft
 Tourenschuh, Materialkombination Pebax und Rilsan
 Gasleitung

3.2.2 PA AUS NATÜRLICHEM ÖL - RILSAN

Bei Rilsan handelt es sich um einen Polyamidwerkstoff (PA 11, PA 12), der sich seit Jahrzehnten auf dem Markt befindet und aus Rizinusöl hergestellt wird, jedoch nie als biobasiert aufgefasst wurde. Über die Sebacinsäure, die aus dem Pflanzenöl gewonnen wird, kann der Kunststoff hergestellt werden. Bei den Polyamiden handelt es sich um technisch hochwertige, hochpreisige Kunststoffe, die in über 100 verschiedenen Güteklassen von Arkema hergestellt werden. Neben Anwendungen im Automobilbau, in der Kabelerzeugung, Industrie- und Weltraumtechnologie wird PA11 und 12 als Verpackungsmittel in der Medizin und zur Herstellung von Sportartikeln verwendet. Arkema stellt auch einen teilweise NAWARO basierten Hochleistungskunststoff Pebax Rnew her, in dem Rilsan als Copolymer dient. Sebacinsäure wird als Reaktionspartner auch in der Herstellung von PA 6.10 verwendet.

Die PAs sind teilkristalline Thermoplaste mit hoher thermischer Stabilität. Sie besitzen eine Dauergebrauchstemperatur von bis zu 100°C, halten zeitweilige Temperaturspitzen bis 150°C aus und behalten ihre Eigenschaften auch in sehr kühler Umgebung bei (bis -40°C). PA 11 und 12 sind sehr widerstandsfähige Hochleistungspolymere und besitzen sehr hohe Kerbschlagzähigkeit, hohe Abriebfestigkeit und nehmen kaum Feuchtigkeit auf, weshalb sie sich auch in feuchten Einsatzgebieten bestens anwenden lassen. PA 11 und 12 lassen sich in vielfältiger Weise modifizieren und so liegt der Biegemodul zwischen 150 und 1200 MPa (glasfaserverstärkt bis 9700 MPa). Als Hochleistungswerkstoff besitzen sie außerdem eine geringe Dichte von nur 1,03 g/cm³. Der Werkstoff wird wetterfest erzeugt. In Bezug auf Dauerfestigkeit und Dimensionsstabilität (plastische Verformung) kann man auf über lange Zeit gesammelte Erfahrungswerte zurückgreifen. Die PAs besitzen außerdem ausgezeichnete chemische Widerstandsfähigkeit und Barrierewirkung. Rilsan kann einfach und auf den meisten üblichen Verarbeitungsmaschinen (Extruder, Blasextrusion, Spritzguss, etc.) verarbeitet werden.⁹⁷

3.2.3 LIGNINBASIERT - ARBOFORM

WPC Produkte sind als Konstruktionswerkstoffe bereits weitverbreitet im Einsatz und finden auch im Bauwesen häufig Anwendung. Gegenüber reinen Kunststoffprodukten besitzen sie verbesserte mechanische Eigenschaften und gegenüber reinen Holzmaterialien besitzen sie den Vorteil frei formbar, form- und feuchtigkeitsbeständiger zu sein. Marktführend sind sie im Bauwesen als Terrassendielen. In Deutschland gibt es seit 2007 vom Verband der Deutschen Holzwerkstoffindustrie ein Qualitätssiegel für WPCs. Neben diesen gebräuchlichen Werkstoffen gewinnen auch vollständig biobasierte faserverstärkte Kunststoffe immer mehr an Bedeutung. Gegenüber herkömmlichen WPC Produkten besitzen sie allerdings zumeist noch eine schlechtere Feuchtigkeitsbeständigkeit. Eine ähnliche Produktgruppe sind sog. Flüssigholzprodukte. Dabei handelt es sich um thermoplastisch formbare Cellulose oder Ligninprodukte. Ein Beispiel wäre der Werkstoff Arboform von Tecnar. Es handelt sich dabei um einen isotropen, naturfaserverstärkten, thermoplastischen Werkstoff auf Basis von Lignin, der für verschiedenste Bereiche wie Autoinnenverkleidungen, Gehäuse, Bauplatten und Furnierholzträger, Gebrauchsgegenstände, Spielwaren, Möbel, Schmuck und ähnliches verwendet werden kann. Umgangssprachlich wird der Werkstoff auch als flüssiges Holz bezeichnet. Er besitzt eine holzähnliche Haptik und ist auch biologisch abbaubar. Der Werkstoff besitzt einen für „Kunststoffe“ relativ hohen E-Modul von 1000 - 5000 MPa und einen geringen linearen Ausdehnungskoeffizienten von $18-50 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Arboform besitzt eine Dichte von etwa $1,3 \text{ g/cm}^3$ und lässt sich auch schäumen. Zwei Weiterentwicklungen sind das WPC Arbofill und seine biobasierte Variante Arboblend.⁹⁸



Abb.60 Arboform Produkte

3.2.4 BIOCONCEPT CAR

Als ein Vorzeigeprojekt in der Anwendung von biobasierten Konstruktionswerkstoffen ist das Bioconcept Car zu nennen. Der 2006 entwickelte und nach dem Mustang GT RTD produzierte Rennwagen fährt mit Biodiesel und besitzt eine Karosserie aus Bioverbundwerkstoffen. Diese wurde in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickelt und besitzt ein um 40% geringeres Gewicht als ein Fahrzeug aus vergleichbaren Serienbauteilen. Beschichtet wurde sie mit einem Lack auf Wasserbasis von BASF. Das Fahrzeug wird vom FourMotors Rennteam eingesetzt und von Smudo (Fantastische Vier) in der BF-Goodrich Langstreckenmeisterschaft gefahren.⁹⁹



Abb.61 (v.o.n.u.) Harzinjektion, Kotflügel, BioConcept Car mit Rennteam

⁹⁸ - Werkstoffkennndaten: <http://www.tecnaro.de/deutsch/avsk.htm> [65]

⁹⁹ - Kompetenznetz RIKO - Realisierung innovativer Konstruktionsstoffe aus NAWARO - http://www.riko.net/html/presse/presse_34.php3 [66]



Abb.62 Zelfo Produkte
(v.o.n.u.) Lautsprecher, 2,5mm Span-
plattenbeschichtung, Gitarre (Mada Guitars)



Abb.63 pPF-Harz gebundene Holzwerkstoffe

3.2.5 CELLULOSEBASIERT - ZELFO / ZEOFORM

Ein relativ neuer Cellulosewerkstoff ist Zeoform, der in Australien von Zeo und als Zelfo von Omodo in Europa vertrieben wird. Der Werkstoff basiert auf einem Patent, das in den 90er Jahren in Österreich entwickelt wurde und bei dem Cellulosematerialien durch reine mechanische Behandlung ohne Zusatz von Klebe- oder Bindemittel zu einem natürlichen Werkstoff verarbeitet werden. Frühere Produkteversionen enthielten zum Teil noch mineralische Binder, das aktuelle Granulat besteht aber zu 100% aus Cellulosefasern, ist biologisch abbaubar und kann aus Pflanzen-, Stoff- oder Papierressourcen (Abfall) bezogen werden. Zelfo existiert im Moment in zwei Versionen, eine davon auf Basis von Hanf-Cellulose und als „Natural Plant“ Version, bei der hauptsächlich Hanf und Flachs verarbeitet werden. Der Werkstoff besitzt gute mechanische Eigenschaften, einen E-Modul von bis zu 6550 MPa, Biegefestigkeit bis 95 MPa bei einer Dichte von 1,5 g/cm³ und Brandbeständigkeit bis 140°C.¹⁰⁰ Zelfo kann nicht den klassischen Thermo- oder Duroplasten zugeordnet werden und stellt im Prinzip eine vollkommene Neuentwicklung dar. Auf Grund großer Schrumpfungen und langer Standzeiten erfordert er eigene Produktions- und Verarbeitungsprozesse und kann nicht mit herkömmlichen Extrusions- oder duroplastischen Verfahren verarbeitet werden.¹⁰¹ So wurden seit 2000 auch eher hochpreisige Nischenmarktsegmente bedient (Instrumente, HiFi Geräte, Design Möbel, Schmuck). Seit Nov. 2008 liegt von einem US-Amerikanischen Vertreter die erste Großbestellung mit 1000t von Zeoform vor.¹⁰² Zelfo kann zu einfachen Formen gepresst oder, zur Erzeugung von Freiformen, aufgesprüht werden. Prozesse zur Herstellung von Platten und Spritzgussteilen befinden sich in Entwicklung. Zelfo kann nicht scharfkantig erzeugt werden und benötigt beträchtliche Mengen Energie in der Trocknung. Das Material ist in verschiedensten Oberflächengüten erhältlich und relativ wasserbeständig (nicht witterungsbeständig).

3.2.6 PHENOL-PROTEIN-HARZ BINDEMittel

2006 entwickelten Forscher am Institut für Holztechnologie Dresden ein Phenol-Protein Harz als Bindemittel für Holzwerkstoffe. Ohne Verschlechterung mechanischer oder hygrischer Werte konnte eine Formaldehydreduzierung gegenüber normalen Systemen um 90% erreicht werden. Probleme in der Herstellung natürlicher Leimsysteme liegen in ausreichender Lagerbeständigkeit und Erzeugung gleichbleibender Qualität. Grundsätzlich wird den pPF Harzen hohes Marktpotential zugesprochen.¹⁰³

¹⁰⁰ - <http://www.omodo.org/the%20material%20Properties.htm> [67]

¹⁰¹ - Nova Institut GmbH (Hg.), Gülzower Fachgespräche Band 26, Gülzow, 2008 S.173 [56]

¹⁰² - Zeo International (Press Release), Revolutionary Eco Material ist Changing our World, Mullumbimby (New South Wales), 2008 S.1 [68]

3.2.7 CELLULOSEACETAT - MAZZUCHELLI

Celluloseacetat ist als eine Weiterentwicklung der hochreaktiven Nitrocellulose (Schießbaumwolle) zu sehen und zählt zu den ältesten Kunststoffen überhaupt. Die Celluloseverarbeitende Industrie ist heute sehr weit entwickelt. Auf Grund der aufwendigen Produktionsmethoden und des hohen Rohstoffpreises (Cellulose € 3,- bis 4,-)¹⁰⁴ ist Celluloseacetat nicht mehr so häufig anzutreffen. Übliche Anwendungsgebiete sind verschiedene Knöpfe und (Werkzeug-) Griffe, Apparatgehäuse, Spielzeug, Schmuck, Verpackungen und manchmal Autoteile. Zur Herstellung wird die Cellulose in Essigsäure gelöst, voraktiviert und unter Zugabe von Essigsäureanhydrit verestert (Hydroxylgruppen der Glucosemoleküle werden durch Acetylgruppen ersetzt). Danach werden einige Acetylgruppen durch Hydrolyse wieder rückgängig gemacht um das sog. Primäracetat löslich und verarbeitbar zu machen. CA is grundsätzlich klar transparent, besitzt eine angenehme Haptik, gute Kerbschlagzähigkeit und gute mechanische Eigenschaften, sehr gute Kratzfestigkeit, Öl-, Fett-, Licht- und Alterungsbeständigkeit. Üblicherweise ist CA nur schwer biologisch abbaubar und resistent gegen Pilz oder Bakterienbefall.

Ein bekannter CA Hersteller ist der italienische Mazzucchelli Konzern. Er bietet die drei Produktklassen Setilithe (22-38% Anteile Weichmacher), Plastiloid (18-40% Weichmacheranteil) und eine spezielle Variante des biologisch abbaubaren Bioceta an. Je nach Weichmacheranteil werden sie für verschiedenen Produkte eingesetzt. Die üblichen Verarbeitungsformen sind Spritzguss, Folien-, Rohrextrusion und Blasformen. Mazzucchelli liefert in über 3000 verschiedenen Farben und mit unterschiedlichsten Oberflächenbeschaffenheiten (transparent, opak, mattiert, „pearl“, schillernd, fluoreszierend, Marmoreffekt, etc.). E-Moduln liegen etwa zwischen 2000 und 4000 MPa und die Dichte zwischen 1,2 und 1,3 g/cm³.¹⁰⁵

Wie bereits früher beschrieben gibt es zwar moderne Celluloseaufschlussverfahren, doch gehen mit den veralteten und heute noch gebräuchlichen Verfahren erhebliche Umweltbelastungen einher. Außerdem liegt bei ihnen der erzielte Ertrag (bezogen auf das Gesamtgewicht des verwendeten Holzes) mit 35-40% relativ niedrig und die Cellulose muss für eine Kunststoffverarbeitung nachträglich aufbereitet werden. Bei dem Clean Fractionation Verfahren werden Erträge auf 47-48% gesteigert und die aufgeschlossenen Bestandteile Lignin, Hemicellulose und Cellulose liegen in einer höheren Qualität vor.¹⁰⁶



Abb.64 diverse CA Produkte
(v.o.n.u.) Sonnenbrillengestell, Würfel,
Werkzeuggriff, Filmmaterial

103 - IHD (Hg.) Projektleiter Dettel Krug, Kurzdarstellung - Phenol-Protein-Hybrid als Bindemittel, Dresden, <http://www.ihd-dresden.de/index.php?id=218>, 2006 [69]

104 - European Joint Reserch Centre (Hg.), *Techno-economic Feasibility of Large-scale Production of Bio-based Polymers in Europe*, 2005 S.119 [53]

105 - http://www.mazzucchelli1849.it/newsite/inglese/ganuli/da_tec_gran.htm [70]

106 - European Joint Reserch Centre (Hg.), *Techno-economic Feasibility of Large-scale Production of Bio-based Polymers in Europe*, 2005 S.119 [53]



Abb.65 Mater-Bi Produkte

(v.o.n.u.) Einweggeschirr, Kugelschreiber, Müllsack
geschäumte Lebensmittelverpackung, Mulchfolie

3.2.8 STÄRKEBASIIERT - MATER-BI

Auf Grund seiner Wichtigkeit soll hier ein Vertreter eines stärkebasierten BAK präsentiert werden. Das italienische Unternehmen Novamont zählt in Europa zu den Vorreitern in der Biopolymer-Technik und entwickelt seit 1989 stärkebasierte Kunststoffe. Es hält über 60 Patente im Bereich Stärketechnologie, Verarbeitung und Komplexbildung mit natürlichen und synthetischen Additiven.

Mater-Bi ist die Hauptproduktlinie, spezialisiert auf abbaubare und kompostierbare Konsum-, Industrie-, Verpackungs-, Gastronomie-, Land- und Abfallwirtschaftsgüter. Diese sind nach EN und DIN zertifiziert. Hergestellt werden Folien (Müllsäcke, Papierlaminiert, Mulchfolien, etc.), tiefgezogene Schalen (Lebensmittelverpackung), Schäume (Schaumstoffplatten, Loos-Fill Verpackungschips), Spritzguss- und Extrusionserzeugnisse (Bleistiftspitzer, Lineale, Patronen, Spielzeug, Pflanzentöpfe, Kauknochen und Tierspielzeug, Käme und Wattestäbchen) sowie ein Additiv, das in Goodyear Reifen eingesetzt wird. Der so erzeugte Reifen besitzt verringerten Rollwiderstand und reduziert so den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs. Je nach Verarbeitungsmethode variieren die Kunststoffgrade recht stark in ihren Zusammensetzungen (Blendpartner) und mechanischen Eigenschaften (E-Moduln von 100 - 5000 MPa, Reißfestigkeiten von 20 - 50MPa, Reißdehnungen von 20 bis 600%).¹⁰⁷ Durchschnittliche Produktpreise für die Novamont Granulate liegen zwischen €2,50 und 3,-.¹⁰⁸

Nach Herstellerangaben verwendet Novamont zur Herstellung von Mater Bi Stärke von nicht gentechnisch veränderten Pflanzen und färbt dieses mit biologisch abbaubaren Masterbatches von Clariant. Das Material ist von sich aus antistatisch (Vorteil für einige Gebrauchsgegenstände wie z.B. Käme).

107 - <http://www.materbi.com/de/html/prodotto/tecnologie/indextecnologie.html> [72]

108 - European Joint Reserch Centre (Hg.), *Techno-economic Feasibility of Large-scale Production of Bio-based Polymers in Europe*, 2005 S.47 [53]

109 - Ebda S.55f [53]

110 - <http://www.natureworksllc.com/product-and-applications/ingeo-biopolymer/technical-resources.aspx> [72]

3.2.9 PLA - INGEO

PLA wird heute in vielfältigen Bereichen eingesetzt. Mengenmäßig spielen im Moment noch Verpackungsmittelindustrie und Fasererzeugung die größte Rolle. Agrarindustrie, Haushaltswaren, Verkehrsmittel und Elektrogeräte sind vielversprechende neue Marktbereiche. PLA besitzt gute mechanische Eigenschaften im Vergleich zu Standardthermoplasten, gute Geruchs- und Geschmacksbarriereeigenschaften, ist relativ resistent gegen Fette und Öle und gut UV-beständig. Es besitzt jedoch geringe Temperatur- und Hydrolysebeständigkeit und nur relativ schlechte Resistenz gegen Säuren und Laugen.¹⁰⁹

Einer der größten Produzenten ist NatureWorks LLC (eine Kooperation von Cargill Inc. und Dow Chemicals), der thermoplastisches PLA in amorphen und kristallinen Graden unter dem Produktnamen Ingeo vermarktet. Grundsätzlich werden zwei Typen, einer zur Kunststoffverarbeitung und ein anderer zur Faserproduktion, in verschiedenen Güteklassen hergestellt. E-Moduln bis ca. 3800 MPa werden erreicht bei einer Dichte von $1,24\text{g/cm}^3$.¹¹⁰ Es wurden auch bereits einige Versuche unternommen PLA mit NAWARO basierten Rohstoffen zu füllen, bzw. zu verstärken. Stärke spielt als kostenreduzierender Füllstoff eine wichtige Rolle. Hitzebeständigkeit und Moduln können durch sie weiter erhöht werden. Stärke muss für eine Verarbeitung durch einen Einsatz von Maleinsäure Polymeren wie PVOH oder PCL kompatibel gemacht werden. Durch Cellulosefasern lässt sich PLA ebenfalls verstärken. So hat z.B. Toyota Ersatzreifenabdeckung und Fußmatten aus Kenaf verstärktem PLA erzeugt. Flachs-PLA-Composites haben bessere Eigenschaften wie Flachs-PP-Composites gezeigt und auch aus recyceltem Papier gewonnene Cellulosefasern werden getestet. Ein Problem, das sich in Zusammenhang mit der Verarbeitung von Naturfasern ergeben hat, ist der relativ hohe Feuchtigkeitsgehalt, den diese unter Umständen besitzen können. Sie können nur schwer auf die nötige Trockenheit gebracht werden.¹¹¹



Abb.66 PLA Produkte
(v.o.n.u.) typische PLA-Ingeo Produkte, Toyota EcoPlastic
Ersatzreifenabdeckung, FKUR Fibrolon PLA-WPC

3.2.10 PLA - CD

Eine interessante Entwicklung stellte die Milddisc, eine PLA basierte CD, von Sanyo in Kooperation mit Mitsui Chemicals entwickelt, dar. Die Markteinführung (2003 geplant) wurde auf Grund von Hitzebeständigkeitsproblemen allerdings verzögert. Aktuell konnten kein Vertrieb gefunden werden. Umgerechnet wurden 85 Maiskörner in der Herstellung zu einem Rohling benötigt und der biologische Zerfall sollte 50-100 Jahren dauern. Gegenüber normalen CDs lag der veranschlagte Preis 2003 beim Dreifachen.¹¹²



Abb.67 Sanyo Milddisc

111 - Nature Works (Hg.), Technology Rocus Report: Polylactic Acid Containing Fillers and Fibers (via www.natureworkslc.com), Minnetoka, 2005 S.2 [73]

112 - European Joint Reserch Centre (Hg.), Techno-economic Feasibility of Large-scale Production of Bio-based Polymers in Europe, 2005 S.59 [53]

% Substitution	PE-LD	PP	PVC	PE-HD	PS ¹⁾	PET	PUR	PA	ABS ²⁾	PC	PMMA	POM ³⁾	other poly	LEGEND	
														%	Subst pot.
Starch polymers	10	10	0	10	10	0	10	0	0	0	5	0	0		
PLA	0	10	0	10	10	0	10	0	0	0	5	0	0	0	-
Other bio-based polyesters	0	20	0	0	0	30	0	30	0	20	5	0	0	5	(+)
PHA	20	20	10	30	20	10	10	0	10	0	5	0	0	10	+
Bio-based PUR	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	20	++
Bio-based PA	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	30	+++
Sum percentages	30	60	10	50	40	50	50	70	10	20	20	0	0		

All values in 1000 tonnes	PE-LD	PP	PVC	PE-HD	PS ¹⁾	PET	PUR	PA	ABS ²⁾	PC	PMMA	POM ³⁾	other poly	Total	% subst
1999 Polymer Consumption in W.Europe acc. to APME ⁴⁾	7,228	7,506	5,799	4,847	3,415	2,899	2,268	1,234	646	336	300	166	7,133	43,777	100
Starch polymers	723	751	0	485	342	0	227	0	0	0	15	0	0	2,541	6
PLA	0	751	0	485	342	290	0	123	0	0	15	0	0	2,005	5
Other bio-based polyesters	0	1,501	0	0	0	870	0	370	0	67	15	0	0	2,823	6
PHA	1,446	1,501	580	1,454	683	290	227	0	65	0	15	0	0	6,260	14
Bio-based PUR	0	0	0	0	0	0	0	680	0	0	0	0	0	680	2
Bio-based PA	0	0	0	0	0	0	0	370	0	0	0	0	0	370	1
Sum volumes	2,168	4,504	580	2,424	1,366	1,450	1,134	864	65	67	60	0	0	14,681	34

¹⁾ PS (all types) and EPS
²⁾ ABS/SAN
³⁾ Also known as polyacetal, polyformaldehyde
⁴⁾ APME (2003)

Tab. 16 Substitutionspotential biobasierter Kunststoffe

% Substitution	PET	PA	Acrylic	Other synthetic	Cellulosic	LEGEND	
						%	Subst pot.
Starch polymers	0	0	0	0	0		
PLA	10	0	5	0	5	0	-
Other bio-based polyesters	30	0	5	0	5	5	(+)
PHA	5	0	5	0	5	10	+
Bio-based PUR	0	0	0	0	0	20	++
Bio-based PA	0	30	0	0	0	30	+++
Sum percentages	45	30	15	0	15		

All values in 1000 tonnes	PET	PA	Acrylic	Other synthetic	Cellulosic	Total	% subst
2002 Fibre Consumption in W.Europe acc. to CIRFS ¹⁾	549	909	620	872	585	3535	100
Starch polymers	0	0	0	0	0	0	0
PLA	55	0	31	0	29	115	3
Other bio-based polyesters	165	0	31	0	29	225	6
PHA	27	0	31	0	29	88	2
Bio-based PUR	0	0	0	0	0	0	0
Bio-based PA	0	273	0	0	0	273	8
Sum volumes	247	273	93	0	88	701	20

¹⁾ CIRFS (2003)

Tab. 17 Substitutionspotential biobasierter Faserstoffe

3.3 CONCLUSIO

Wie anhand der Arbeit gezeigt wird, besitzen Biopolymere und Naturfasern eine wichtige Rolle in der Herstellung von Baustoffen (Holzwerkstoffe, WPC, Stärke-, Lignin-, Cellulosezuschnitte sind nur einige ihrer Anwendungsbeispiele). Ihre Entwicklung als solche wird auch in Zukunft wichtig für die Bauindustrie sein. Inwieweit auch zu Kunststoffen umgewandelte Biopolymere bzw. biobasierte Kunststoffe hier als Werkstoffe Relevanz erlangen, werden ist noch nicht endgültig zu beurteilen. Bisher besitzen sie auf diesem Gebiet noch kaum Bedeutung und lediglich einige Designobjekte verweisen auf eine Richtung in die es in Zukunft gehen kann. Entscheidend für ihre Durchsetzung wird sein, ob biobasierte Konstruktionswerkstoffe eine Dauerhaftigkeit über Jahrzehnte erreichen werden können. Die Entwicklung gegen Umwelteinflüsse beständiger Kunststoffe auf Basis von Biopolymeren scheint zunächst widersprüchlich, ist aber in Anbetracht des derzeitigen Standes der Technik zumindest teilweise als möglich zu erachten. In Konkurrenz zu den herkömmlichen Massenkunststoffen werden sie in absehbarer Zeit allerdings noch nicht treten und eine längerfristige Prognose ist hier seriös nur schwer abzugeben. Grundsätzlich überwiegt eine positive Einstellung von Seiten der Hersteller wie der Konsumenten. Große Hoffnung wird in die Entwicklung der neuen Materialien gelegt, denn spätestens wenn sich die fossilen Rohstoffreserven der Erde dem Ende zuneigen, wird ein Wechsel zu Alternativen unumgänglich.

Nach [53] wird den biobasierten Polymeren für den Zeitraum bis 2020 allerdings noch kein durchgreifender Erfolg prognostiziert. In verschiedenen Entwicklungsszenarien wird der tatsächliche Anteil von biobasierten Polymeren an der gesamten Polymerherstellung für EU-15 (Studie aus 2005) mit 1-4% ermittelt. Dieser wird auch deshalb so niedrig bleiben, weil herkömmliche Polymere noch immer sehr starke Wachstumsraten verzeichnen. Über einen Vergleich von Werkstoffeigenschaften der Biopolymerwerkstoffe mit jenen herkömmlicher Kunststoffe wurde versucht, das tatsächliche Substitutionspotential abzuschätzen. Tab. 16 zeigt das Potential als Ersatz für Kunststoff-, Tab.17 für Faserprodukte. Ein hundert prozentiges technisches Substitutionspotential (+++) wurde mit einer 30%igen quantitativen Substitution gleichgesetzt - dies liegt daran, dass einige Polymere (PTT, PA, PUR) nur teilweise biobasiert hergestellt werden können. Die Gruppe „other bio-based Polyesters“ enthält PBS, PBT und PTT. Insgesamt wird die auf diese Weise ermittelte Menge für biobasierte Polymere auf 15,4 Mio. t bzw. 33% Marktanteil und für Faserprodukte auf 700.000 t bzw. 20% eingeschätzt.

4 LISSY

EINE EXPERIMENTELLE ANWENDUNG

Mit dem Projekt LISSY - Living Skin System - wurden die Rechercheergebnisse zum Thema der Biopolymere in einer experimentellen Studie für ein Fassadenelement angewendet. Anstatt der schwierigen Aufgabe ein Biopolymer als Fassadenwerkstoff zu entwickeln, sollten vielmehr latente Potentiale von Biopolymeren für den Bereich der Architektur aufgedeckt und durch einen kreativen Ansatz verwendet werden.

Ausgangspunkt dabei war der Wunsch, die „Haut“ - im biologischen Sinn - für Architektur zu entwickeln. Die Idee resultierte einerseits direkt aus der Beschäftigung mit den Biomakromolekülen und ihren Funktionen im Organismus und andererseits aus der aktuellen Tendenz biomimetische Prozesse auf architektonische Systeme zu übertragen. Im Laufe der Entwicklung wurde die thermische Regulierung als Hauptkriterium für eine „Architektur-Haut“ festgelegt und versucht diese mit Hilfe eines passiven Kühlsystems auf Basis vom physikalischen Prinzip der Verdunstungskühle herzustellen. Dieses ermöglicht über den Verdunstungs-sog einen Wassertransport ähnlich wie in Bäumen.

4.1 PROJEKTBE SCHREIBUNG

Wenn Architektur als Organismus betrachtet werden soll, muss dieser in Wechselwirkung mit seiner Umwelt treten. LISSY stellt den Versuch dar, ein „Hautsystem“ für smarte Architektur zu entwickeln, das diesem Prinzip folgt. Kurz gesagt handelt es sich bei dem Living Skin System um eine weiche Matte mit hervorragenden Dämmeigenschaften, die bei heißen Außentemperaturen durch Transpiration ohne zusätzliche Energie- und mit geringstem mechanischen Aufwand, Kühlung erzeugen kann. Dafür wurde ein 1x1m. großes Pattern entwickelt, das addiert, ähnlich wie eine Zeltplane, über jede Tragstruktur gespannt werden könnte. Zu experimentellen Zwecken wurde dieses Element im Maßstab 1:1 als Modellprototyp gebaut. Der Wunsch nach „lebendiger“ Architektur ist dabei in der Materialwahl wie im Systemdesign reflektiert.

Ein 15 Meter hoher Ahornbaum besitzt an die 177.000 Blätter mit einer Gesamtoberfläche von 675m². An einem Sommertag verliert er allein pro Stunde 220 Liter Wasser durch Verdunstung aus den Blättern.¹¹³ Durch die Kohäsion des Wassers entsteht beim Verdunsten eine Saugspannung von bis zu 3MPa im Leitgewebe des Baums, dem Xylem, sodass dieses über eine Höhe von bis zu 100m ohne Energieaufwand von Seiten der Pflanze transportiert werden kann.¹¹⁴

Das Prinzip der Saugspannung wird auch von LISSY genutzt, um im Sommer kühles Wasser zur Klimatisierung durch ein leitfähiges Gewebe zu transportieren. Das Kühlsystem funktioniert bis zu einem gewissen Grad ähnlich wie die heute üblichen Flächenkühlsysteme (Kühlbalken, Kühlsegel, Kernaktivierung, etc.), die auf Grund ihrer hervorragenden Behaglichkeit (sie erzeugen keine Zugluft) gerne eingesetzt werden. Die Flächenkühlung in LISSY ist auf der Raumseite angeordnet. Das Kühlwasser wird dabei nicht durch ein Rohrsystem gepumpt, sondern durch ein Mikrofasergewebe aus einem Reservoir (Grundwasser, Zisterne o.ä.) aufgesogen. Über ein Äderchensystem gelangt es dann weiter zu einer Verdunstungsschicht. Hier ist der Gummi, mit dem das wasserführende Fasermaterial überzogen ist, mit feinen Löchern versehen durch die Wasser verdunsten kann. Mit steigender Verdunstungsrate wird so auch immer weiter frisches Wasser nachgesogen.

Da die Verdunstung aber auch wesentlich vom Luftzug in der Umgebung abhängt, sind in die äußere Dämmschicht des 3-schichtigen Systems Lüftungskappen eingebaut, die sich in Abhängigkeit von der Außentemperatur öffnen und schließen.

Abb.68 Oberfläche aus LISSY-Pattern

113 - J. Markl, *Biologie (Originaltitel: Life – The Science of Biology)*, Elsevier GmbH, 7. Auflage, München, 2004 S.863 [45]

114 - Ebda S.870 [45]



Hierfür sind außen Behälter mit Pflanzenölfüllung eingebaut. Das Öl dehnt sich unter Erwärmung aus und kann über eine Hydraulikmechanik die Öffnungen automatisch und stufenlos regulieren. Ein Thermostat, der nach dem gleichen System aufgebaut ist, regelt den Gesamtwasserfluß zwischen Kühlpads und Verdunstungsschicht über das Adernsystem. Sinkt die Außentemperatur unter ein gewisses Niveau wird die Verbindung unterbrochen und das Wasser hört auf durch die Konstruktion zu fließen. Die Konstruktion wird im Winter trocken, die Lüftungsklappen schließen und so kann der gesamte Querschnitt in der kalten Periode des Jahres als Dämmschicht wirken.

Materialisiert wurde das System unter Einsatz einfach zugänglicher Materialien, die als Biopolymere betrachtet werden können. Auf Grund ihrer einzigartigen hygroskopischen Eigenschaften wurde als Dämmschicht Schafwolle ausgewählt. Die wasserführende Schicht wurde aus Cellulosefasern hergestellt. Diese wurde mit Baumwollwebe umwickelt und zur Abdichtung in Naturlatex getränkt. Als Thermostatflüssigkeit dient das nicht trocknende Rapsöl.

Einige Materialien, die im Prototypen verwendet werden, könnten in einer weiter entwickelten Stufe noch durch Biopolymere ersetzt werden. Die Umhüllung des Systems wurde mit einem Markisenstoff (luft- aber nicht wasserdurchlässig), die Füllkörper der Thermostate wurden aus PS-Platten bzw. Epoxyharz und die Schienen der Öffnungsklappen aus PE-Kitt hergestellt. Verklebt wurde das System mit einem Polychloropren basierten Kraftkleber (Pattex Klassik).

Wassertransport in Pflanzen

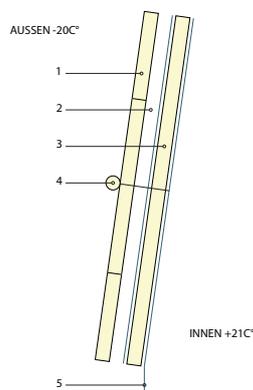
- 1 *Durch Osmose gelangt das Wasser über das Wurzelhaar in den Zentralzylinder*
- 2 *Wassermoleküle bilden im Zentralzylinder bis zu den Blättern eine kohärente Wassersäule*
- 3 *Saugspannung zieht die Wassersäule im Xylem von Wurzeln an aufwärts*
- 4 *Saugspannung zieht Wasser durch das Zwischengewebe, Mesophyll, der oberen und unteren Blatthaut*
- 5 *Wasserdampf verdunstet aus den Stomata der Blätter*

4.2 FUNKTIONSWEISE

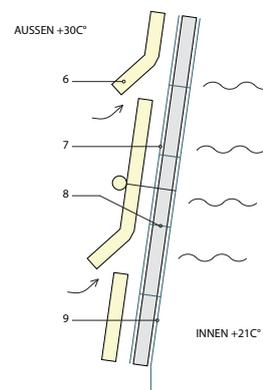
Bei hoher Außentemperatur öffnet das Thermostat (4) die Wasserzufuhr (5) und die innen liegenden Kühlpads (9) saugen sich durch die Kapillarwirkung mit kühlendem Grundwasser voll. Über ein Adernsystem (8) gelangt das Wasser weiter zur Verdunstungsschicht (7) aus der das Wasser durch Mikroporen verdunsten kann. Durch den Transpirationssog wird stetig kühles Wasser nachtransportiert und die Verdunstungskühle steigert den Kühleffekt weiter. Die feuchte Luft wird durch die Hinterlüftungsschicht (2) abtransportiert. Sinkt die Außentemperatur, wird der Wassertransport gestoppt, die Lüftungsklappen (6) schließen und die gesamte Konstruktion wirkt nun als Dämmschicht.

Das Fassadenelement besteht aus 2 Dämmlagen zu je 4cm (Schafwollklemmfilz Isolena), die mit Markisenstoff überzogen sind und eine dazwischenliegende Hinterlüftungsebene, mit ebenfalls 4cm, besitzen. In die äußere Dämmschicht sind die Lüftungsklappen eingebaut.

WINTERPOSITION



SOMMERPOSITION



- 1 - DÄMMSCHICHT
- 2 - LUFTSCHICHT
- 3 - DÄMMSCHICHT
- 4 - THERMOSTAT
- 5 - WASSERZUFUHR
- 6 - LÜFTUNGSKLAPPEN
- 7 - VERDUNSTUNGSSCHICHT
- 8 - WASSERADERN
- 9 - KÜHLPADS

Abb.69 Schema der Funktion

4.3 SCHEMATISCHER AUFBAU

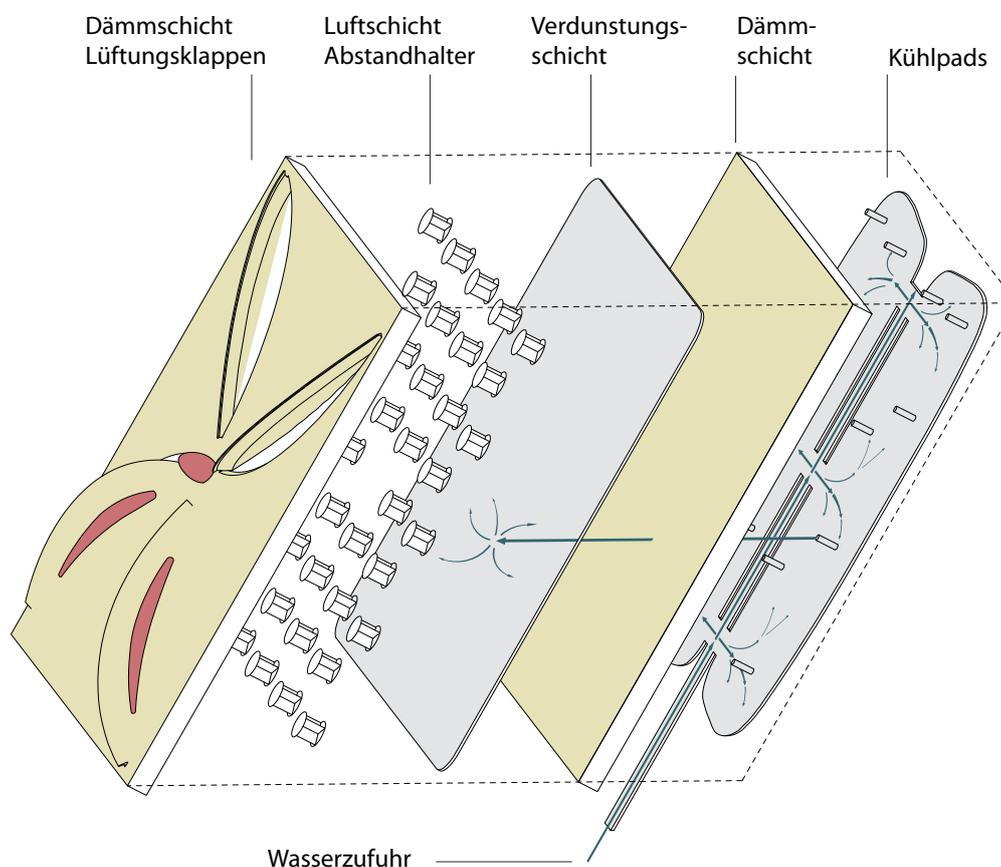


Abb.70 Schematischer Aufbau

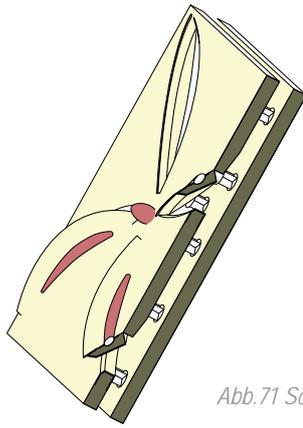
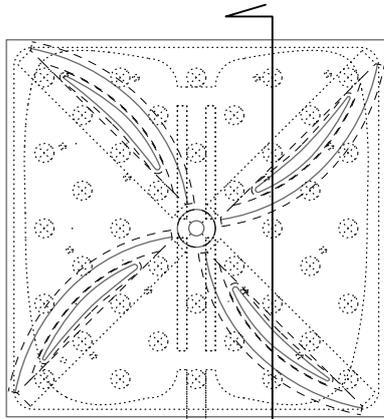


Abb.71 Schnittaxonometrie



Wasserszulauf / Hauptader

Abb.72 Ansicht

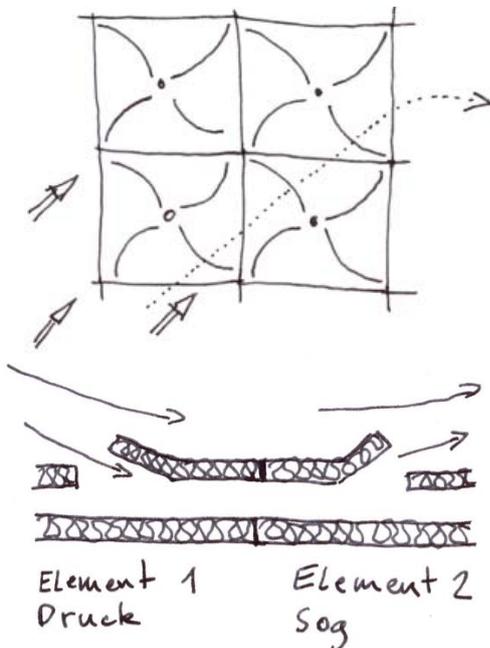
Element 1
DruckElement 2
Sog

Abb.73 Design der Lüftungsschlitze

4.4 DESIGN

Das prototypische Element der Fassade wurde in einer Größe von 1m x 1m ausgeführt. Die Schichtdicken wurden, um eine schlanke Konstruktion zu erhalten, möglichst dünn gewählt. Für Hinterlüftungen gilt eine Mindestdicke von 4cm, um eine genügende Luftbewegung zu erreichen.¹¹⁵ Die Dämmschichtdicken wurden auf eine gute Dämmwirkung hin ausgelegt. Der U-Wert der Konstruktion liegt bei einer Gesamtstärke von etwa 12cm bei $0,37 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Die Schnittaxonometrie zeigt das Fassadenelement mit geöffneten Lüftungsclappen.

Die Flüssigkeitsmengen der Thermostate ergeben sich aus den Wärmeausdehnungsverhalten des Öls und bestimmen die Größe der Ölbehälter. Für Rapsöl ergibt sich bei einer Ölmenge von 100ml in einem Rohr von 5mm Durchmesser ein Hub von 2,7cm bei einer Erhöhung der Temperatur um 10°C . Das eiförmige Ventil in der Mitte dient als Hauptventil und stellt die Verbindung zwischen Kühlpad und Hauptader her. Schließt das Ventil, saugt sich somit die gesamte wasserführende Schicht mit Wasser an.

Die Ansicht zeigt die Anordnung der Lüftungsschlitze, die Position der Abstandhalter (Hinterlüftung), Kühlpads und der Hauptader.

Die Schlitze wurden in dem Element so angeordnet, dass eine möglichst gute Durchströmung mit Luft erreicht wird. Die Handskizze zeigt das Prinzip. Die Lüftungsschlitze werden spiralförmig auf dem Element angeordnet. Wird dieses nun aneinandergereiht, stehen sich immer zwei Schlitze gespiegelt gegenüber. So ist sichergestellt, dass der Wind, egal aus welcher Richtung er kommt, direkt in den ersten Schlitze eindringt, während er an der gegenüberliegenden Seite Sog erzeugt.

In Abb.74 ist der gesamte Pattern als Schnitt im Maßstab 1:4 dargestellt.

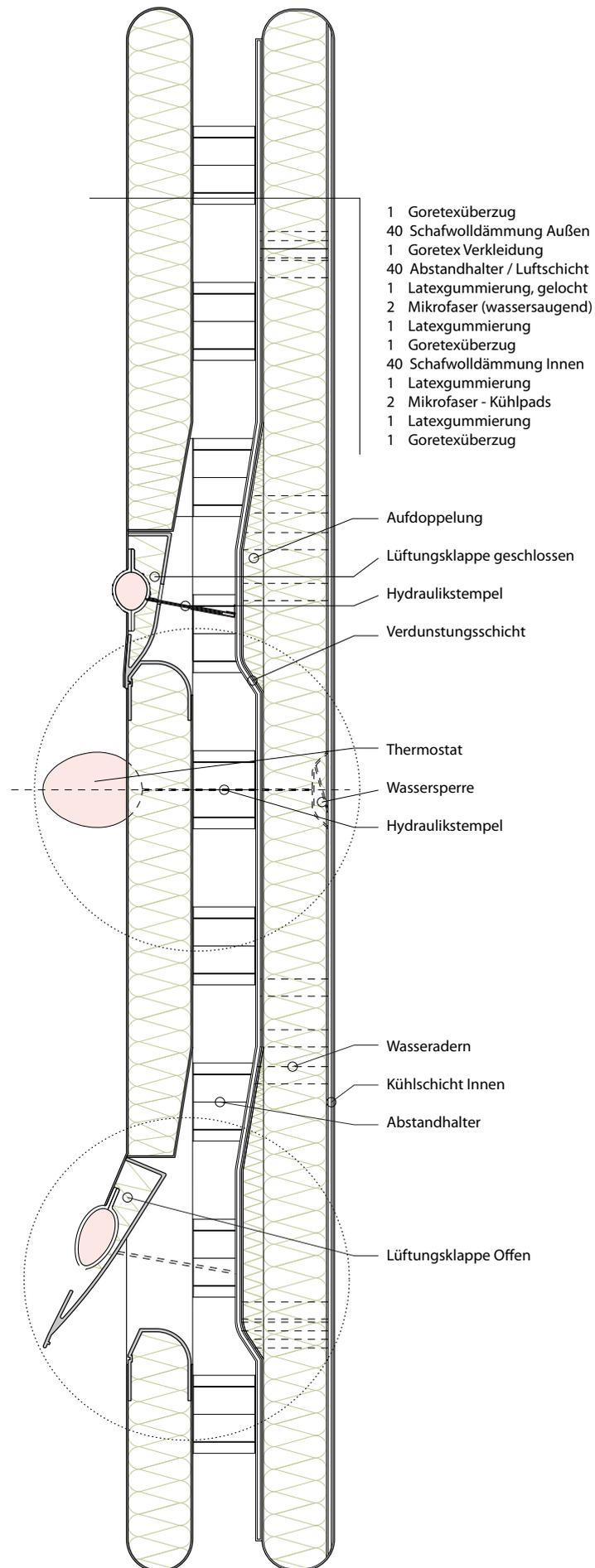


Abb.74 Schnitt 1:4

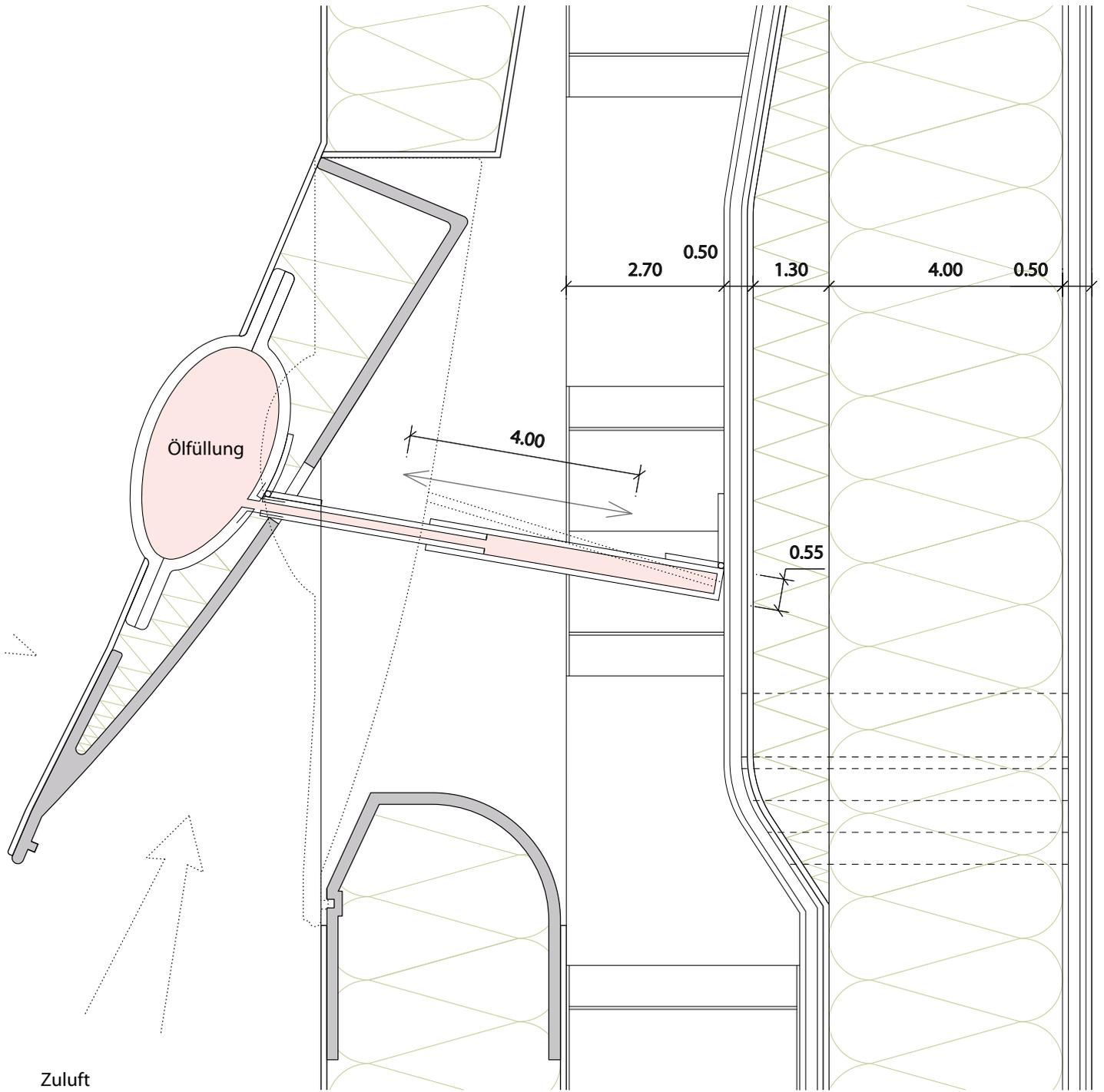


Abb. 75 Lüftungsklappe 1 : 1

4.5 DETAILSCHNITTE

Die beiden Zeichnungen zeigen im Maßstab 1 : 1 wie Lüftungsklappe und Hauptventil funktionieren könnten. Die Wirkungsweise beruht auf der Tatsache, dass sich Öl unter Erwärmung ausdehnt.

Bei der Lüftungsklappe expandiert das Öl bei Erwärmung in einen Teleskopzylinder, der sich dadurch bis um 4cm verlängern kann - die Lüftungsklappe wird so aufgehoben und es öffnen sich die Lüftungsschlitze. Die Öffnung wird so in Abhängigkeit von der Temperatur stufenlos reguliert.

Im Falle des Hauptventils wird durch das expandierende Öl die Verbindung zwischen Haupttader und Kühlpads hergestellt, sodass sich diese mit Wasser vollsaugen.

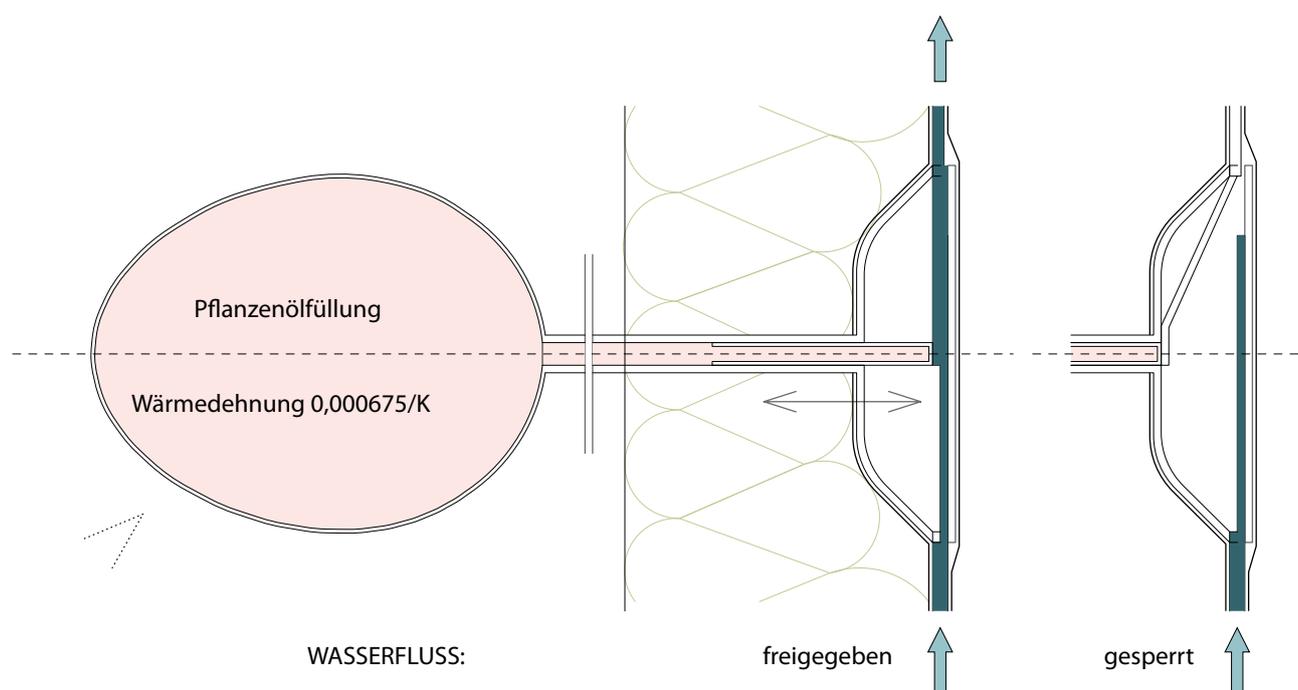


Abb.76 Hauptventil 1 : 1

4.6 ABSCHÄTZUNG DER KÜHLEISTUNG

Wärmeausdehnung von Rapsöl

V - Volumen

0,000675 Ausdehnungskoeffizient Rapsöl

T - Temperatur

$$V \cdot 0,000675 \cdot \Delta T = \Delta V$$

Bei einem Temperaturanstieg von 10°C ergibt sich für 100ml eine Volumenausdehnung von 0,675cm³. In einem Rohr mit Durchmesser 5mm bedeutet dies einen Hub von 2,7cm.

U-Wert

In geschlossenem Zustand der Lüftungsclappen beträgt der U-Wert der Konstruktion 0,37 W/m²K. Dies ist zwar nur ein U-Wert mittlerer Qualität, wurde aber zugunsten einer schlanken Konstruktion so gewählt. Durch eine Erhöhung der Dämmstärken auf 2 x 10cm würde bereits eine Verbesserung des U-Werts auf 0,16 W/m²K erreichbar sein.

Experimentelle Abschätzung der Verdunstungsleistung

Über die anbei abgebildete Versuchsanordnung wurde die Verdunstungsleistung des Systems vorläufig hochgerechnet. Nach dem Aufbau des Streifens wurden auch Kühlpads und Verdunstungsschicht des Prototypen gebaut: ein Streifen aus gepressten Cellulosefasern wurde zunächst zur Verstärkung in Baumwollwebe gehüllt. Diese ist in Wasser beständig und hält die Cellulose zusammen. Der Streifen wurde danach in Latex getaucht, um ihn wasser- und luftdicht zu verschließen. Der obere Bereich wurde mit einer Nadel gelocht, um den Verdunstungssog zu ermöglichen.

Das System wurde in einem Innenraum, also ohne auftretenden Luftstrom, aber bei einer niedrigen relativen Luftfeuchtigkeit von durchschnittlich 30% durchgeführt. Über das so hergestellte System konnte eine Verdunstung von 75ml in 14 Tagen über die 18cm² große Verdunstungsfläche erzeugt werden. Dies entspricht, linear hochgerechnet, einer Verdunstung von 0,124 l / m²h. Der Wert entspricht in etwa einem Drittel des Werts, der sich rechnerisch ergeben würde, entspricht somit noch immer einer Verdunstungsleistung von 85 W / m².

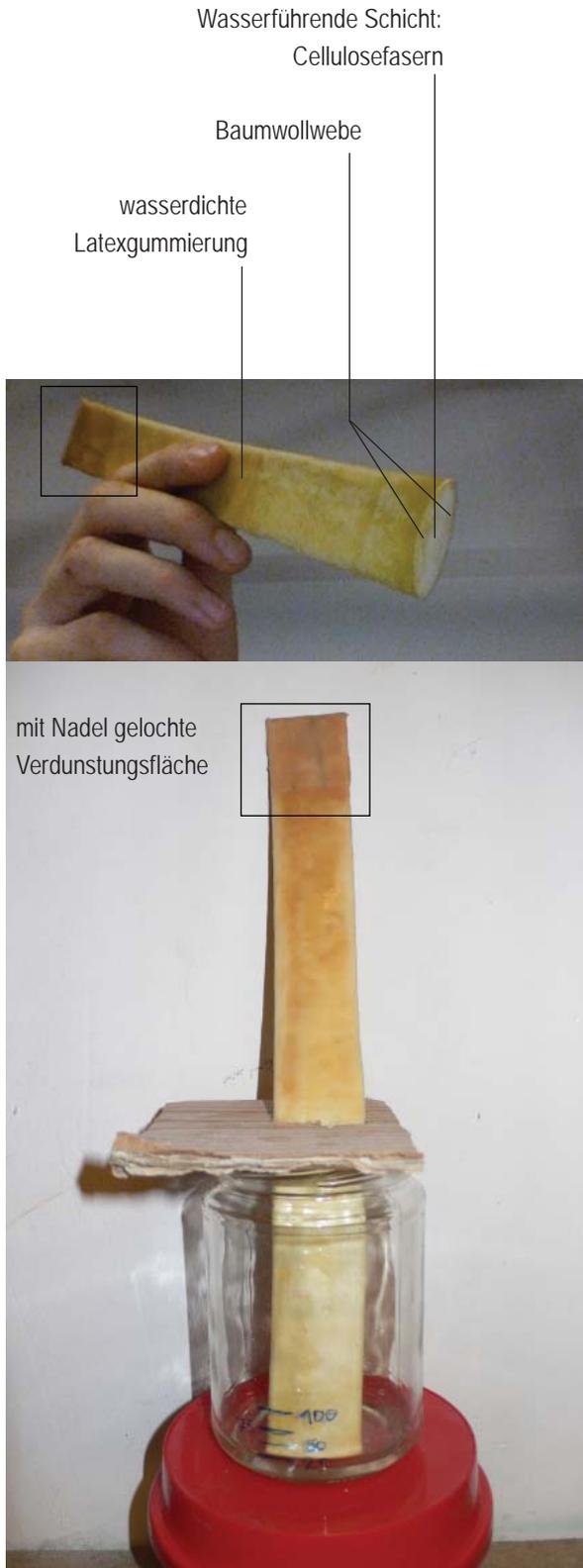


Abb.77 Versuchsanordnung: Wasserverdunstung

Rechnerische Abschätzung der Verdunstungsleistung

Rechnerische Bestimmung der Verdunstung [57] S.372

m - Massenstrom in $\text{kg} / \text{m}^2\text{h}$

v - Windgeschwindigkeit in m/s

$\Delta p = p_0 - p$ Wasserdampfpartialdruckdifferenz in Pa

p_0 - Sattdampfdruck des Wasserdampfs in der Luft bei
100% rel. Luftfeuchtigkeit und 25°C (Tabellenwert)

p - Dampfdruck bei 80% rel. Luftfeuchtigkeit

für Windgeschwindigkeit und relative Luftfeuchtigkeit wurden bei uns übliche Durchschnittswerte von $1,5 \text{ m/s}$ bzw. 80% angenommen. So ergibt sich nach

$$m = (1,6 + 1,2 \cdot v) \cdot 10^{-4} \cdot \Delta p$$

eine Verdunstungsmenge von $0,215 \text{ kg} / \text{m}^2\text{h}$

Über die Verdampfungsenthalpie von Wasser lässt sich nun die Verdunstungsleistung errechnen:

Verdampfungsenthalpie von Wasser (25°C) = $43 \text{ kJ} / \text{mol}$
 215 g Wasser entsprechen etwa $11,9 \text{ mol}$ Wasser

$$11,9 \text{ mol} / \text{m}^2\text{h} \cdot 43,99 \text{ kJ} = 523 \text{ kJ} / \text{m}^2\text{h} = 145,96 \text{ W} / \text{m}^2$$

Lt. Lehrbuch liegt die Verdunstungswärme von nassen, stark angeblasenen Oberflächen bei etwa $300 \text{ W} / \text{m}^2$ - die errechneten bzw. experimentell ermittelten Werte scheinen somit nicht unrealistisch.

Leistung der Kühl pads

Strahlungsleistung der Kühl pads

C_s = Boltzmannkonstante

T = Temperatur in K

als Temperatur für die Kühleisung wurden 10°C bzw. 283K , als geschätzte Grundwassertemperatur angenommen.

Zunächst wird die Leistung wie für einen schwarzen Strahler ermittelt:

$$M_s = C_s \cdot (T / 100)^4 = 5,67 \cdot 2,834 = 364 \text{ W} / \text{m}^2$$

Dieser ideale Wert wird dann um einen Abminderungsfaktor um 20% verringert und es ergibt sich eine Strahlungsleistung von $291 \text{ W} / \text{m}^2$

Gesamtkühlleistung des Systems

Die ermittelten Werte stimmen optimistisch, dass mit diesem System eine brauchbare Kühlleistung erreicht werden kann. Ob die Verdunstungsmenge den ermittelten Mengen tatsächlich entsprechen wird und diese auch ausreicht, um die Kühl pads auf gleichmäßig niedriger Temperatur zu halten, lässt sich nur schwer rechnerisch vorhersagen, insbesondere da dies wiederum an die Verdunstungskühlleistung gekoppelt ist. Ob und wie sich diese auf die Gesamtleistung des Systems auswirkt, könnte schließlich nur in einer Computersimulation oder experimentell anhand eines Modells im Labor ermittelt werden. Diese Möglichkeit wurde besser realisierbar erachtet und stellt somit den Hauptgrund für die Erstellung des Prototypen im Maßstab 1:1 dar.

4.7 AUFBAU DES PROTOTYPEN

Das Foto zeigt die später innen liegende Dämmschicht, die für das Aufbringen des Kühlpads vorbereitet wird (durchstechen der Adern).



Das vorbereitete Kühlpad wird aufgelegt, das Foto zeigt die spätere Innenansicht der Fassade ohne Stoffhülle. Die Kühlpads entsprechen im Aufbau Abb.77



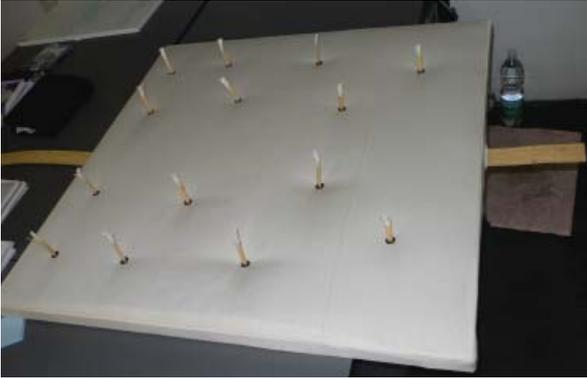
Umgedrehte innere Dämmschicht - die Verbindungsadern zwischen Kühlpads und Verdunstungsschicht sind hier sichtbar.



Die Dämmschicht wird mit Stoff überzogen.



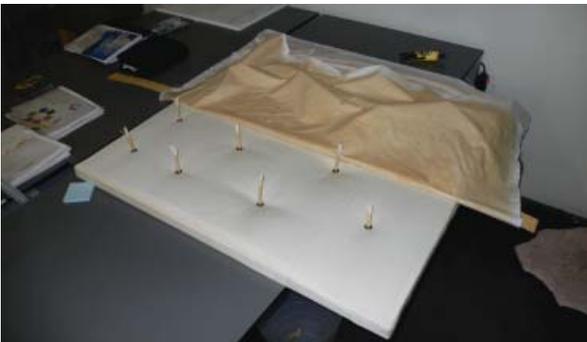
Abb.78 Aufbau des Prototypen



Die Abb. zeigt die fertig mit Markisenstoff überzogene Dämmschicht. Die Adern sind für eine Verbindung mit der Verdunstungsschicht durchgezogen.



Die Abbildung zeigt die fertige Innenansicht des Elements.



In einem weiteren Schritt wird eine gummierte Baumwollwolle beschicht aufgebracht



und mit den Adern wasserdicht verbunden.

Abb.79 Aufbau des Prototypen

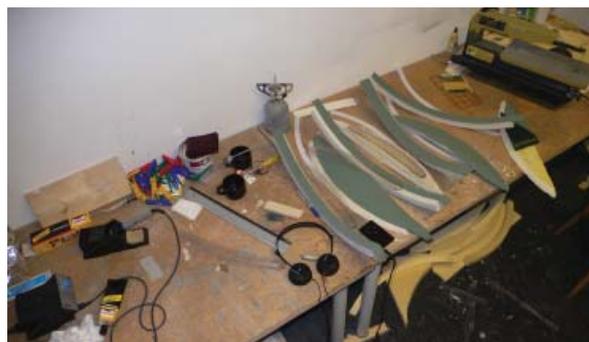
Nun wird die Cellulosefasermatte mit den Adern verbunden.



Diese wird mit einer weiteren gummierten Stofflage abgedeckt. Abschließend werden die Mikroporen mit Nadeln erzeugt und die Abstandhalter zwischen erster und zweiter Dämmlage aufgebracht.



Für die äußere Dämmschicht werden in der Zwischenzeit die Lüftungsklappen gebaut



und die Füllkörper der Thermostate tiefgezogen und mit Öl befüllt.



Die Abbildung zeigt die befüllten Ölbehälter der Lüftungs-klappen.



Abb.80 Aufbau des Prototypen



Die Lüftungsklappen werden zunächst ohne hydraulische Mechanik eingebaut. Sie müssen in diesem ersten Prototypen per Hand bedient werden. Luftdurchlässigkeit und Luftströmung in der Hinterlüftung kann für die so entworfene Konstruktion abgeschätzt werden.



Zunächst wird der Hüllstoff an den richtigen Stellen eingeschlitzt



und danach über die Dämmschicht gezogen.



Die Lüftungsklappen werden danach in das Element eingesetzt und mit dem Stoff vernäht bzw. verklebt.



Die Abbildung zeigt die fast fertige äußere Dämmschicht mit den eingebauten Lüftungsklappen.

Abb.81 Aufbau des Prototypen

Fertig zusammengesetztes Fassadenelement. In der Abbildung sieht man die Lüftungsklappen in geöffnetem Zustand. Das eiförmige Ventil in der Mitte ist für den Hauptwasserfluss zuständig und schließt die Verbindung zwischen Hauptleitung (unten sichtbar) mit den Kühlpads.



Der Prototyp in der Ansicht mit geöffneten Lüftungsklappen.



Prototyp mit geschlossenen Lüftungsklappen.

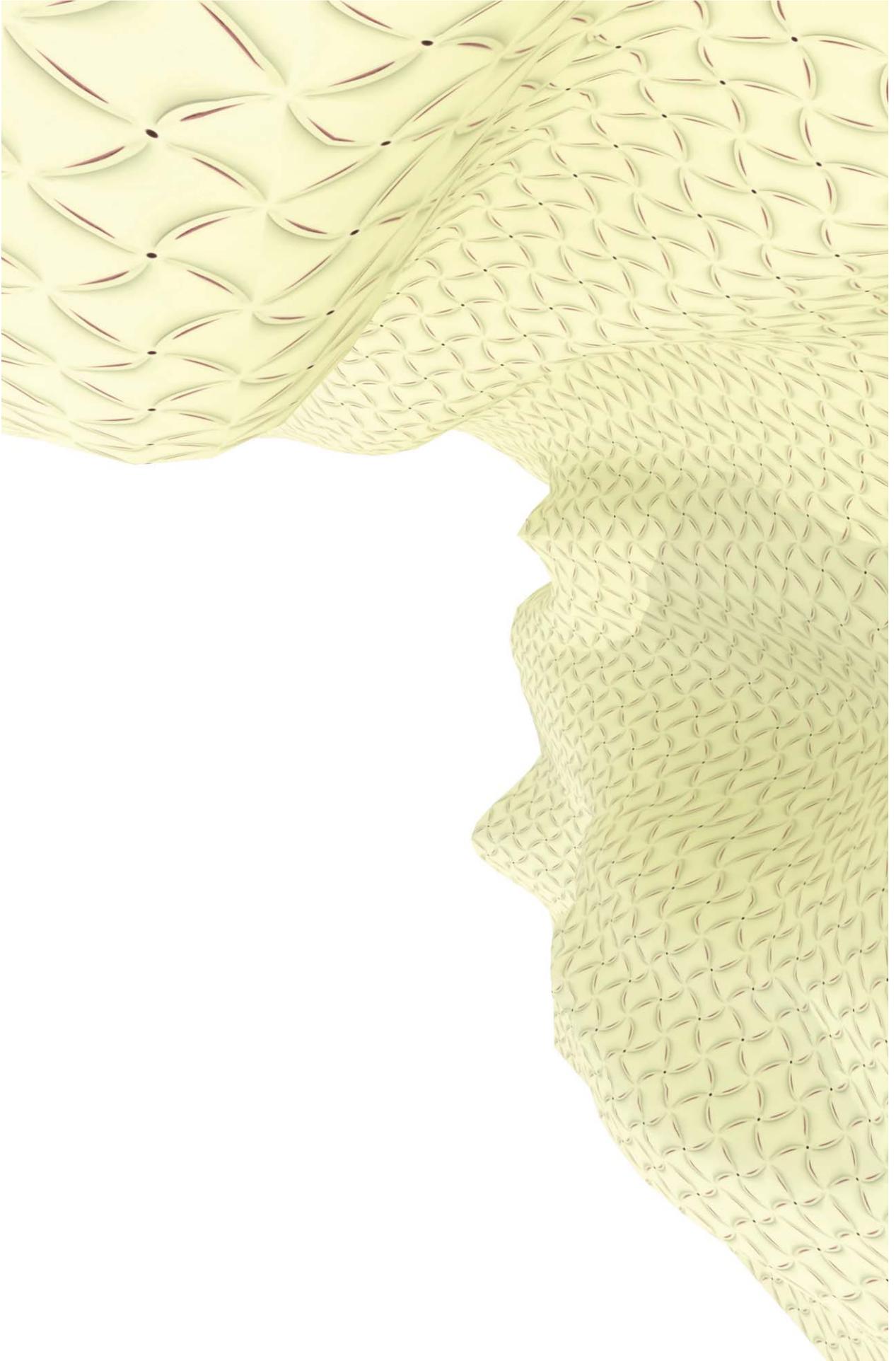


Abb.82 fertig zusammengesetzter Prototyp

4.8 POTENTIELLE ANWENDUNGSGEBIETE & WEITERENTWICKLUNG VON LISSY

Das „Living Skin System“ befindet sich im Anfangsstadium seiner Entwicklung und wurde in erster Linie zum Austesten der Sogwirkung und der Kühlfunktion gebaut. Derzeit wird die dazugehörige Testreihe durchgeführt. Ergebnisse und ein überarbeiteter Prototyp sind in wenigen Monaten zu erwarten. Das Hauptaugenmerk bei der Konstruktion von LISSY lag auf der Entwicklung eines neuartigen passiven Kühlsystems. Die Beantwortung einiger konstruktiver Fragestellungen wurde dabei noch bewusst ausgespart. So wurde z.B. noch keine konkrete statische Unterkonstruktion vorgeschlagen und auch noch keine Prognose zur Dauerhaftigkeit der Konstruktion gemacht (Schimmelbildung, Beständigkeit der Schafwolle). Wie sich im Lauf der Projektentwicklung gezeigt hat, muss ein derartiges Element für einen Einsatz im Bürobau oder für Gebäude die Dienstleistungsbetriebe beherbergen, ausgelegt werden. Nur hier fallen signifikante Kühllasten an (bzw. dürfen lt. gesetzlicher Regelung überhaupt anfallen) und machen Klimaanlage notwendig. Statt einer massiven Variante wäre alternativ die Entwicklung von LISSY als Membran denkbar. Dies entspräche einer Reduzierung des Systems auf Wasserführende- und Verdunstungsschicht. Ein solches System könnte als Sonnenschutz mit integrierter Kühlung betrachtet werden.

Auf Grund der aufgetretenen Problemstellungen und technischen Herausforderungen, die sich im Prozess der Entwicklung von LISSY ergeben haben, ist dieses System bis jetzt als ein offenes Konzept und noch nicht als fertige Lösung zu betrachten. Die Biopolymere waren für die Entstehung des Projekts der essenzielle konzeptionelle Ausgangspunkt. Da sich gezeigt hat, dass diese die Weiterentwicklung des Projekts nicht mehr ausschlaggebend beeinflussen werden (Biopolymere könnten durch andere funktionellere synthetische oder mineralische Materialien ersetzt werden und umgekehrt), schließt die Diplomarbeit an dieser Stelle ab. In welche Richtung sich das Projekt weiterentwickelt wird sich anhand der Testergebnisse und in einem anschließend geplanten Expertengespräch mit Biologen und Physikern zeigen.



5 - LITERATURVERZEICHNIS

- 1 Angela Gewiese, **Kreislaufwirtschaft im Bauwesen**, Ernst & Sohn , 1998
- 2 Jörg Müssig, Michael Carus, **Bio-Polymerwerkstoffe sowie holz- und naturfaserverstärkte Kunststoffe in Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe Teil II**, Hg. von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow, 2007
- 3 Brockhaus F.A., **Der große Brockhaus**, 18. Aufl., Wiesbaden, F.A. Brockhaus 1983
- 4 Gruber Erich, **Polymerchemie: eine Einführung in die Chemie und physikalische Chemie der Makromoleküle**, Steinkopff Verlag, Darmstadt, 1980
- 5 E.S. Stevens, **Green Plastics – An Introduction to the New Science of Biodegradable Plastics**, Princeton University Press, Princeton, 2002
- 6 Birgit Riedel, **Die Geschichte der Kunststoffe im Bauwesen**, Diplomarbeit TU Wien, Wien, 1997
- 7 Walter Aichholzer, **Herstellung Verarbeitung sowie Charakterisierung von bioabbaubaren Verbundwerkstoffen auf Basis der nachwachsenden Rohstoffe, Stärke und Flachs'**, Institut für Kunststofftechnologie Universität Stuttgart, 1999
- 8 F.W. Mader, **Makromol. Chem. Macromol. Symp. 57**, 1992
- 9 R. Fehringer, P.H. Brunner, **Kunststoffflüsse und Möglichkeiten der Kunststoffverwertung in Österreich**, *Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie*, Wien, 1997
- 10 A. Jungbauer, **Recycling von Kunststoffen**, Vogel Verlag, Würzburg, 1994
- 11 O. Schwarz, F.W. Ebeling (Hg.), **Kunststoffkunde – Aufbau, Eigenschaften, Verarbeitung, Anwendungen der Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere**, Vogel Buchverlag, 9.Auflage, Würzburg, 2007
- 12 A. Franck, **Kunststoff-Kompodium**, Vogel Buchverlag, 4. Auflage, Würzburg, 1996
- 13 H. Domininghaus, **Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften**, Springer Verlag, 5. Auflage, Berlin, 1998
- 14 G.W. Ehrenstein, **Polymer-Werkstoffe: Struktur, Eigenschaften, Anwendung**, Carl Hanser Verlag, 2. Auflage, Wien, 1999
- 15 R. Gächter, H. Müller (Hg.), **Taschenbuch der Kunststoff-Additive: Stabilisatoren, Hilfsstoffe, Weichmacher, Füllstoffe, Verstärkungsmittel**, Carl Hanser Verlag, Wien, 1979
- 16 PlasticsEurope (Hg.), **The Compelling Facts About Plastics – An analysis of plastics production, demand and recovery for 2006 in Europe**, www.plasticseurope.or, 2008
- 17 H. Domininghaus (†), P.Elsner, P. Eyerer und T. Hirth (Hg.), **Kunststoffe – Eigenschaften und Anwendungen**, Springer Verlag, 7. Neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Berlin, Heidelberg, 2008
- 18 D.L. Kaplan (Hg.), **Biopolymers from Renewable Resources**, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998
- 19 K. Himmler, **Kunststoffe im Bauwesen**, Werner Ingenieur Texte, Düsseldorf, 1981
- 20 P. Seidler u.a., **Kunststoffe auf der Baustelle – Vergüten, Abdichten, Kleben, Schäumen, Sanieren**, Expert Verlag, Grafenau, 1982
- 21 E. Genzel und P. Voigt, **Kunststoffbauten Teil 1: Die Pioniere**, Universitätsverlag Weimar, Weimar, 2005
- 22 H. Saechtling, **Baustofflehre Kunststoffe für Bauingenieure und Architekten**, Carl Hanser Verlag, München Wien, 1975
- 23 M.Agstner, **Einsatz eines Polymer-Additives (Renolith) bei der Herstellung von Beton**, Diplomarbeit Universität Innsbruck, Innsbruck 2004
- 24 H.Andrä, R. Schneider, T.Wickbold, **Baustoff-Recycling: Arten, Mengen und Qualitäten der im Hochbau eingesetzten Baustoffe, Lösungsansätze für einen Materialkreislauf**, Ecomed Verlags Gesellschaft, Landsberg, Lech, 1994
- 25 V.K. Wadhawan, **Smart Structures – Blurring the Distinction Between the Living and the Nonliving**, Oxford University Press, Oxford, New York, 2007
- 26 A.K. Mohanty, M. Misra, L.T. Drzal, **Natural Fibers, Biopolymers and Biocomposites**, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2005
- 27 A. Steinbüchel (Ed.), **Biopolymers – Biology, Chemistry, Biotechnology, Applications, Volume 10: General Aspects and Special Applications**, Wiley-VCH, Weinheim, 2003
- 28 A. Tomm, **Ökologisch planen und bauen – das Handbuch für Architekten, Ingenieure, Bauherren, Studenten, Baufirmen, Behörden, Stadtplaner, Politiker**, 3. Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 2000

- 29 J. Spritzendorfer, **Nachhaltiges Bauen mit „wohngesunden“ Baustoffen**, C.F. Müller Verlag, Heidelberg, 2007
- 30 S. Kraft, N. Kuhnert, G. Uhlig, **Arch+ Zeitschrift für Architektur und Städtebau 41. Jahrgang – Form Follows Performance, Zur Wechselwirkung von Material, Struktur, Umwelt**, Arch+ Verlag GmbH, Aachen, Juli 2008
- 31 A. Steinbüchel (Hg.), **Biopolymers – 10 Volumes + Index**, Wiley-VCH, Weinheim, 1. Auflage April 2003
- 32 K. Teichmann, J. Wilke (Hg.), **Prozeß und Form „Natürlicher Konstruktionen“ – Der Sonderforschungsbereich 230**, Ernst & Sohn, Berlin, 1996
- 33 M. Boeckl (Hg.), **Visionäre & Vertriebene – Österreichische Spuren in der modernen amerikanischen Architektur**, Ernst & Sohn, Berlin, 1995
- 34 W. Scholz, W. Hiese (Hg.), **Baustoffkenntnis**, Werner Verlag, 15. Auflage, München Unterschleißheim, 2003
- 35 A. Steinbüchel (Ed.), **Biopolymers – Biology, Chemistry, Biotechnology, Applications, Volume 5: Polysaccharides I, Polysaccharides from Prokaryotes**, Wiley-VCH, Weinheim, 2002
- 36 A. Steinbüchel (Ed.), **Biopolymers – Biology, Chemistry, Biotechnology, Applications, Volume 6: Polysaccharides II, Polysaccharides from Eukaryotes**, Wiley-VCH, Weinheim, 2002
- 37 <http://de.wikipedia.org/wiki/Monosaccharide>
- 38 G. Tegge (Hg.), **Stärke und Stärkederivate**, B. Behr's Verlag, 3. Auflage, Hamburg, 2004
- 39 K. Eckert, **Biologisch abbaubarer Verbundwerkstoff aus Polycaprolacton, Thermoplastischer Stärke und Ramiefasern – Mechanische Eigenschaften und Abbauverhalten**, Dissertation Fachbereich 6, TU Berlin, 1997
- 40 Informationen über Chitosan - <http://www.voneinanderlernen.uni-kiel.de/typo3/index.php?id=30>
- 41 P. Börsch-Suppan, **Vom Krustentier zum Kunststoff – Herstellung und Optimierung von Werkstoffen aus Hummerschalen** (Bundeswettbewerb Jugend forscht 2003, Fachgebiet Chemie), Neustadt, 2003
- 42 S. Fakirov, D. Bhattacharyya, **Handbook of Engineering Biopolymers – Homopolymers, Blends, and Composites**, Carl Hanser Verlag, München, 2007
- 43 A. Steinbüchel (Ed.), **Biopolymers – Biology, Chemistry, Biotechnology, Applications, Volume 7: Polyamides and Complex Proteinaceous Materials I**, Wiley-VCH, Weinheim, 2003
- 44 A. Steinbüchel (Ed.), **Biopolymers – Biology, Chemistry, Biotechnology, Applications, Volume 8: Polyamides and Complex Proteinaceous Materials II**, Wiley-VCH, Weinheim, 2003
- 45 J. Markl, **Biologie (Originaltitel: Life – The Science of Biology)**, Elsevier GmbH, 7. Auflage, München, 2004
- 46 B.H.A. Rehm, **Microbial Bionanotechnology – Biological Self-assembly Systems and Biopolymer-based Nanostructures**, Horizon Bioscience, Wymondham, 2006
- 47 T. Shimizu, **Self-Assembled Nanomaterials – Nanofibers**, Springer, Berlin, Heidelberg, 2008
- 48 R. Rixom, N. Mailvaganam, **Chemical Admixtures for Concrete**, E&FN Spon, 3. Auflage, New York, 1999
- 49 <http://www.stud.uni-goettingen.de/~s193271/organikum/kap8b.htm>
- 50 from plants to plastic pdf
- <http://www.natureworksllc.com/about-natureworks-llc/from-plants-to-plastic.aspx> [50]
- 51 R. Smith (Ed.), **Biodegradable polymers for industrial application**, Woodhead Publishing Limited und CRC Press, Abington bzw. Boca Raton, 2005
- 52 A. Steinbüchel (Ed.), **Biopolymers – Biology, Chemistry, Biotechnology, Applications, Volume 9: Miscellaneous Biopolymers and Biodegradation of Polymers**, Wiley-VCH, Weinheim, 2003
- 53 European Commission Joint Research Centre Institute for Prospective Technological Studies, **Techno-economic Feasibility of Large-scale Production of Bio-based Polymers in Europe**, European Communities, Spanien, 2005
- 54 Nova Institut (Hg.), **Biowerkstoffreport Juni-Juli 2008**, Knapsack 2008
- 55 U. Riedel, J. Nickel, **Konstruktionswerkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (BioVerbunde)**, Referat, Braunschweig, 2001
- 56 Nova Institut GmbH (Hg.), **Gülzower Fachgespräche Band 26 - Studie zur Markt und Konkurrenzsituation bei Naturfasern und Naturfaser-Werkstoffen (Deutschland und EU)**, Gülzow, 2008
- 57 H.M. Fischer (u. andere), **Lehrbuch der Bauphysik - Schall Wärme Feuchte Licht Brand Klima**, B.G. Teubner Stuttgart, 1997, S.447
- 58 Mikrobielle Polythioester - mibi1.uni-muenster.de/Biologie.IMMB.Steinbuechel/Forschung/PTE.html
- 59 Nachricht zu NatureWorks LLC / Ingeo - http://www.plastemart.com/plasticnews_desc.asp?news_id=14414&P=P

- 60 Normung und Zertifizierung von BAK - <http://www.european-bioplastics.org/index.php?id=57>
- 61 Nachricht zur Preislage Biopolymere (24.2.2009)
<http://greenlight.greentechmedia.com/2009/02/24/bioplastics-close-in-price-to-regular-plastic-and-trader-joes-coco-nut-packages-1138/>
- 62 Kenndaten PCL - http://www.inaro.de/Deutsch/Suche_index.htm
- 63 Produktdatenblätter Soytherm 50, 100 und 170 via
<http://www.soyol.com/insul.htm>
- 64 Informationsbroschüre Rilsan PA11 via
http://www.arkema.com/sites/group/en/products/detailed_sheets/technical_polymers/rilsan_11/literature.page
- 65 Werkstoffkenndaten via
<http://www.tecnaro.de/deutsch/avsk.htm>
- 66 Kompetenznetz RIKO - Realisierung innovativer Konstruktionsstoffe aus NAWARO
http://www.riko.net/html/presse/presse_34.php3
- 67 Werkstoffkenndaten via
<http://www.omodo.org/the%20material%20Properties.htm>
- 68 Zeo International (Press Release) , Revolutionary Eco Material ist Changing our World,Mullumbimby (New South Wales), 2008
- 69 IHD (Hg.) Projektleiter Detlef Krug, Kurzdarstellung - Phenol-Protein-Hybrid als Bindemittel, Dresden
<http://www.ihd-dresden.de/index.php?id=218>, 2006
- 70 Produktdaten Mazzucchelli CA - http://www.mazzucchelli1849.it/newsite/inglese/ganuli/dat_tec_gran.htm
- 71 Produktdaten Mater-BI - <http://www.materbi.com/de/html/prodotto/tecnologie/indextecnologie.html>
- 72 Produktdaten Ingeo via
<http://www.natureworkslc.com/product-and-applications/ingeo-biopolymer/technical-resources.aspx>
- 73 Nature Works (Hg.), **Technology Rocus Report: Polylactic Acid Containing Fillers and Fibers**, Minnetoka, 2005
via www.natureworkslc.com

6 – ABBILDUNGSVERZEICHNIS

- Abb.1 Vergleich: Ahornblatt, Rissbild Porzellan, Strassennetz
Tafel 63 und 66, K. Teichmann, J. Wilke (Hg.), Prozeß und Form „Natürlicher Konstruktionen“ – Der Sonderforschungsbereich 230, Ernst & Sohn, Berlin,, 1996 [32]
- Abb.2 Polymerwerkstoffe - ambivalente Materialien
1 - <http://www.nasa.gov/directorates/esmd/home/inflatable-lunar-hab.html>
2 - <http://www.ksta.de/ks/images/mdsBild/1209911881149l.jpg>
3 - <http://rhein-zeitung.de/on/04/08/18/service/auto/i/rzo80114p0.jpg>
4 - <http://www.polybiwak.com/german/home/homestop.html>
- Abb.3 Ford, Sojakunststoff Prototyp
S.115, E.S. Stevens, Green Plastics – An Introduction to the New Science of Biodegradable Plastics, Princeton University Press, Princeton, 2002 [5]
- Abb.4 einfache Kohlenwasserstoffverbindungen
nach S.16ff, O. Schwarz, F.W. Ebeling (Hg.), Kunststoffkunde – Aufbau, Eigenschaften, Verarbeitung, Anwendungen der Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere, Vogel Buchverlag, 9.Auflage, Würzburg, 2007 [11]
- Abb.5 Schematischer Ablauf einer Polymerisation
nach S.27, Ebda [11]
- Abb.6 linear, verzweigter und vernetzter Molekülaufbau
nach S.23, A. Franck, Kunststoff-Kompendium, Vogel Buchverlag, 4. Auflage, Würzburg, 1996 [12]
- Abb.7 Nebenvalenzkräfte: Dispersions-, Dipol- und Induktionskräfte
nach S.36f O. Schwarz, F.W. Ebeling (Hg.), Kunststoffkunde – Aufbau, Eigenschaften, Verarbeitung, Anwendungen der Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere, Vogel Buchverlag, 9.Auflage, Würzburg, 2007 [11]
- Abb.8 Einschnckenextruder mit 3-Zonen Schnecke
S.160, A. Franck, Kunststoff-Kompendium, Vogel Buchverlag, 4. Auflage, Würzburg, 1996 [12]
- Abb.9 2-Stufen-Spritzstreckblasen
S.182, Ebda [12]
- Abb.10 Kunststoffe in der Architektur
1 - www.yesterland.com/futurehouse.html
Fotografie von Merrill A. Garner, 1958
2 - <http://www.flickr.com/photos/18605028@N00/6779661/>
3 - http://en.wikipedia.org/wiki/Image:National_Space_Centre,_Leicester.jpg
Fotografie von Ned Trifle, 3.6.2006
4 - http://blog.sina.com.cn/s/blog_483cf883010002vn.html
5 - http://www.stahl-info.de/images/Schnee_AllianzArena_Bild5_57888.jpg
6 - <http://www.architonic.com/imgAbt/foiltec/beijing.jpg>
- Abb.11 ganzheitliche Betrachtung - „lebende“ Strukturen
1 - S.44, S. Kraft, N. Kuhnert, G. Uhlig, Arch+ Zeitschrift für Architektur und Städtebau 41. Jahrgang – Form Follows Performance, Zur Wechselwirkung von Material, Struktur, Umwelt, Arch+ Verlag GmbH, Aachen, Juli 2008 [30]
Studentenprojekt „Reaktive Flächenstruktur“ von Steffen Reichert, die Elemente ändern ihre Form durch temperatur- und feuchtigkeitsbedingte Quell- und Schwindprozesse, Entwicklungsziel ist eine selbsttragende Flächenstruktur, die ihre Porosität der Luftfeuchtigkeit anpassen kann
2 – <http://www.espacioblog.com/myfiles/ortigueira/urbicanda.jpg>
3 - <http://www.arborsmith.com/treecircus.html> - vom schwedisch-amerikanischen „Arborbildhauer“ Axel Erlandson geformter Baum
4 – S.XII, M. Boeckl (Hg.), Visionäre & Vertriebene – Österreichische Spuren in der modernen amerikanischen Architektur, Ernst & Sohn, Berlin, 1995 [33]
- Abb.12 Substanzen in lebendem Gewebe
nach S.48, J. Markl, Biologie (Originaltitel: Life – The Science of Biology), Elsevier GmbH, 7. Auflage, Mün-

- chen, 2004 [45]
- Abb.13 Polysaccharide - Mehrfachzucker - ringförmig
nach S.87, 5 E.S. Stevens, Green Plastics – An Introduction to the New Science of Biodegradable Plastics, Princeton University Press, Princeton, 2002 [5]
- Abb.14 Cellulose Einblasdämmung
http://www.die-iso-flocker.de/info_allg.htm
- Abb.15 Weichholztracheid
S.293, D.L. Kaplan (Hg.), Biopolymers from Renewable Resources, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998 [18]
- Abb.16 Aufbringen von Spritzputz
DowWolff Cellulosics (Hg.), Construction Additives for Cement Render - The final touch for building materials, 2009
- Abb.17 Maniokwurzeln - Lieferant von Tapiokastärke - <http://de.wikipedia.org/wiki/Maniok>
- Abb.18 Elektronenmikroskopische Aufnahme von versch. Stärkesorten
S.30f, G. Tegge (Hg.), Stärke und Stärkederivate, B.Behr's Verlag, 3.Auflage, Hamburg, 2004 [38]
- Abb.19 Verpackungsmaterialien auf Stärkebasis - S.122f, 5 E.S. Stevens, Green Plastics – An Introduction to the New Science of Biodegradable Plastics, Princeton University Press, Princeton, 2002 [5]
- Abb.20 Porenbeton
S.661, A.K.Mohanty, Natural Fibers., CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2005 [26]
- Abb.21 Quelle zur Chitin/Chitosangewinnung: Garnelen - <http://de.wikipedia.org/wiki/Garnelen>
- Abb.22 Strukturformeln von Agarose und Karragen
S.89, Ebda [5]
- Abb.23 Labor zur Fermentation von Biopolymeren
http://www.brain-biotech.de/en/news_pictures.php?nID=0&page=15
- Abb.24 Pilz Sclerotium rolfsii zur Herstellung von Scleroglucan
http://www.brain-biotech.de/en/news_pictures.php?nID=0&page=15
- Abb.25 historische Zeichnungen Acacia Senegal und Johannisbrotbaum
Acacia Senegal: <http://pharm1.pharmazie.uni-greifswald.de/allgemei/koehler/koeh-eng.htm>
Johannisbrotbaum: <http://caliban.mpiz-koeln.mpg.de/~stueber/thome/index.html>
- Abb.26 grabenlose Bohroperation
S.69, A. Steinbüchel (Ed.), Biopolymers – Biology, Chemistry, Biotechnology, Applications, Volume 10: General Aspects and Special Applications, Wiley-VCH, Weinheim, 2003 [27]
- Abb.27 Proteinmaterialien
Spinnennetz: <http://de.wikipedia.org/wiki/Spinnennetz>
Geckel: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,495343,00.html>
- Abb.28 allgemeine Strukturformel von Proteinen
nach S.91, 5 E.S. Stevens, Green Plastics – An Introduction to the New Science of Biodegradable Plastics, Princeton University Press, Princeton, 2002 [5]
- Abb.29 strukturelle Hierarchie von Proteinen
S.467, S. Fakirov, D. Bhattacharyya, Handbook of Engineering Biopolymers – Homopolymers, Blends, and Composites, Carl Hanser Verlag, München, 2007 [42]
- Abb.30 typische Speisegelatineplatten
<http://www.marions-kochbuch.de/index-bilder/gelatine.jpg>
- Abb.31 Oberfläche einer Wollfaser, Längs- und Querschnittansicht einer Merinowollfaser
S.162, A. Steinbüchel (Ed.), Biopolymers – Biology, Chemistry, Biotechnology, Applications, Volume 8: Polyamides and Complex Proteinaceous Materials II, Wiley-VCH, Weinheim, 2003 [44]
- Abb.32 Schafwolldämmung (Isolena)
http://www.ecodesign-beispiele.at/data/art/73_5.php
- Abb.33 männliche Seidenspinnenraupe - <http://www.schmetterling-raupe.de/art/mori.htm>
Kokons - <http://en.wikipedia.org/wiki/File:lpek-kozasi.jpg>
- Abb.34 selbstnivellierende Ausgleichsmassen

- <http://www.thomsit.de/profi/home.cfm?p=1402>
http://www.concretedecor.net/All_Access/701/CD701-Product_News-MAPEI.cfm
- Abb.35 Sojapflanze, unreif und reif
<http://www.mpiz-koeln.mpg.de/oeffentlichkeitsarbeit/kulturpflanzen/Nutzpflanzen/Sojabohne/index.html>
- Abb.36 Maiskorn - S.538, S. Fakirov, D. Bhattacharyya, Handbook of Engineering Biopolymers – Homopolymers, Blends, and Composites, Carl Hanser Verlag, München, 2007 [42]
 Mais - <http://www.stst.at/000001986709fa002/0000009a86012a7a4/index.html>
 Weizen - <http://de.wikipedia.org/wiki/Weizen>
- Abb.37 PHB Einschlüsse in Alcaligenes eutrophus
 S.222, D.L. Kaplan (Hg.), Biopolymers from Renewable Resources, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998
- Abb.38 Produkte des brasilianischen PHB-Herstellers Biocycle
http://www.biocycle.com.br/foto_produtos.htm
- Abb.39 Polymerisation von PLA
 S.530, A.K.Mohanty, Natural Fibers..., CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2005 [26]
- Abb.40 PLA Produkte
 S.565, Ebda [26]
- Abb.41 Modellstrukturen von Lignin
 S.675, Ebda [26]
- Abb.42 Transportbetonwerk - <http://amos-bau.de/seiten/transportbeton.html>
 Einbringen von Transportbeton - http://www.georg-lampersberger.de/lg_transportbeton.htm
- Abb.43 Kautschukplantage - <http://de.wikipedia.org/wiki/Kautschukbaum>
 Latexgewinnung
http://online-media.uni-marburg.de/biologie/nutzpflanzen/carina/hevea_brasiliensis.htm
- Abb.44 cis 1,4 Polyisopren
 Ebda
- Abb.45 Kautschukprodukte
 Flaschensauger - <http://www.babytraeume.de/schnuller-mehr/flaschensauger-naturkautschuk-rund.htm>
 Winterreifen - <http://www.kfz-teile-service.de/tag/winterreifen>
 Latexhandschuhe - http://www2.westfalia.de/shops/gesundheit/krankenpflege/handschuhe/latex_handschuhe/420300-latexhandschuhe_puderfrei_s_.htm
- Abb.46 Schellack - de.wikipedia.org/wiki/Schellack
- Abb.47 Fettsäuren, Glycerin und Triacylglycerin
 nach S.99, E.S. Stevens, Green Plastics – An Introduction to the New Science of Biodegradable Plastics, Princeton University Press, Princeton, 2002 [5]
- Abb.48 Aufbau der DNA - nach S.67, J. Markl, Biologie (Originaltitel: Life – The Science of Biology), Elsevier GmbH, 7. Auflage, München, 2004 [45]
- Abb.49 Strukturformeln einiger biologisch abbaubarer Polymere
 nach S.47, E.S. Stevens, Green Plastics – An Introduction to the New Science of Biodegradable Plastics, Princeton University Press, Princeton, 2002 [5]
- Abb.50 schematischer Aufbau einer Faser, unterschiedliche Zellen in einem Flachsstamm
 S.14, S. Fakirov, D. Bhattacharyya, Handbook of Engineering Biopolymers – Homopolymers, Blends, and Composites, Carl Hanser Verlag, München, 2007 [42]
- Abb.51 schematischer Vergleich von Flachs-, Nessel- und Hanfstengelquerschnitten
 S.66, A.K.Mohanty, Natural Fibers..., CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2005 [26]
- Abb.52 Flachs - http://de.wikipedia.org/wiki/Gemeiner_Lein
 Hanf - <http://de.wikipedia.org/wiki/Hanf>
 Jute, Pflanze - <http://www.ag.ohio-state.edu/~news/files/jute.jpg>
 Jute, Faser - <http://www.bfafh.de/feindt/informationen/rohstoffe.htm>
 Kenaf, Pflanze - <http://de.wikipedia.org/wiki/Kenaf>
 Kenaf, Faser - <http://www.bfafh.de/feindt/informationen/rohstoffe.htm>

- Ramie, Pflanze - <http://de.wikipedia.org/wiki/Ramie>
- Ramie, Faser - http://www.dmtip.gov.tw/event/dye/en/04/04_1.htm
- Abb.53 Brennessel, Pflanze - <http://de.wikipedia.org/wiki/Brennesseln>
- Brennessel, Faser - http://www.swicofil.com/images/natural_fiber_nettle_processed_raw_puwa.jpg
- Sisal, Pflanze - <http://de.wikipedia.org/wiki/Sisal-Agave> (Foto: Achim Raschka)
- Sisal, Faser - <http://www.bfafh.de/feindt/informationen/rohstoffe.htm>
- Ananasfaser - <http://de.wikipedia.org/wiki/Ananas> (Foto: Jacob Rus)
- Abaca - <http://de.wikipedia.org/wiki/Abac%C3%A1> (Foto der Faser: Jürgen Steger)
- Ölpalme - <http://de.wikipedia.org/wiki/%C3%96lpalme>
- Baumwolle - <http://de.wikipedia.org/wiki/Baumwolle>
- Abb.54 Kokopalme - <http://de.wikipedia.org/wiki/Kokospalme>
- Kokosfaser - <http://home.sdirekt-net.de/mwelge5/kultur/images/kokosfaser.jpg>
- Abb.55 Keimling - <http://de.wikipedia.org/wiki/Biokunststoff>
- Abb.56 Entwicklungsstadien biobasierter Polymere
- S.121, European Joint Reserch Centre (Hg.), Techno-economic Feasibility of Large-scale Production of Bio-based Polymers in Europe, 2005 [53]
- Abb. 57 Dachschrägenanwendung Soytherm
- www.kidwellssprayfoam.com
- Abb.58 Auftragen von PUR Spritzschaum und Dachschrägenanwendung, Produkt Icynene
- 3rings.designerpages.com/2008/03/25/icynene
- Abb.59 Wunderbaum und Rizinussamen - <http://de.wikipedia.org/wiki/Wunderbaum>
- Spiralschlauch - <http://www.druckluftwerkzeug.biz/modules/wordbook/entry.php?entryID=12>
- Tourenschuh - <http://www.scialp.it/notizie/scarponi/dynafit/2008/d2008a.htm>
- Gasleitung - <http://www.arkema-inc.com/index.cfm?pag=863>
- Abb.60 Arboform Produkte - <http://www.tecnaro.de/deutsch/anwendung/anwendung.htm>
- Abb.61 Bioconcept Car
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hg.), Bioverbund Pressebilder, Gülzow, 2006
- Abb.62 Zelfo Produkte - <http://www.omodo.org/the%20material%20applications.htm>
- Abb.63 pPF gebundene Holzwerkstoff, IHD Projektleiter Detlef Krug, Kurzdarstellung - Phenol Protein Hybrid als Bindemittel für Holzwerkstoff Platten mit erhöhter Feuchtebeständigkeit, <http://www.ihd-dresden.de/index.php?id=218>, Dresden, 2006
- Abb.64 diverse CA Produkte
- Sonnenbrillengestell - http://www.tradeeasy.com/photo/seller/105255/lgraphic/1191806626238_6h349.jpg
- Würfel - <http://de.wikipedia.org/wiki/Celluloseacetat>
- Werkzeuggriff - http://81.3.5.165/linx/showcases_middle/1692.jpg
- Filmmaterial - <http://www.daicel.co.jp/business/img/1-1.jpg>
- Abb.65 Mater-Bi Produkte
- Einwegbesteck - http://www.novaenvirocom.ca/photosHR08/ustensiles_reusableHR.jpg
- Kugelschreiber - http://www.schuelbe.de/produkte/detailansicht/~17/?___cookiedetection___&auth=21c296b649bd69728e6d9
- Müllsack - <http://www.tetes-chercheuses.fr/images/img46432dba699de.jpg>
- geschäumte Lebensmittelverpackung - http://www.twanetwerk.nl/upl_images/10179_VaschetteSG7.jpg
- Mulchfolie - <http://www.materbiagro.com/ita/press/photogallery/img/zucchini.jpg>
- Abb.66 typische PLA Ingeo Produkte
- <http://www.natureworksllc.com/product-and-applications/ingeo-biopolymer.aspx>
- Toyota EcoPlastic - http://www.toyota.co.jp/en/environmental_rep/03/re06.html
- FKur Fibrolon - <http://www.fkur.de/?page=30>
- Abb.67 Sanyo Milddisc - <http://av.watch.impress.co.jp/docs/20030924/sanyo.htm>
- Abb.68 - 82 Urheber: Stefan Salchinger, 2009

7 – TABELLEN & DIAGRAMME

- Tab.1 Übersicht abgewandelter Naturstoffe im 19. Jh.
nach S.28, Birgit Riedel, Die Geschichte der Kunststoffe im Bauwesen, Diplomarbeit TU Wien, Wien, 1997 [6]
- Tab.2 und 3 Eigenschaften wichtiger Kunststoffsorten
nach Beilage 1, Tabelle 5-28. Übersicht von Kunststoffkennwerten, H. Dominghaus, P.Elsner, P. Eyerer und T. Hirth (Hg.), Kunststoffe – Eigenschaften und Anwendungen, Springer Verlag, 7. Neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Berlin, Heidelberg, 2008 [17]
- Tab.4 Biopolymere im Bauwesen
S.51, A. Steinbüchel (Ed.), Biopolymers – Biology, Chemistry, Biotechnology, Applications, Volume 10: General Aspects and Special Applications, Wiley-VCH, Weinheim, 2003 [27]
- Tab.5 Anwendungsgebiete von Celluloseethern im Bauwesen
nach S.65, Ebda [27]
- Tab.6 potentielle Anwendungen von Chitin und Chitosanprodukten
S.115, D.L. Kaplan (Hg.), Biopolymers from Renewable Resources, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998 [18]
- Tab.7 Anwendungen von Alginaten
S.141, Ebda [18]
- Tab.8 Vergleich mechanischer Eigenschaften von Gelatine gegenüber verschiedenen Polymeren
S.420, S. Fakirov, D. Bhattacharyya, Handbook of Engineering Biopolymers – Homopolymers, Blends, and Composites, Carl Hanser Verlag, München, 2007 [42]
- Tab.9 Eigenschaften verschiedener natürlicher und synthetischer Fasern im Vergleich
S.490, S. Fakirov, D. Bhattacharyya, Handbook of Engineering Biopolymers – Homopolymers, Blends, and Composites, Carl Hanser Verlag, München, 2007 [42]
- Tab.10 Kommerziell wichtige Faserrohstoffe
nach S.234, A.K. Mohanty, M. Misra, L.T. Drzal, Natural Fibers, Biopolymers and Biocomposites, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2005 [26]
- Tab.11 charakteristische Eigenschaften von pflanzlichen und synthetischen Fasern
nach S.40, Ebda[26]
- Tab.12 Zusammengefasste LCA Schlüsselindikatoren (gekürzt), nach S.841, Ebda [26]
- Tab.13 Marktanalyse über den Einsatz von Biopolymeren
S.104, Jörg Müssig, Michael Carus, Bio-Polymerwerkstoffe sowie holz- und naturfaserverstärkte Kunststoffe in Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe Teil II, Hg. von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow, 2007 [2]
- Tab.14 Marktanalyse über den Einsatz von NFK und WPC - S.172 Ebda [2]
- Tab.15 Biopolymere im Überblick, Stefan Salchinger, 2009
- Tab.16 Substitutionspotential biobasierter Kunststoffe
S.122, European Joint Reserch Centre (Hg.), Techno-economic Feasibility of Large-scale Production of Bio-based Polymers in Europe, 2005 [53]
- Tab.17 Substitutionspotential biobasierte Fasern
S.123, European Joint Reserch Centre (Hg.), Techno-economic Feasibility of Large-scale Production of Bio-based Polymers in Europe, 2005 [53]
- Diagr.1 Weltjahresproduktion von Kunststoffen
nach S.8, PlasticsEurope (Hg.), The Compelling Facts About Plastics – An analysis of plastics production, demand and recovery for 2006 in Europe, www.plasticseurope.or, 2008 [16]
- Diagr.2 Recycling und Verwertungsraten nach Ländern
nach S.15, Ebda [16]
- Diagr. 3 Verwertung von Kunststoffabfällen
nach S.13, Ebda [16]

- Diagr.4 Eigenschaftsbild amorpher Thermoplaste
nach S.45, O. Schwarz, F.W. Ebeling (Hg.), Kunststoffkunde – Aufbau, Eigenschaften, Verarbeitung, Anwendungen der Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere, Vogel Buchverlag, 9.Auflage, Würzburg, 2007 [11]
- Diagr.5 Eigenschaftsbild teilkristalliner Thermoplaste
nach S.46, Ebda [11]
- Diagr.6 Absatz (global) von Chemikalien an das Bauwesen
S.34, A. Steinbüchel (Ed.), Biopolymers – Biology, Chemistry, Biotechnology, Applications, Volume 10: General Aspects and Special Applications, Wiley-VCH, Weinheim, 2003 [27]
- Diagr.7 Natur- und Holzfaserkomposite in den USA
nach S.237, A.K. Mohanty, M. Misra, L.T. Drzal, Natural Fibers, Biopolymers and Biocomposites, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2005 [26]

