

Fa. Lehmorange, Altenstadt an der Waldnaab
Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen University

Entwicklung einer recycelbaren und ressourceneffizienten Bewehrung für Lehmbauplatten

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem AZ: 32126 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Herr Peter Gmeiner (Fa. Lehmorange) & Dr. Andreas Koch (ITA, RWTH)

Aachen, Mai 2018

Projektkennblatt

der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	32126	Referat	25	Fördersumme	113.590 €
----	--------------	---------	-----------	-------------	------------------

Antragstitel **Entwicklung einer recycelbaren
und ressourceneffizienten Bewehrung
für Lehmbauplatten**

Stichworte Lehmbau, Textilbewehrung, Recycling, Ressourceneffizienz

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
2 Jahre	01.06.2015	22.02.2018	
Endbericht	22.05.2018		

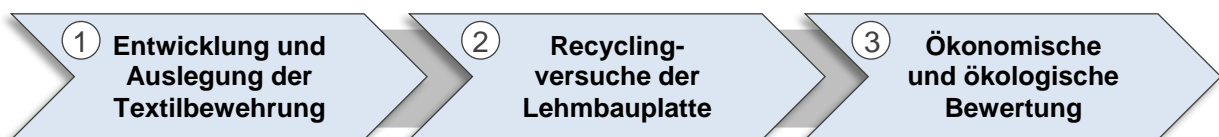
Bewilligungsempfänger	Fa. Lehmorange Reiserdorf 13 92721 Störnstein Deutschland	Tel +49 9602 939 0101
		Fax +49 9602 939 0106
		Projektleitung Herr Peter Gmeiner
		Bearbeiter Herr Sandro Troidl

Kooperationspartner Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen University
Otto-Blumenthal-Str. 1
52074 Aachen
Bearbeiter: Herr Andreas Koch
(Tel.: +49 241 80 23469, andreas.koch@ita.rwth-aachen.de)

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Das Forschungsziel des Projekts ist die Entwicklung einer neuen Textilbewehrung unter Betrachtung des Recyclingpotenzials bzgl. der Lehmbauplatten der Fa. Lehmorange. Neben der Verwendung von ökologisch hochwertigen Fasermaterialien (z. B. Naturfasern, PLA, Zellulosefasern, etc.) zur Ermöglichung einer biologischen Abbaubarkeit nach dem Lebenszyklus der Platte, wird auf eine ressourceneffiziente Auslegung dieser neuen Textilbewehrung geachtet. Dabei soll insbesondere eine Überdimensionierung verhindert werden, wie sie bei der aktuellen Lehmbauplatte (2 Lagen beschichtetes Glasfasertextil) vorliegt. Als Schwerpunkt des Forschungsvorhabens werden Recyclingversuche durchgeführt, bei denen vor allem das Recycling der Textilbewehrung im Fokus steht.

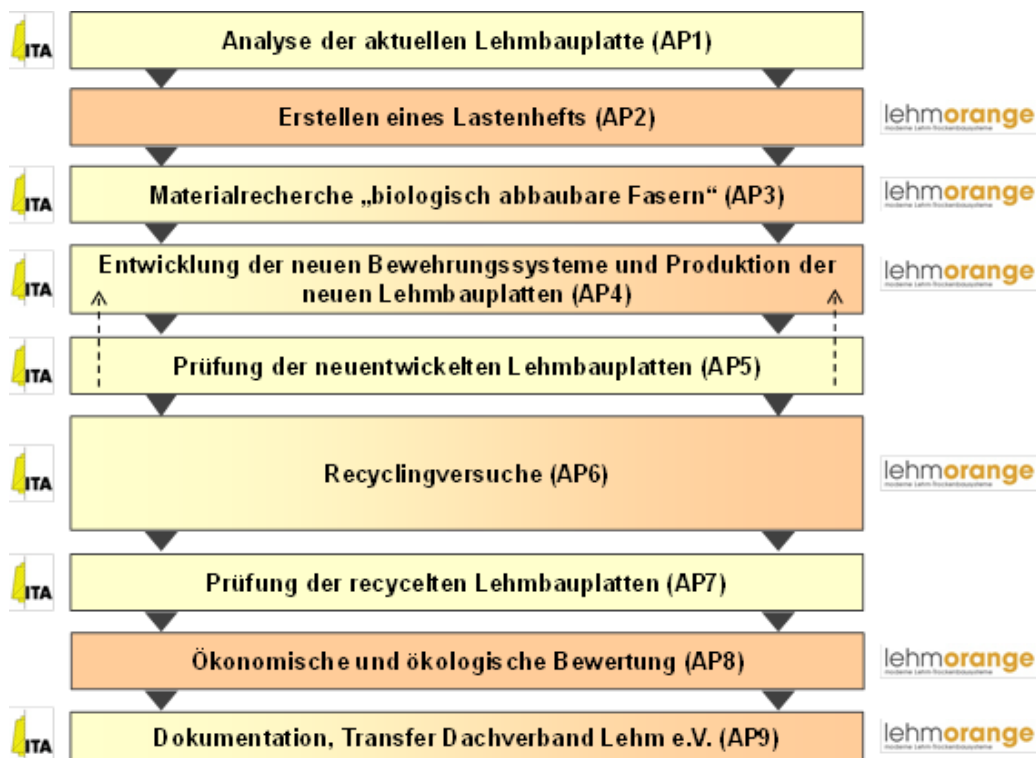
Zum Abschluss des Forschungsprojekts wird das neuentwickelte Bewehrungstextil aus ökonomischer und ökologischer Sicht mit dem aktuell eingesetzten Textil verglichen und ein Vergleich zu marktüblichen Trockenbausystemen (z. B. mit einer Rigipsplatte) durchgeführt.



Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Auf Basis einer umfangreichen Analyse der aktuellen Lehm- bauplatte (AP1, u. a. Biegezugfestigkeit mittels 4-Punkt-Biegeversuch), werden im zweiten Schritt die Produktziele definiert und in Form eines Lastenhefts festgehalten (AP2). Anschließend wird eine Analyse durchgeführt, welche Faserarten die in AP2 festgehaltenen Ziele ermöglichen und als Fasermaterial für die textile Bewehrung eingesetzt werden können. Die wichtigen Kriterien sind hierbei: Gute Ökobilanz, Beständigkeit in der Matrix Lehm, ausreichende mechanische Eigenschaften, Verarbeitbarkeit in der Textilherstellung und Recycelfähigkeit (AP3). In AP4 werden dann die neuen textilen Bewehrungsstrukturen entwickelt und Prototypen hergestellt. Im Anschluss werden diese textilen Bewehrungsstrukturen für die Herstellung einer neuen Lehm- bauplatte genutzt (AP4). Nachdem eine Kleinserie erfolgreich hergestellt werden kann, erfolgt eine erneute Prüfung der mechanischen Eigenschaften der neuen Lehm- bauplatte. Die Ergebnisse werden im Anschluss mit den Ausgangswerten (aus AP1) verglichen und bewertet. Fällt die Bewertung positiv aus, d. h. die Ergebnisse sind mindestens gleichwertig, werden im Anschluss Recyclingversuche durchgeführt (AP6). Dabei wird versucht die textilen Bewehrungsstrukturen mittels Herausschwämmen der Lehm- matrix wiederzugewinnen und erneut in den Herstellungsprozess einzubringen. Bevor die wiedergewonnenen Textilstrukturen erneut eingesetzt werden, werden diese auf Beschädigungen hin überprüft. Nachdem erfolgreichen Recycling werden erneut die Lehm- bauplatten mit dem recycelten Bewehrungstextil auf ihre mechanischen Eigenschaften hin untersucht. Abschließend wird noch eine ökonomische und ökologische Bewertung im Vergleich zu marktüblichen Systemen durchgeführt und der Transfer der Ergebnisse (z. B. in Hinblick auf den Dachverband Lehm e.V.) vorbereiten.

Im Folgenden sind nochmals alle Arbeitsschritte skizziert:



Ergebnisse und Diskussion

Im DBU-Projekt LehmTex wurden insgesamt 13 biologisch abbaubare Bewehrungslösungen entwickelt. Diese basierten sowohl auf Kurzfaser-, als auch auf Textillösungen. Alle Bewehrungslösungen wurden zur Herstellung von Demonstratorplatten genutzt und im Anschluss auf ihre Biegezugfestigkeit getestet. Alle erzielten Ergebnisse wurden zum einen mit der aktuellen „Standardplatte“ der Fa. Lehmorange und zusätzlich zu einer marktrelevanten Rigipsplatte verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass einzelnen Bewehrungslösungen die geforderte Biegezugfestigkeit der „Standardplatte“ fast vollständig erreichten (knapp 80 % der ursprünglichen Biegezugfestigkeit). Diesbezüglich ist zu beachten, dass der Vergleichswert der „Standardplatte“ kein geforderter Zielwert ist. Ein Zielwert wird aktuell im Normungsausschuss des Dachverbands Lehm diskutiert und demnächst festgelegt.

Auch die Herstellungsmethodik der textilbewehrten Lehmbauplatten hat einen großen Einfluss auf die Biegezugfestigkeit der hergestellten Platten, da sie über die Lagentreue und den Streckungszustand der textilen Bewehrung entscheidet. Beides hat einen enormen Einfluss auf die letztendlich erzielte Biegezugfestigkeit. Lösungsansätze zur Optimierung der Lehmplattenherstellung wurden zwischen der Fa. Lehmorange und ITA diskutiert und bieten eine Möglichkeit das Thema im Zuge eines Folgeprojekts ziel führend abzuschließen

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Idee und die Ergebnisse des DBU-Projekts LehmTex wurden über viele unterschiedliche Wege veröffentlicht, hierzu zählen u.a.:

- Flyer, Infopräsentationen des ITA
- Auftritte auf Messen (u.a. TechTextil/Frankfurt, JEC/Paris, etc.)
- Präsentationen im Zuge von Firmenterminen, die am Thema „Textiles Bauen“ (ökologische Bauweisen auf Textilbasis) interessiert waren/sind
- Posterveröffentlichungen (u.a. IHK Aachen Bauen21)

Fazit

Das DBU-Projekt LehmTex konnte der Fa. Lehmorange alternative Bewehrungslösungen aufzeigen, die nah an die Vergleichswerte der nicht biologisch abbaubaren Lehmbauplatte heranreichen. Mittels Modifikationen im Herstellungsverfahren (ggf. über einen Spannrahmen) können die geforderten Zielwerte mit den neu entwickelten Bewehrungskonzepten erzielt werden. Die Ergebnisse des DBU-Projekts fließen direkt über die Fa. Lehmorange und ihren Geschäftsführer, Herr Gmeiner, in den Dachverband Lehm e.V. mit ein.

Inhalt

Projektkennblatt	2
1. Einleitung	6
2. Zeitplanung	8
3. Ergebnisse zur Untersuchung der aktuellen Lehmbauplatte (AP1)	9
4. Lastenheft zur ökologisch hochwertigen, textilbewehren Lehmbauplatte (AP2)	12
5. Biologisch abbaubare Fasermaterialien (AP3)	14
6. Neue Bewehrungssysteme und Produktion der neuen Lehmbauplatten (AP4)	23
7. Prüfergebnisse der neuen Lehmbauplatte (AP5)	26
8. Recyclingversuche (AP6) und Prüfergebnisse der recycelten Lehmbauplatte (AP7)	28
9. Ökonomische und Ökologische Bewertung (AP8)	30
10. Nutzbarkeit für den Dachverband Lehm e.V. (AP9)	32
11. Zusammenfassung und Ausblick	32
12. Literatur- bzw. Quellenverzeichnis	32

Der vorliegende Abschlussbericht ist in Zusammenarbeit folgender Projektpartner entstanden und enthalten alle erzielten Projektergebnisse:

Kooperationspartner 1 Fa. Lehmorange
D-92721 Störnstein / Bayern
Geschäftsführer: Peter Gmeiner

Kooperationspartner 2 RWTH Aachen University
Institut für Textiltechnik (ITA)
D-52074 Aachen / NRW
Institutsleitung: Univ.-Prof. Prof. h.c. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries

1. Einleitung

Das Forschungsziel des Projekts ist die Entwicklung einer neuen Textilbewehrung unter Betrachtung des Recyclingpotenzials bzgl. der Lehmbauplatten der Fa. Lehmorange.

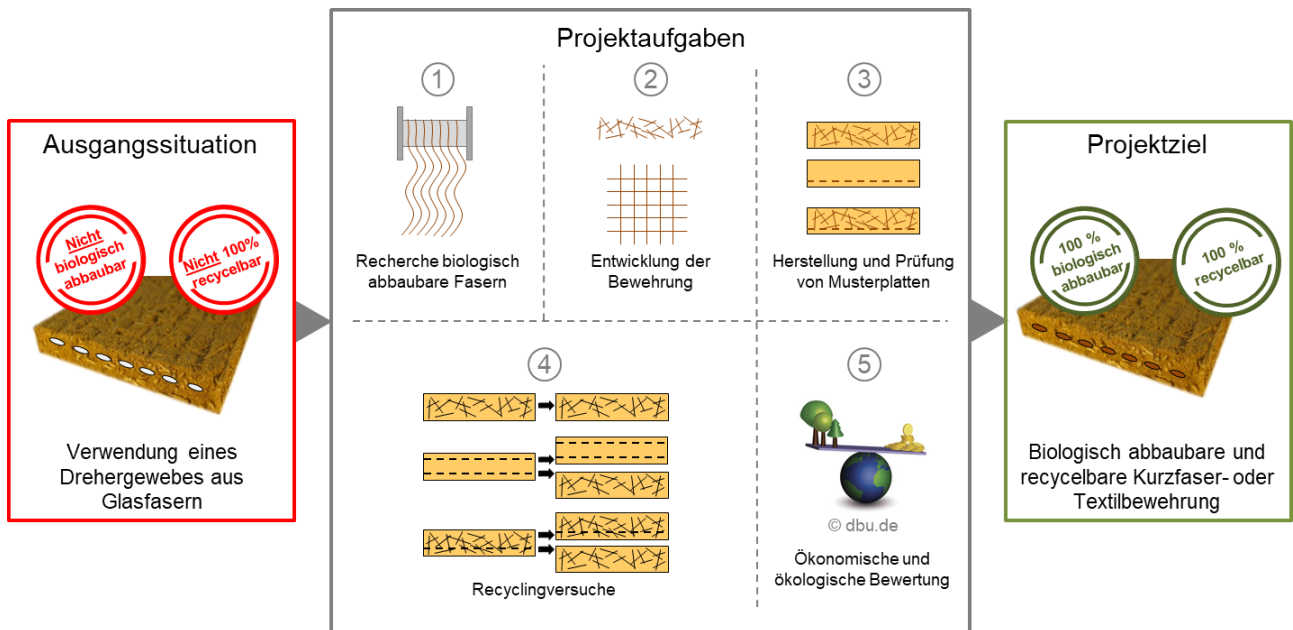


Abbildung 1: Zentrales Bild des DBU-Projekts LehmTex

Neben der Verwendung von ökologisch hochwertigen Fasermaterialien (z. B. Naturfasern, PLA, Zellulosefasern, etc.) zur Ermöglichung einer biologischen Abbaubarkeit nach dem Lebenszyklus der Platte, wird auf eine ressourceneffiziente Auslegung dieser neuen Textilbewehrung geachtet. Dabei soll insbesondere eine Überdimensionierung verhindert werden, wie sie bei der aktuellen Lehmbauplatte (2 Lagen beschichtetes Glasfasertextil) vorliegt. Zum Abschluss des Forschungsprojekts wird das neuentwickelte Bewehrungstextil aus ökonomischer und ökologischer Sicht mit dem aktuell eingesetzten Textil verglichen und ein Vergleich zu marktüblichen Trockenbausystemen (z. B. mit einer Rigipsplatte) durchgeführt.

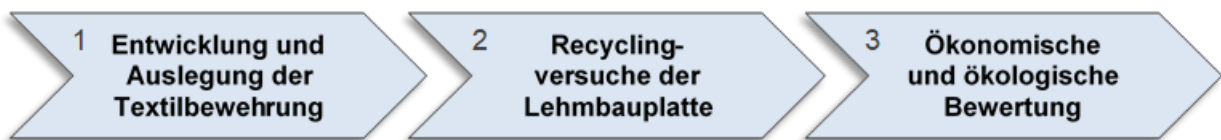


Abbildung 2: Teilprojektschritte des DBU-Projekt LehmTex

Zur Bestimmung der statischen Gebrauchstauglichkeit werden vor allem die Biegezugfestigkeit und die Stoßfestigkeit im Zuge der Auslegung ermittelt. Eine besondere Herausforderung liegt bei der Anpassung der Bewehrung auf alle Produkttypen der Fa. Lehmorange. Diesbezüglich bietet

die Fa. Lehmorange neben der Basisplatte auch Klimaelemente (integrierte Aluminiumverbundrohre), Heizelemente (integriertes Carbonfaservlies) und Lehmbauplatten mit PCM (passiv, aktiv und plus) an.

Das DBU-Projekt LehmTex verfolgt folgende Innovationen:

(1) Biologische Abbaubarkeit

Durch die Entwicklung einer biologisch abbaubaren Bewehrung kann die Fa. Lehmorange ihre Lehmbauplatte als „100% biologisch abbaubar“ deklarieren. Aufgrund der immer stärkeren Ausrichtung der Baubranche auf ökologische Bauprodukte, ist dieses Forschungsvorhaben für die Fa. Lehmorange ein wichtiger Schritt ihre zukünftige Wettbewerbsfähigkeit sicherzustellen. Momentan sind nur wenige Lehmbauplatten mit einer biologisch abbaubaren Textilbewehrung auf dem Markt erhältlich. Dabei bieten diese Hersteller (z. B. Fa. CLAYTEC, Fa. Pilosith, Fa. ProCrea, Fa. Conluto) lediglich eine Basisplatte an und verfügen nicht über funktionsintegrierte Produkte (wie z. B. Klima- oder Heizplatten) der Fa. Lehmorange. Zudem wird das Thema „Recycling der textilen Bewehrung“ noch nicht betrachtet.

(2) Aufbau eines Recyclingprozesses

Neben dem Recycling der Lehmmatrix wird im Zuge des Forschungsvorhabens auch das Recycling der Textilbewehrung betrachtet. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Untersuchung, ob und in welcher Weise eine Textilbewehrung erneut in den Herstellungsprozess eingebaut werden kann. Die Fa. Lehmorange wird diesbezüglich in Zusammenarbeit mit dem ITA der RWTH Aachen University Recyclingversuche bzgl. der textilbewehrten Lehmbauplatte durchführen. Dabei wird sowohl eine Zweitnutzung der recycelten Textilbewehrung, als auch eine nachfolgende Zerkleinerung und Nutzung als Kurzfaserbewehrung betrachtet.

(3) Ökonomische und ökologische Bewertung

Aufbauend auf den Recyclingversuchen wird eine ökonomische und ökologische Bewertung durchgeführt, um einen direkten Vergleich zur aktuellen Lehmbauplatte und zu marktüblichen Systemen (z. B. Rigipsplatte) zu ermöglichen. Dabei kann zur ökonomischen Bewertung die Zielkostenrechnung (engl. Target-Costing-Method) und zur ökologischen Bewertung das Bewertungssystem für nachhaltiges Bauen (BNB) genutzt werden. Der Aufbau eines Recyclingprozesses sollte sich diesbezüglich sowohl ökonomisch, als auch ökologisch für die Fa. Lehmorange auszahlen.

(4) Nutzbarkeit für den Dachverband Lehm e.V.

Bezüglich der gewonnenen Erkenntnisse/ Resultate aus dem vorliegenden Forschungsprojekt besteht die Möglichkeit diese an den Dachverband Lehm e.V. weiterzuleiten und für das Normungsverfahren (laufender Prozess) zu nutzen. Aktuell existiert noch keine Normung für Lehmbauplatten, die explizit auf die Anforderungen einer Lehmbauplatte im Einsatz als Trockenbausystem eingeht. Als Verbandsmitglied erklärt sich die Fa. Lehmorange bereit die Ergebnisse des Forschungsprojekts zu teilen und in das zukünftige Normungsverfahren des Dachverbands Lehm e.V. einzubringen.

Im folgenden Abschlussbericht werden die Ergebnisse des DBU-Projekts LehmTex beschrieben. Die Ergebnisbeschreibung erfolgt entlang des Arbeitsplans und der durchgeführten Arbeitspakete. Dabei wird jedes Arbeitspaket einer „IST-SOLL-Analyse“ unterzogen und ausführlich begründet, warum ggf. vom geplanten Arbeitsprogramm abgewichen worden ist.

2. Zeitplanung

Das DBU-Projekt LehmTex (geplante Laufzeit: 06.2015 bis 05.2017, 24 Monate) startete mit dem Kick-off-Meeting am 22.06.2015 bei der Fa. Lehmorange in Störnstein. Folgender Zeitplan lag zu Beginn des Forschungsprojekts vor:

Arbeitspakete		Partner	2015												2016												2017				
			Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Feb.	Mär.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Feb.	Mär.	Apr.	Mai					
AP 1	Untersuchung/ Analyse der aktuellen Lehmbauplatte	ITA																													
AP 2	Erstellen eines Lastenhefts	Fa. Lehmorange					M1																								
AP 3	Materialrecherche "biologisch abbaubare Fasern"	ITA/ Fa. Lehmorange																													
AP 4	Entwicklung der neuen Bewehrungssysteme und Produktion der neuen Lehmbauplatten	ITA/ Fa. Lehmorange													M2																
AP 5	Prüfung der neuentwickelten Lehmbauplatten	ITA																							M3						
AP 6	Recyclingversuche	ITA/ Fa. Lehmorange																													
AP 7	Prüfung der recycelten Lehmbauplatten	ITA																													
AP 8	Ökonomische und ökologische Bewertung	Fa. Lehmorange																													
AP 9	Dokumentation, Transfer Dachverband Lehm e.V.	ITA/ Fa. Lehmorange																													

Abbildung 3: Zeitplan zum Stand 06.2015

Folgende Meilensteine wurden vor Projektbeginn festgelegt:

- (1) Materialrecherche abgeschlossen – 09.2015
- (2) Mechanische Eigenschaften der Lehmbauplatte erzielen die Vorgaben aus dem Lastenheft – 05.2016
- (3) Die Recyclingversuche können erfolgreich abgeschlossen werden – 11.2016

Der Zeitplan des DBU-Projekts LehmTex konnte leider nicht eingehalten werden. Eine Laufzeitverlängerung wurde in Abstimmung mit dem Förderträger beantragt und bewilligt. Die Gründe hierfür hatte Herr Gmeiner, Geschäftsführer Fa. Lehmorange, der DBU schriftlich mitgeteilt. Das Projekt wurde kostenneutral verlängert und endet fristgerecht zum 22.02.2018.

Alle geplanten Arbeitspakete wurden wie geplant durchgeführt, außer AP6 „Recyclingversuche“ und AP7 „Prüfung der recycelten Lehmbauplatten“. Grund hierfür war eine notwendige Ausweitung des AP4 „Entwicklung der neuen Bewehrungssysteme und Produktion der neuen Lehmbauplatten“. Die Entwicklung eines neuen biologisch abbaubaren Textilbewehrungssystems stellte sich als aufwendiger heraus, als plant. Der Versuchsumfang musste deutlich erweitert werden, sodass die Produktion und Beschaffung unterschiedlicher textiler Bewehrungssysteme und die Herstellung unterschiedlicher Lehmbauplatten durchgeführt werden konnte. Die Entwicklung einer biologisch abbaubaren Bewehrung, die die geforderten Eigenschaften erfüllt, war das Hauptziel des Projekts und stand im Fokus der Fa. Lehmorange.

3. Ergebnisse zur Untersuchung der aktuellen Lehmbauplatte (AP1)

Im ersten Schritt wurde zur Vergleichbarkeit die aktuelle Lehmbauplatte der Fa. Lehmorange ausführlich untersucht. Im Fokus stand vor allem das PVC-beschichtete Glas-Drehergewebe der Fa. Vitrulan (Marktschorgast), das als Textilbewehrung aktuell eingesetzt wird (s. Abbildung 4, links).

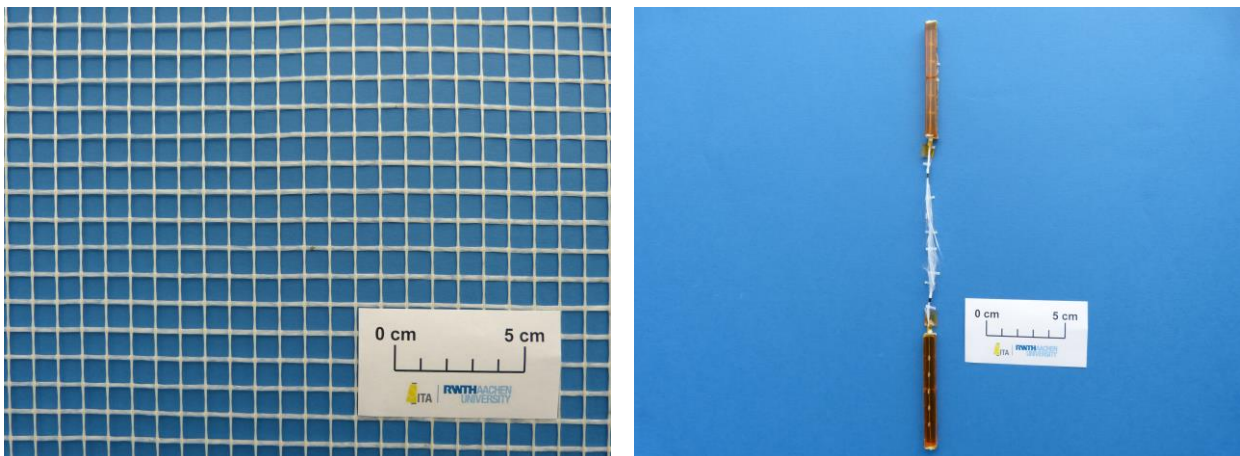


Abbildung 4: Bild Vitrulan Drehergewebe (links), Garnzugprobe eines herauspräparierten Kettfadens

Zur Charakterisierung des Bewehrungstextils wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

- (1) Bestimmung der Garnfeinheit in Kett- und Schussrichtung (in tex)
- (2) Bestimmung des textilen Flächengewichts (in g/m^2)
- (3) Bestimmung der Garnzugfestigkeit in Kett- und Schussrichtung (in N/mm^2)

Ergebnisse der Bestimmung der Garnfeinheit

Die Prüfungen zur Bestimmung der Garnfeinheit erfolgten nach DIN 53830 Tl. 3 und wurden am 29.09.2015 im ITA-Prüflabor durchgeführt. Die Garnfeinheit in Kettrichtung beträgt ~ 817,5 tex (Mittelwert) und in Schussrichtung ~ 715,3 tex. Alle Einzelergebnisse sind den nachfolgenden Tabellen zu entnehmen.

Tabelle 1: Ergebnisse der Garnfeinheitsbestimmung

Proben-Nr.	Masse [mg]	Feinheit Tt	Proben-Nr.	Masse [mg]	Feinheit Tt
1	84,8000	848,000	1	70,8000	708,000
2	80,4000	804,000	2	71,6000	716,000
3	81,1000	811,000	3	73,2000	732,000
4	81,7000	817,000	4	70,5000	705,000
5	82,4000	824,000	5	70,1000	701,000
6	84,6000	846,000	6	71,7000	717,000
7	83,1000	831,000	7	73,3000	733,000
8	77,9000	779,000	8	70,4000	704,000
9	79,0000	790,000	9	72,1000	721,000
10	82,5000	825,000	10	71,6000	716,000
x	81,75000	817,500	x	71,53000	715,300
s	2,23271	22,327	s	1,11560	11,156
v	2,73115	2,731	v	1,55962	1,560
w	1,59566	15,957	w	0,79729	7,973

Ergebnisse der Bestimmung des textilen Flächengewichts

Die Prüfungen zur Bestimmung des textilen Flächengewichts erfolgten nach DIN EN 12127 und wurden am 29.09.2015 im ITA-Prüflabor durchgeführt. Das Flächengewicht beträgt demnach ~ 145 g/m² (Mittelwert).

Tabelle 2: Ergebnisse der Flächengewichtsbestimmung

Proben-Nr.	Proben-gewicht m [g]	Flächen-gewicht M [g*m ⁻²]
1	1,50620	150,62
2	1,41820	141,82
3	1,45290	145,29
4	1,43840	143,84
5	1,43290	143,29
x	1,44972	144,97
s	0,0339	3,39
v	2,34	2,34
w	0,042	4,22

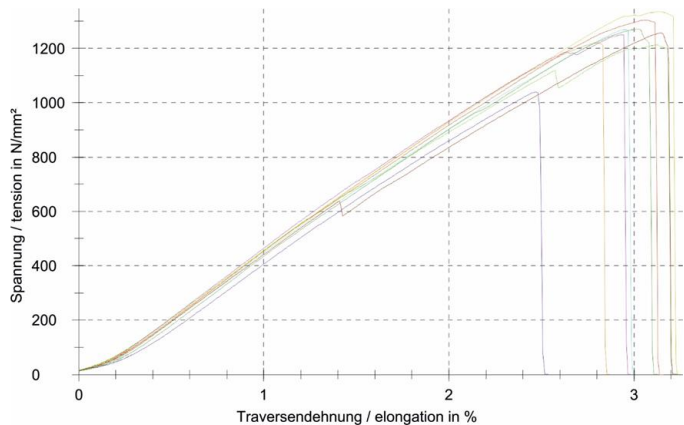
Ergebnisse der Bestimmung der Garnzugfestigkeit in Kett- und Schussrichtung

Die Bestimmung der Garnzugfestigkeit erfolgte in Anlehnung zur DIN EN ISO 2062. Im Zuge der Prüfvorbereitungen wurden jeweils 10 Kett- und 10 Schussfäden aus dem Drehergewebe herauspräpariert und auf ihre Zugfestigkeit getestet. Hierfür werden die Faserenden in Epoxidharz eingebettet und in die Prüfmaschine am ITA eingeklemmt (s. Abbildung 4, rechts).

Die Garnzugfestigkeit in Kettrichtung beträgt ~ 1265 N/mm² (Mittelwert, s. Abbildung).

Legende	Nr	A mm ²	F _{max} N	F _{max} N/mm ²	F _{max} Traverse %	Extensometer %	Klemmenbruch
	1	0,3053	379	1242,69	3,0	1,80	nein
	2	0,3053	398	1304,04	3,1	2,50	ja
	3	0,3053	371	1213,96	3,1	2,38	ja
	4	0,3053	317	1039,55	2,5	2,05	nein
	5	0,3053	372	1219,68	2,8	2,26	ja
	6	0,3053	382	1251,27	2,9	2,32	ja
	7	0,3053	387	1269,28	3,0	2,39	ja
	8	0,3053	408	1335,25	3,1	2,61	ja
	9	0,3053	384	1256,50	3,1	2,39	nein
	10	0,3053	388	1271,05	3,0	2,43	ja

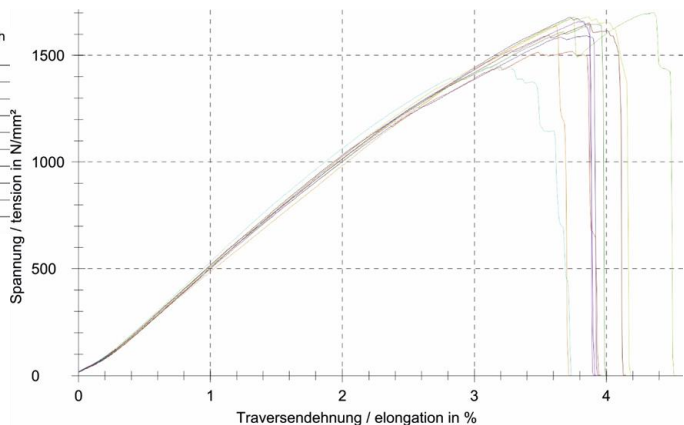
Serie	A mm ²	F _{max} N	F _{max} N/mm ²	F _{max} Traverse %	Extensometer %
n = 8					
x	0,3053	386	1265,13	3,0	2,41
s	0,0000	12,3	40,42	0,1	0,11
	0,00	3,19	3,19	3,89	4,42
P(μ) = 0,95	0,3053	376	1231,33	2,9	2,32
P(μ) = 0,95	0,3053	397	1298,92	3,1	2,50
min	0,3053	371	1213,96	2,8	2,26
max	0,3053	408	1335,25	3,1	2,61



Die Garnzugfestigkeit in Schussrichtung beträgt ~ 1622 N/mm² (Mittelwert, s. Abbildung).

Legende	Nr	A mm ²	F _{max} N	F _{max} N/mm ²	F _{max} Traverse %	Extensometer %	Klemmenbruch
	1	0,2671	406	1518,32	3,7	3,17	nein
	2	0,2671	454	1700,62	4,4	2,90	nein
	3	0,2671	425	1592,88	3,8	3,13	nein
	4	0,2671	438	1638,02	3,6	2,74	nein
	5	0,2671	443	1658,20	3,8	2,90	nein
	6	0,2671	389	1455,42	3,2	3,05	nein
	7	0,2671	449	1680,47	3,9	2,89	nein
	8	0,2671	441	1651,62	3,9	2,89	nein
	9	0,2671	440	1646,55	3,9	3,16	nein
	10	0,2671	448	1678,90	3,7	2,88	nein

Serie	A mm ²	F _{max} N	F _{max} N/mm ²	F _{max} Traverse %	Extensometer %
n = 10					
x	0,2671	433	1622,10	3,8	2,97
s	0,0000	20,9	78,34	0,3	0,15
	0,00	4,83	4,83	7,77	4,93
P(μ) = 0,95	0,2671	418	1566,06	3,6	2,87
P(μ) = 0,95	0,2671	448	1678,14	4,0	3,08
min	0,2671	389	1455,42	3,2	2,74
max	0,2671	454	1700,62	4,4	3,17



Zusätzlich zur Charakterisierung des Bewehrungstextils wurde die Biegezugfestigkeit der textilbewehrten Lehmbauplatte bestimmt (geprüfte Plattendicken: 16 und 20 mm). Auch diese Werte dienen zum späteren Vergleich der mechanischen Eigenschaften der neu entwickelten Lehmbauplatte. Die Biegezugfestigkeit wurde am ITA in Anlehnung an die DIN EN 1170-5 bestimmt. Im Folgenden ist der Prüfaufbau vor (links) und nach (rechts) der Prüfung bildlich dargestellt. In Kettrichtung wurde eine Biegezugfestigkeit von ~ 1,92 N/mm² (16 mm) und ~ 1,71 N/mm² (20 mm) erzielt, in Schussrichtung wurde ein Wert von ~ 1,25 N/mm² (16 mm) und ~ 0,91 N/mm² (20 mm) ermittelt.



Abbildung 5: Prüfaufbau vor (links) und nach (rechts) dem 4-Punkt-Biegeversuch nach DIN EN 1170-5

4. Lastenheft zur ökologisch hochwertigen, textilbewehrten Lehmbauplatte (AP2)

Das gesamte Lastenheft wurde in einem separaten Dokument festgehalten und umfasst insgesamt 9 DIN A4 Seiten. Im Folgenden ist das Lastenheft als Bildschau dargestellt.

lehmorenge®
moderne Lehm-Trockenbausysteme

Lastenheft

Entwicklung einer recycelbaren und ressourceneffizienten Bewehrung für Lehmbauplatten

Autor des Dokuments	Sandra Trödel	Erstellt am	20.08.2019
Version	1	Erstellt am	
Seitenzahl	1	Lehmorenge	

Vorlage Lastenheft

Historie der Dokumentversionen

Version	Datum	Autor	Änderungsgrund / Bemerkungen
1	20.08.2019	Sandra Trödel	Erstellung

Inhaltsverzeichnis

- 1 Ausgangssituation 3
- 2 Zielsetzung 5
- 3 Produkteinsatz 6
- 4 Anforderungen an die Lehmbauplatte 6
 - 4.1 Technische Anforderungen 6
 - 4.2 Funktionale Anforderungen 7
 - 4.3 Nichtfunktionale Anforderungen 7
- 5 Projektaufgaben und Meilensteine 8
 - 5.1 Projektaufgaben 8
 - 5.2 Meilensteine 8

Seite 2 von 9

Vorlage Lastenheft

1 Ausgangssituation

Die Fa Lehmorenge ist Hersteller von Lehmbauplatten für den Bereich „Trockenbauwerk“. Diese werden i. d. R. als Wandbauelement genutzt (siehe Abbildung 1) und zeichnen sich vor allem durch ihre guten bauphysikalischen Eigenschaften (wie z. B. Regulierung der Raumluftfeuchte) aus. Die Lehmbauplatten orientieren sich dabei an den Anforderungen des Trockenbaus (z. B. dem Standardmaß 1,25 x 0,625 m).

Abbildung 1: Wandbau mit einer Lehmbauplatte als Trägermaterial

Dabei benötigt die Lehmbauplatte nur eine leichte Unterstruktur und ist einfach und vielfältig einsetzbar. Die am häufigsten genutzte konstruktive Lösung ist als Trockenbauweise (einstufig und vergleichbar mit einer Rippsplatte). In Abbildung 2 ist eine solche Lehmbauplatte und ein Referenzprodukt der Fa Lehmorenge dargestellt.

Abbildung 2: Eine Platte der Fa Lehmorenge (links), Referenzprodukt Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Berlin (rechts)

Die Lehmbauplatte vereint viele bauphysikalische Vorteile, die ihre Nutzung im Innen-Raumbereich rechtfertigt. Tabelle 1 zeigt einen Auszug der wichtigsten Vor- und Nachteile einer Lehmbauplatte der Fa Lehmorenge.

Seite 3 von 9

Vorlage Lastenheft

Tabelle 1: Auszug der wichtigsten Vor- und Nachteile einer Lehmbauplatte

Vorteile (+)	Nachteile (-)
<ul style="list-style-type: none"> • Luftwärmehaltigkeitswert • gutes Schalldämmvermögen • gute Wärmespeicheranforderungen • wasserdampfdurchlässig • Neutralisation von Luftschadstoffen • elektrostatisch neutral • Absorption von Gerüchen • Lehm ist recycelbar • geringer Primärenergieaufwand i. d. Herstellung • Abstimmung elektromagnetischer Strahlung 	<ul style="list-style-type: none"> • nicht zu 100% biologisch abbaubar, aufgrund der Nutzung eines beschichteten Glasfasernetzes • Recyclingprozess umfasst bisher nur die Lehmanteile. Eine Behandlung des Restabfalls der eingesetzten Textilbewehrung wurde bislang nicht durchgeführt • Relativ hohes Gewicht bei größeren Plattenformaten (keine einfache Handhabung möglich)

Der größte Nachteil aus ökologischer Sicht ist die aktuelle Verwendung eines beschichteten Dreiergitters aus Glas, welches die Zugkräfte innerhalb der Lehmbauplatte aufnimmt und verhindert, dass die Gesamtstruktur als biologisch abbaubar eingestuft werden kann. Der Vorteil ist der sehr hohe Verbund zwischen der sehr sandigen und grobkörnigen Lehmanteile und der glatten Oberfläche des beschichteten Dreiergitters Grund für eine notwendige Weiterentwicklung (Rezyklierperspektive).

Seite 4 von 9

Vorlage Lastenheft

2 Zielsetzung

Das Forschungsziel des Projekts ist die Entwicklung einer neuen Textilbewehrung unter Betrachtung des Recyclingcharakters der Lehmbauplatte der Fa Lehmorenge. Neben der Verwendung von biologisch hochwertigen Fasermaterialien (z. B. Naturfasern, PLA, Zellulosefasern, etc.) zur Erreichung einer biologischen Abbaubarkeit nach dem Lebenszyklus der Platte, wird auf eine ressourceneffiziente Auslegung dieser neuen Textilbewehrung geachtet. Dabei soll insbesondere eine Überdimensionierung verhindert werden, um sie bei der aktuellen Lehmbauplatte (2) liegen beschriebene Charakteristika) mittels als Schwerpunkt des Forschungsprojekts werden Rezyklierperspektive durchgeföhrt, bei denen vor allem das Recycling der Textilbewehrung im Fokus steht.

Durch die Entwicklung einer biologischen abbaubaren Bewehrung kann die Fa Lehmorenge ihre Lehmbauplatte als „100% biologisch abbaubar“ und „100% recycelbar“ abbilden. Aufgrund der immer stärkeren Ausrichtung der Bauwirtschaft auf ökologische Aspekte, ist dieses Forschungsprojekt für die Fa Lehmorenge ein wichtiger Schritt ihre zukünftige Wettbewerbsfähigkeit sicherzustellen.

Rechtlich der gewöhnliche Eisenbeton-Druckstein aus dem vorliegenden Forschungsprojekt besteht die Möglichkeit diese an dem Dachverband Lehm e.V. anzubieten und für das Normungsverfahren (Beginn voraussichtlich 2021) zu nutzen. Aktuell existiert noch keine Normung für Lehmbauplatten, die erfüllt die Anforderungen einer Lehmbauplatte im Einsatz als Trockenbauelement ergibt. Als Verantwortlicher erhebt sich die Fa Lehmorenge bereit die Ergebnisse des Forschungsprojekts zu teilen und in das zukünftige Normungsverfahren des Dachverbands Lehm e.V. einzubringen.

Seite 5 von 9

Vorlage Lastenheft

3 Produkteinsatz

Die neue Lehmbauplatte soll sowohl im Neubau als auch bei Altbau- und Renovierungen zum Einsatz kommen. Eingesetzt wird sie bei Herstellern von Hochhäusern, Passivhäusern, Massivhäusern, Wandergewächshäusern, Wintergärten und geschützten Skalen. Dort soll die Lehmbauplatte bei Treppenhäusern (einstufig und doppelt beplattet) und bei Decken (gerade Decken und Dachträgern) zum Einsatz kommen. Aufgrund ihrer bauphysikalischen Eigenschaften wird die Lehmbauplatte ausschließlich im Innenbereich eingesetzt.

4 Anforderungen an die Lehmbauplatte

4.1 Technische Anforderungen

- Abmessungen: Entsprechend dem üblichen Trockenbau-Maßstab
- Angeordnetes Flächengewicht - 24kg
- Rohdichte < 1.400 kg/m³
- Spez. Wärmekapazität Cp: ca. 1,0 kJ/kgK
- Wärmefähigkeit Lambda: ca. 0,47 W/mK
- Brandverhalten: Klassifizierung A1. Nicht brennbar nach DIN EN 13501-1
- Schalldämmwert (Lehmbauplatte 2x 22mm)
- 61dB bei einer 15cm starken Lehm Trennwand (Holzständer)
- 63dB bei einer 15cm starken Lehm Trennwand (Holzständer)
- Biegezugfestigkeit > Ergebnis des Biegezugs an der Basis-Lehmbauplatte (AP1)
- Zugfestigkeit > 4-Minuten
- Druckfestigkeit > 2,5N/mm²
- Durchschlagsdrucke: ca. 2-3 nach 10 Luftschläge

Seite 6 von 9

Vorlage Lastenheft

4.2 Funktionale Anforderungen

- Einfache Handhabung und Montage (vergleichbar mit Rippsplatte)
- Eine relativ große Oberfläche (bei vollständiger Putzhaftung nötig)
- Ausreichende Stützfähigkeit (Transportfähigkeit)
- Eignung als Putzträger
- Ausreichend hohe Festigkeit für die Befestigung von Klebeflexen (z.B. Bilder)

4.3 Nichtfunktionale Anforderungen

Die neue Lehmbauplatte soll zu 100% biologisch abbaubar und 100% recycelbar sein. Es sollen auch keine gesundheitlichgefährdenden Stoffe enthalten sein (z.B. VOCs). Der angezielte Zielpreis soll den aktuellen Preis möglichst nicht übersteigen.

Um eine problemlose Montage der neuen Lehmbauplatte auch weiterhin sicherzustellen und kostenintensiver Reklamationsverfahren vorbeugen müssen die Maßtoleranzen: Dicke = 1,5mm, Länge = 2mm, Breite = 1,5mm, Diagonalflexion = ... kann auch mit dem neuen Bewehrungssystem eingehalten bzw. verbessert werden.

Eine besondere Herausforderung liegt bei der Anpassung der neuen Bewehrung auf alle Produkttypen der Fa Lehmorenge. Diesbezüglich bietet die Fa Lehmorenge neben der Basplatte auch Klebbausteine (integrierte Abzweigungsstruktur), Hochreize (integrierte Carbonfasern-Vlies) und Lehmbauplatten mit PCM (passiv, aktiv und inert) an.

Das neue Bewehrungssystem soll sich in einem zukünftigen automatisierten Produktionsprozess problemlos integrieren lassen.

Seite 7 von 9

Vorlage Lastenheft

5 Projektaufgaben und Meilensteine

5.1 Projektaufgaben

Um die angestrebten Ziele zu erreichen sind folgende Projektaufgaben vorgesehen:

Abbildung 3: Projektaufgaben

5.2 Meilensteine

M1: Der erste Meilenstein steht am Ende der Projektaufgabe 1 (Festlegung biologisch abbaubarer Fasern). Die Zugfestigkeit des aktuell verwendeten beschichteten Dreiergitters aus Glas wird von der Fa Lehmorenge für Textilbeton und Lehm für Textilbeton (siehe Anhang) überprüft. Die Ergebnisse dieser Untersuchung dienen als Leitfaden für die benötigte Zugfestigkeit der neuen Textilbewehrung. Um einen ökonomischen Einsatz der neuen Bewehrung zu erreichen muss der Verbund mit der Lehmanteile durch eine neue Oberfläche verbessert werden. Weitere Anforderungen sind die biologische Abbaubarkeit, die einfache Handhabbarkeit, die Verfügbarkeit auf dem Markt, die Reproduzierbarkeit, die Qualitätssicherung und der Preis. Sollte keine der recherchierten Fasermaterialien die Anforderungen erfüllen gilt die Materialrecherche als erfolglos.

M2: Der zweite Meilenstein steht am Ende der Projektaufgabe 3 (Herstellung und Prüfung von Mustern). Die mechanischen und textilen Eigenschaften der neuen Mustern werden mit den Werten der Basis-Lehmbauplatte (definiert unter 4.) verglichen. Sollte keine der Mustern die Anforderungen erfüllen gilt die Herstellung und Prüfung von Mustern als erfolglos.

Seite 8 von 9

Vorlage Lastenheft

M3: Der dritte Meilenstein steht am Ende der Projektaufgabe 4 (Rezyklierperspektive). Die mechanischen und textilen Eigenschaften der Lehmbauplatte aus recyceltem Material werden mit den Werten der Ausgangssituation verglichen. Sollte die Lehmbauplatte aus recyceltem Material die Anforderungen nicht erfüllen gelten die Rezyklierperspektive als erfolglos.

Seite 9 von 9

Für die weitere Bearbeitung des Projekts waren vor allem die Anforderungslisten aus dem Lastenheft von besonderer Bedeutung, da klare Zielwerte definiert wurden, die es im weiteren Projektverlauf zu erzielen galt. Diese Anforderungslisten sind im Folgenden aufgeführt:

Technische Anforderungen

- Abmessungen: Entsprechend den üblichen Trockenbau-Massen
- Angestrebtes Plattengewicht: < 24 kg
- Rohdichte: < 1.400 kg/m³
- Spez. Wärmekapazität Cp: ca. 1,0 kJ/kgK
- Wärmeleitfähigkeit Lambda: ca. 0,47 W/mK
- Brandverhalten: Klassifizierung A1. Nicht brennbar nach DIN EN 13501-1
- Schalldämmwert (Lehm-Platte 2 x 22mm)
61dB bei einer 10cm starken Lehm Trennwand (Holzständer)
63dB bei einer 15cm starken Lehm Trennwand (Holzständer)
- Biegezugfestigkeit: > Ergebnis des Biegeversuchs an der Basis-Lehm-Platte (AP1)
- Zugfestigkeit: >0,4 N/mm²
- Druckfestigkeit: >2,5 N/mm²
- Gleichgewichtsfeuchte: ca. 2 - 3 nach rel. Luftfeuchte

Funktionale Anforderungen

- Einfache Handhabung und Montage (vergleichbar der Rigipsplatte)
- Ebene malerfertige Oberfläche (kein vollflächiger Putzauftrag nötig)
- Ausreichende Stoßfestigkeit (Transportfestigkeit)
- Eignung als Putzträger
- Ausreichend hohe Festigkeit für die Befestigung von Kleinteilen (z.B. Bilder)

Wirtschaftliche Anforderungen

- Zielkosten der biologisch abbaubaren Textilbewehrung: < 1,5 €/m²

5. Biologisch abbaubare Fasermaterialien (AP3)

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise erklärt, nach der die Fasermaterialien ausgewählt wurden. Es wird zudem ein Überblick über die verschiedenen, biologisch abbaubaren Fasermaterialien gegeben. Es werden dazu Angaben zum Anbau (Pflanzenfasern) und der Herstellung (synthetisch hergestellter Fasern) gemacht.

Recherchemethode

Zunächst wurde nach potentiellen Faserpflanzen gesucht. Dazu wurde vor allem Literatur zum Pflanzenbau genutzt. Die Pflanzen werden unter faserliefernden Pflanzen aufgeführt. Als zweiter Schritt ist nach Fasern und Garnen aus Pflanzenfasern gesucht worden. Dazu sind Suchbegriffe wie „Pflanzenfasern“, „Hersteller Pflanzenfaser“, „Garne und eine Pflanze“ oder einzelne Faserpflanzen in eine Suchmaschine eingegeben worden. Des Weiteren sind in Handelsplattformen die verschiedenen Faserarten eingegeben worden. Mit den dortigen Filtern wurde die Suche eingeschränkt auf verschiedene Produkttypen oder Herkunftsländern. Bei den Synthetischen Fasern wurde ebenfalls zu erst nach Rohstoffen gesucht. Dazu sind zum einen Internetsuchmaschinen und zum anderen Fachliteratur hinzugezogen worden. Die mechanischen Eigenschaften stammen aus den Angaben der gefundenen Hersteller oder aus der genannten Literatur.

Ergebnisse der Naturfaser-Recherche

Folgende Naturfaserarten sind generell für das DBU-Projekt LehmTex interessant:

Baumwolle, Flachs, Hanf, Jute, Manilahanf, Sisal

1. Baumwolle

Die gewonnenen Fasern sind die Samenhaare der Baumwollpflanze (*Gossypium* spp.). Baumwollpflanzen sind mehrjährige Stauden, die in den Tropen und Subtropen angebaut werden. Der Saattermin ist in den Tropen der Beginn der Regenzeit und in den Subtropen das Frühjahr. Da Baumwolle anfällig gegenüber Schädlingen und Unkräutern ist, sind Pflanzenschutzmaßnahmen wichtig. Zudem sollte Baumwolle in trockenen Gegenden bewässert werden, da sie zu Beginn einen hohen Wasserbedarf hat. Kalium-Düngung (K) wirkt sich auf die Faserqualität sehr positiv aus. Stickstoff (N) sollte nicht zu viel gedüngt werden, da es sonst zu unerwünschtem vegetativem Wachstum kommt. Die Ernte erfolgt aufgrund der ungleichmäßigen Ernte in mehreren Durchgängen und meist mit der Hand. Der Ertrag liegt bei bis zu 2,5t/ha Rohbaumwolle. Die Rohbaumwolle muss noch aufbereitet werden. [Rei12], [Geo10]

2. Flachs

Flachsfasern sind Fasern, die aus der Leinpflanze (*Linum utisatissimum*) gewonnen werden. Sie gehören zu den Bastfasern. Lein ist eine Sommerfrucht und wird von Ende März bis Mitte April ausgesät. Aufgrund der langsamen Jugendentwicklung ist Lein anfällig für Verunkrautung. Die wichtigste Pflegemaßnahme im Leinanbau ist daher die Unkrautbekämpfung, wobei eine unkrautunterdrückende Vorfrucht hilfreich sein kann. Geerntet wird im Stadium der Gelbreife, also wenn die Stängel der Leinpflanzen gelb gefärbt sind. Der Zeitpunkt liegt etwas drei Monate nach der Saat. Lein wird gerauft und dann zur Röste einige Wochen auf dem Feld belassen. Während diese Zeit greifen Mikroorganismen die Stängel der Pflanzen an und erleichtern damit das spätere Abtrennen der Fasern. Außer der Röste auf dem Feld gibt es noch die Möglichkeiten der Kaltwasserröste und der Warmwasserröste, sowie chemisches Auflösen der Pektine. Die besten Ergebnisse werden aber mit der beschriebenen Tauröste auf dem Feld erzielt. Nach der Röste müssen die Fasern durch Brechen und Schwingen von den Holzteilen getrennt werden. Der so gewonnene Schwungflachs muss noch durch sogenanntes Hecheln zu feineren Fasern verarbeitet werden. Das bedeutet, dass die Flachsfasern gründlich gekämmt werden. Nach diesen Schritten ist die Faser so aufbereitet, dass sie versponnen werden kann [Lüt13] (nach [Ges551], [Iri12]).

3. Hanf

Aus den Stängeln der Hanfpflanze (*Cannabis sativa*) werden die Fasern gewonnen. Hanf ist eine einjährige Pflanze, die in den gemäßigten Breiten angebaut wird. Die Aussaat sollte zwischen Mitte April und Ende Mai erfolgen. Pflegemaßnahmen müssen kaum getroffen werden, da die Jugendentwicklung sehr schnell ist. Dadurch hat Hanf eine unkrautunterdrückende Wirkung. Nach dem Mähen werden die geernteten Pflanzen, für zwei bis drei Wochen, auf dem Feld belassen für die Röste. Anschließend werden die Fasern abgetrennt und aufbereitet. Der Ertrag an Trockenmasse (TM) liegt etwa bei 8-10 t/ha, der reine Faserertrag etwa bei 2t/ha. [Iri12], [Rei12]

Der Anbau wird jedoch erschwert, da die Bestimmungen des Betäubungsmittelgesetzes (BtMG), hinsichtlich der Größe der Fläche und Versicherung eingehalten werden muss. Bis zum 1. Juli. des Anbaujahres ist der Hanfanbau mit dem entsprechenden Formular bei der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) an zu zeigen [www1].

4. Jute

Jutefasern sind Bastfasern und stammen aus der Rinde der Stängel der Jutepflanze (*Corchorus capsularis*) [Iri12]. Jute ist eine tropische Pflanze. Sie wird einjährig angebaut und unmittelbar vor der Regenzeit ausgepflanzt [Ges551]. Der Bedarf an Düngemitteln ist im Juteanbau nicht besonders hoch. Der Stickstoffbedarf 35 kg/ha, an Kalium und Phosphor werden jeweils 45 kg/ha gegeben. Allerdings ist der Anbau sehr arbeitsintensiv [KAT13], [FAO13].

Geerntet wird etwa vier Monate nach der Pflanzung, wenn die Pflanzen in der Blüte stehen. Die Stängel werden dicht über dem Boden abgeschnitten und kommen dann zur Röste in fließendes Wasser. Die Röst-Zeit beträgt bis zu 10 Tage, da das Wasser in den Tropen warm ist, dadurch wird das Auflösen der Pektine beschleunigt [Ges551]. Die Fasern werden nun vom Stängel abgeschält und von Resten befreit. Die gereinigte Jutefaser wird dann getrocknet. Nach dem Trocknen sind die Fasern aber noch nicht spinnfähig. Sie müssen durch Besprenkeln mit einer Mischung aus Wasser, Petroleum und Öl geschmeidig gemacht werden. Der Faserertrag unterscheidet sich je nach Anbauregion. In den letzten Jahren ist der Faserertrag von etwa 16 dt/ha auf 19 dt/ha in Indien und auf 18 dt/ha in Bangladesch gestiegen [FAO13].

5. Manilahanf

Manilahanf ist die Faserbanane (*Musa textilis*), deren Fasern aus den Blattscheiden gewonnen werden und auch Abacá-Fasern genannt werden. Die Faserbanane ist eine bis zu acht Meter hohe Staude, die tropisches Tiefland Klima benötigt. Die Nutzungsdauer beträgt 10-15 Jahre. Bei der Neuanlage einer Plantage werden die Schösslinge auf einer frisch gerodeten Fläche gepflanzt. Faserbananen benötigen nur wenig Pflege, da sie mit anderen Pflanzen in Mischkultur angebaut werden und später den Boden beschatten. Durch diese beiden Bedingungen stellt sich eine unkrautunterdrückende Wirkung ein. Bei Blühbeginn werden die Blätter geerntet, indem sie dicht an der Basis abgeschnitten werden. Die freigelegten Leitbündelscheiden werden aus den Blättern getrennt und von fleischigen Teilen befreit. Nach dem Trocknen an der Sonne liegen die Fasern vor. [Geo10], [Rei12]

6. Sisal

Sisalfasern werden aus den Blättern der Sisalagave (*Agava sisalana*) gewonnen. Die Sisalagave ist eine Mehrjährige Pflanze, sie ist 12 Jahre nutzbar und stirbt im letzten Jahr nach der Fruchtreife. Sisalagaven werden vegetativ vermehrt, der Pflanztermin ist etwa vier bis sechs Wochen vor Beginn der Regenzeit. Die Düngung ist unter anderem von Alter der Pflanze abhängig. In 5 Jahren werden 250 kg/ha K gegeben. Stickstoffdüngung führt zu einer Ertragsteigerung. Der Abfall der Faserproduktion ist ein guter Dünger, die Aufbereitung ist allerdings sehr teuer. Geerntet wird ab einer Pflanzengröße von etwa 1,5m. Die Blätter werden dicht am Stamm abgeschnitten und die scharfe Blattspitze wird entfernt. Die Fasern werden aus den noch frischen Blättern gelöst und durch Bearbeitung geschmeidig gemacht. [Geo10], [Rei12]

Zusammenfassung der Naturfasern

Auf der folgenden Seite sind alle in Frage kommenden Naturfaserarten tabellarisch aufgeführt und deren Eigenschaften beschrieben.

Name dt.	Lein	Jute	Hanf	Baumwolle	Sisalagave	Mania Hanf
Name wiis.	<i>Linum utississimum</i>	<i>Corchorus capsularis</i>	<i>Cannabis sativa</i>	<i>Gossypium ssp.</i>	<i>Agava sisalane</i>	<i>Musa textilis</i>
Habitus	Sommer-frucht		einjährig	mehnjährige Staude	mehnjährig	Staude
Temperatur opt.	Wärmesumme 1600-1800°C	27-32°C	Wärmesumme 1800-2000°C	25-27°C	Min. 16°C Max. 27-32°C	27-29°C
NS opt.	>100mm	1500mm		800-1000mm	1200-1700mm	3000-4000m
Höhe				bis 1500m		
Boden	tiefgründige sandige Lehme gute Wasserführung keine Staunässe pH 6-7/5-6	Lehm-sandiger Lehm pH 6-7	tiefgründig Humos N-reich gute Wasserversorgung keine Staunässe keine Verdichtung pH 5,8-6	tiefgründig gut durchlüftet gute Wasserhaltekapazität kein Salz pH 6-8	flachgründige kalkhaltige gute Nährstoffversorgung/ vorräte locker keine Staunässe kein Salz pH 6-7	tiefgründig locker gute Wasserhaltekapazität
Heimat/Anbau		Indien Pakistan	gemäßigt bis subtropisch	semiaride Gebiete	tropische-subtropische Gebiete Amerikas	Philippinen Tropen
Saat	Ende März-Anfang April		Mitte April-Mitte Mai	Beginn Regenzeit in Tropen Frühjahr in Subtropen		
Pflanzung					4-6 Wochen vor Regenzeit	
Pflege	Unkrautbekämpfung Schädlingsbekämpfung im Keimlingsstadium	relativ unanfällig gegenüber Krankheiten und Schädlinge	wenig, da gute Unkrautunterdrückung	Anfällig gegen Unkraut und Schädlinge, evtl. Bewässerung	Schutz vor Krankheiten	kaum Pflege, wenn Bodendecker
Düngung	N-Sollwert 100kg/ha, bei ausreichender Versorgung keine Grunddüngung		N 160kg/ha, bei ausreichender Versorgung keine Grunddüngung	K,P förderlich, nicht zu viel N	N gut für Ertrag K 250kg in 5 Jahren	
Nährstoffentzug		65kg N, 13kg P, 130kg K für 2t/ha				280N, 30P, 517K kg/100t
Ernte	Gelbreife		Vollblüte-Blühende	4-5 Monate nach Aussaat Reife ungleich-mäßig	bei 1,5m Pflanzengröße	1,5-3 Jahre nach Pflanzung bei Blütenerscheinen dann alle 4-6 Monaten
Ertrag						
Ertrag	55-75dt/ha Röstflachs 14,5% Langfaser 10% Kurzfaser	1,5 t/ha	2 t/ha	1,6 t/ha	2,8 t/ha	1,2-5t/ha
Pflanzenteil	Stängel	Stängel	Stängel	Samenkapself mit Samenhaaren	Blätter	Blätter
Nutzungsdauer			einjährig		12 Jahre nutzbar	10-15 Jahre

Herkunft der Naturfasern

Ein weiterer interessanter Aspekt der Faserverfügbarkeit sind die Anbauregionen der verschiedenen Faserpflanzen. Es sind die größten Produktionsländer für die jeweiligen Faserpflanzen aufgeführt. Dies ermöglicht einen interessanten Überblick über die große Breite der Anbauggebiete. Für die Bewertung der Verfügbarkeit ist dies wichtig. Die untenstehende Karte zeigt die größten Anbauregionen der verschiedenen Faserpflanzen.

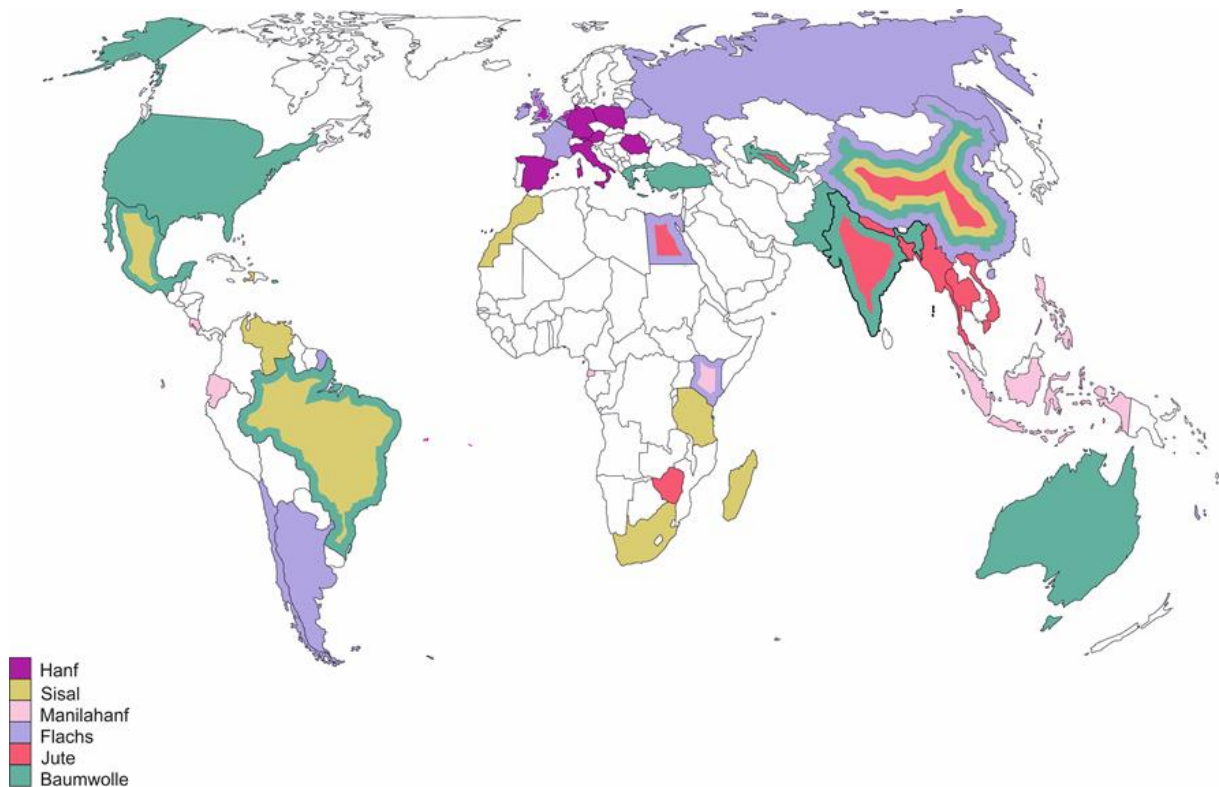
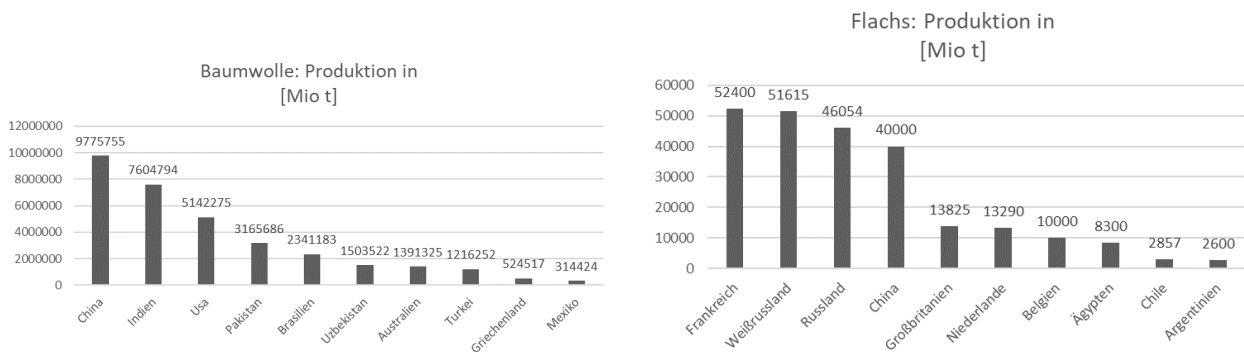


Abbildung 6: Anbauregionen unterschiedlicher Naturfasern

Im folgenden Abschnitt werden die Herstellländer nach Naturfaserart quantifiziert, um die Hauptproduzenten und die Produktionsverteilung ersichtlich zu machen.



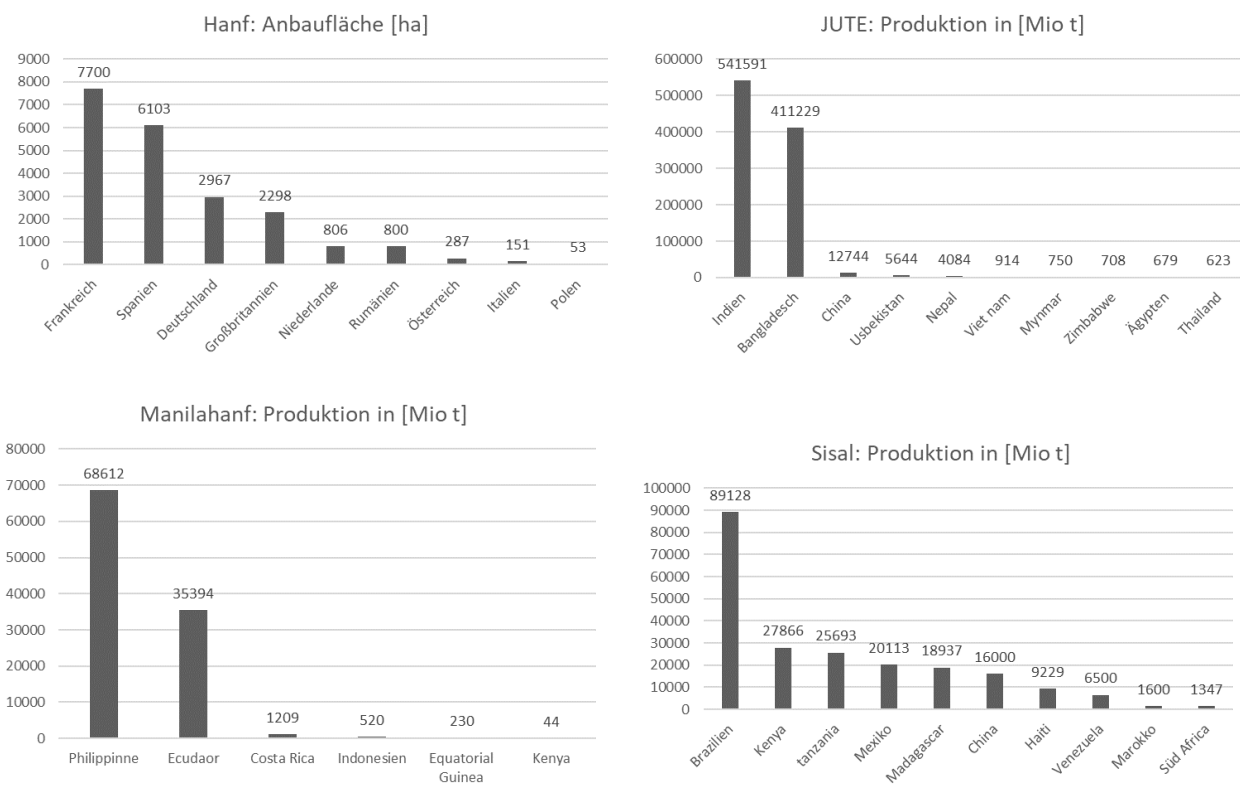


Abbildung 7: Hauptproduktionsländer nach [Mio. t] oder [ha] der unterschiedlichen Naturfasern

Weitere biologisch abbaubare Fasermaterialien

In diesem Unterkapitel werden Fasermaterialien vorgestellt, die synthetisch hergestellt werden, aber dennoch unter bestimmten Umwelteinflüssen biologisch abbaubar sind und für das DBU-Projekt LehmTex in Frage kommen.

1. PLA (Polylactide)

PLA ist ein Polyester der aus Milchsäure hergestellt wird. PLA wird auch als Polymilchsäure bezeichnet. Milchsäure (2-Hydroxypropionsäure) kommt in zwei optisch aktiven Formen, der D- und L-Milchsäure. Das Verhältnis der beiden Formen kann durch die Art der Herstellung beeinflusst werden. Grundsätzlich gibt es zwei Wege Milchsäure herzustellen. Entweder chemisch oder durch Fermentation mit Hilfe von Bakterien. Der Großteil der Milchsäure wird allerdings über Fermentation produziert, Asien bildet hier eine Ausnahme. [End09]

Zunächst wird aus verschiedenen Zuckern und mit Hilfe von Milchsäurebakterien, unter anaeroben Bedingungen, die Milchsäure gewonnen. Die Milchsäure wird als nächstes isoliert, da sie die Grundlage für das PLA bildet. Bei der anschließenden Polymerisation entstehen zunächst durch Kondensation Prepolymere, aus denen wiederum sich Dilactide bilden. Eine Ringöffnungspolymerisation führt zum Endprodukt dem hochmolekularen PLA. Die untenstehende Abbildung zeigt ein Schema der Herstellung.

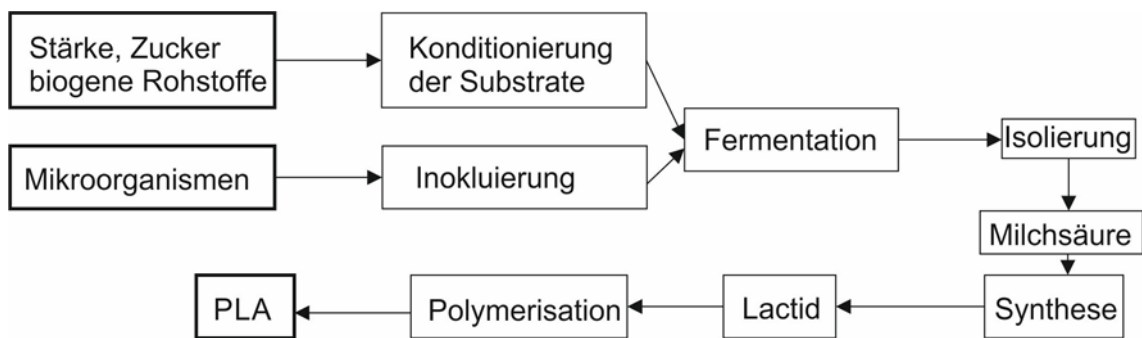


Abbildung 8: Herstellungsprozess von PLA

PLA ist ein transparenter teilkristalliner Thermoplast, welcher sich zu Fasern verarbeiten lässt. PLA lässt sich einfärben und besitzt eine hohe Resistenz gegenüber Fetten, Alkoholen und Feuchtigkeit. Der Polyester ist sowohl biobasiert, als auch biologisch abbaubar. [Han09] [Kru12]

2. Viskose

Viskose gehört zu den Cellulose-Regenerat-Fasern. Dabei handelt es sich um umgewandelte Cellulose. Cellulose ist ein Polysaccharid, das aus Glucose-Molekülen besteht. Das Makromolekül ist kettenförmig und kommt in der Zellwand von Pflanzen vor. [Lüt05]

Bei der Herstellung von Cellulose-Regeneraten wird Cellulose chemisch gelöst um die Eigenschaften etwas zu verändern. Anschließend wird wieder annähernd reine Cellulose daraus gemacht, welche dann gesponnen wird. Viskose wird in Natronlauge gelöst.

Cellulose wird mit Hilfe von Natronlauge und Schwefelkohlenstoff zu Cellulosexanthogenat umgewandelt. Dieses wird im Nassspinnverfahren in ein säurehaltiges Fallbad gepresst, um annähernd reine Cellulosefasern zu erhalten. In Abbildung 3.8 ist die Viskose-Herstellung vereinfacht dargestellt. Bei der Herstellung entstehen giftige und umweltschädliche Gemische. [Han09]

Im späteren Verlauf dieser Arbeit werden Tencel-Fasern erwähnt. Diese gehören ebenfalls zu den Cellulosefasern. Allerdings ist deren Herstellung, laut dem Hersteller, mit weniger schädlichen Stoffen verbunden, als die Viskose-Herstellung.

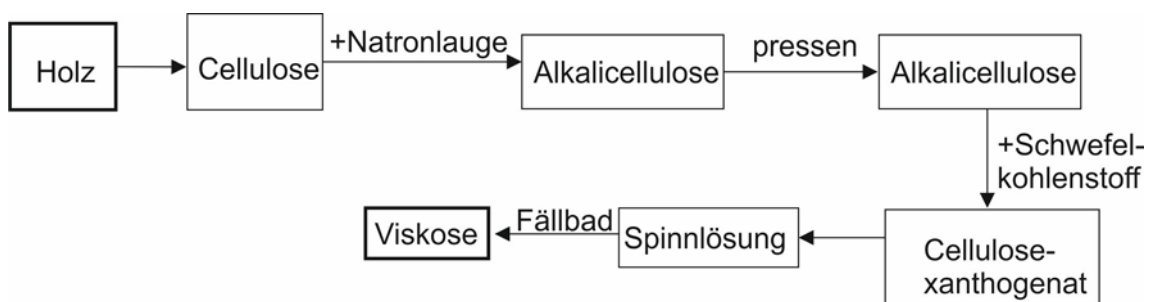


Abbildung 9: Herstellungsprozess von Viskose

Im Anschluss an die Recherche zu den Naturfaserarten und den synthetisch hergestellten, biologisch abbaubaren Fasern wurde die Verfügbarkeit solcher Faser geprüft inkl. einer Herstellerrecherche. Die Ergebnisse der Herstellerrecherche können der folgenden Tabelle entnommen werden. Diese war Basis zur Materialbeschaffung und diente auch als Entscheidungskriterium.

Tabelle 3: Ergebnisse der Herstellerrecherche

Firma	Produkt	Land
Chandra Prakash & Co	Sisal, Jute, Abacá	Indien
Gopinath Spinning PVT. LTD.	Baumwolle	Indien
Baltic Flax	Flachs mit Baumwolle gemischt	Litauen
China Liahren Co. LTD.	Hanf, Baumwolle	China
Hemp Traders	Hanf	USA
Agro and pharma LTD	Sisal	
Sachsenleinen GmbH	Hanf, Sisal, Abacá, Flachs	Deutschland
STW	Jute, Flachs, Baumwolle, Hanf, Sisal	
Amit cotton industries	Baumwolle	Indien
Indeximinternational	Baumwolle	Indien
sun agri export	Baumwolle	Indien
EPSILON EXPORTS & IMPORTS	Abacá	Indien
EVERGREEN VEGETABLE TRADERS	Abacá	Indien
China Liahren Co. LTD.	Bambus	China
Hemp Traders	Hanf	
Tianjin Glory Tang Co.	PLA	China
2 W Textile	PLA	China
Yoon Networks Shanghai Co., Ltd.	PLA	China
De Saedeleir Textile Platform NV (Vertrieb in Inego)	PLA	Belgien
Lenzing Aktiengesellschaft	Tencel, Viskose	Österreich
Cordenka GmbH	Viskose	Deutschland
Cyarn	Viskose	China
Ghezzi S.p.a	Viskose	Italien

Wichtige Auswahlkriterien für die Verwendung als Bewehrungsfaser sind neben der Steifigkeit/dem E-Modul der Faser, die Zugfestigkeit und die Faserdichte. Die Kennwerte zu den einzelnen Faserarten wurden recherchiert und mit den mechanischen Eigenschaften der aktuell verwendeten Glasfaser verglichen. Die Ergebnisse können der folgenden Abbildung entnommen werden.

ABWEICHUNG VON GLAS IN [%]

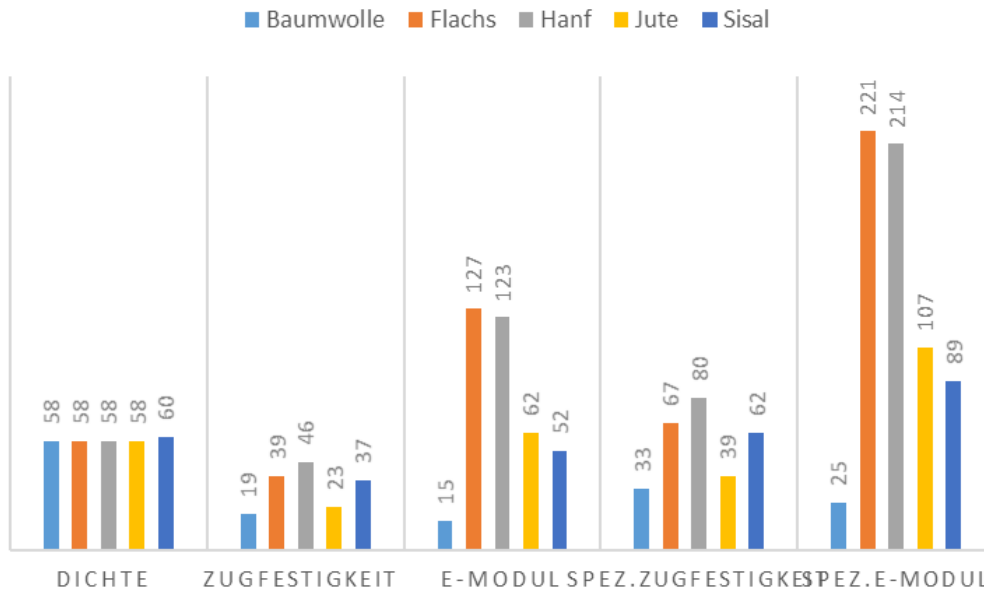


Abbildung 10: Ergebnisse des relativen E-Moduls/Zugfestigkeit/Dichte der betrachteten Naturfasern

Bei der Gegenüberstellung der mechanischen Eigenschaften fallen vor allem die Faserarten Hanf und Flachs positiv auf, da diese einen höheren E-Modul besitzen, als die aktuell verwendete Glasfaser. Unter Berücksichtigung aller wichtigen Parameter (Verfügbarkeit, mechanische Eigenschaften, Ökobilanz, Wirtschaftlichkeit, etc.) wurden die recherchierten Faserarten verglichen und eine Auswahl für die nächsten Projektschritte (AP4 „Entwicklung neuer Bewehrungssystem“) getroffen.

Fasertabelle DBU-LehmTex

Kategorie	Material	Kurzfaser	Endlosfaser	Verfügbarkeit auf dem Markt	Einschätzung der Kosten	Ökobilanz	Biologische Abbaubarkeit	Mechanische Eigenschaften	Gesamtbewertung gut/ja
Naturfaser unbehandelt	Jute	ja	ja	schlecht	schlecht	gut	ja	schlecht	4
	Hanf	ja	ja	gut	gut	gut	ja	gut	7
	Sisal	ja	ja	schlecht	schlecht	gut	ja	schlecht	4
	Flachs	ja	ja	gut	gut	gut	ja	gut	7
	Baumwolle	ja	ja	gut	gut	gut	ja	schlecht	6
	Seegrass	ja	nein	schlecht	schlecht	gut	ja	gut	4
Naturfaser behandelt	Viskose/Zellulose	ja	ja	gut	gut	schlecht	ja	gut	6
Kunststofffasern	PLA	ja	ja	gut	schlecht	gut	ja	gut	6
Mineralfaser	Basalt	ja	ja	gut	gut	schlecht	nein	gut	5

bevorzugt im Projekt

Folgende Faserarten wurden im folgenden AP4 weiter betrachtet: Hanf, Flachs, Viskose/Zellulose und PLA. Nach Rücksprache mit Experten aus dem Chemiefaserbereich und Forschern aus dem Bereich PLA, wurde die Möglichkeit zur Verwendung von PLA-Fasern für das DBU-Projekt Lehm-Tex verworfen, da diese nur unter ganz bestimmten Umwelteinflüssen (hohe Temperatur/ $>30^{\circ}\text{C}$) und hohe Feuchtigkeit) biologisch abbaubar sind und momentan aufgrund einer geringen Verfügbarkeit aus wirtschaftlichen Aspekten nicht in Frage kommen.

6. Neue Bewehrungssysteme und Produktion der neuen Lehmbauplatten (AP4)

Die Entwicklung des textilen Bewehrungssystems steht im Fokus des DBU-Projekts, da eine Bewehrung gefunden werden muss, die neben den geforderten mechanischen Eigenschaften, auch biologisch abbaubar ist. Im vorherigen Kapitel wurde eine Faserauswahl getroffen, die bei der Entwicklung der textilen Bewehrung berücksichtigt worden ist. Neben den Lösungskonzepten einer textilen Bewehrung werden auch Lösungen einer Kurzfaserbewehrung betrachtet und diese getestet. Kurzfaserbewehrung haben den Vorteil, dass man die Kurzfasern (i.d.R. 2 – 30 mm lang) in die Lehmmatrix einmischen kann und der Produktionsprozess ohne die Handhabung einer textilen Bewehrung auskommt. Nachteilig ist die kurze Faserlänge hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften der Lehmplatte, da die Kurzfasern unorientiert (wirr) in der Matrix vorliegen und nur lokale Kräfte aufnehmen können.

Zur Entwicklung der neuen textilen Bewehrungsstruktur sind folgenden Parameter wichtig:

1. Auswahl des textilen Herstellungsverfahrens
2. Festlegen der textilen Struktur
3. Festlegen der Maschenweite
4. Ggf. Nachbehandlungsmethode

Die aktuell verwendete Textilbewehrung der Fa. Vitrolan wird auf einer Dreherwebmaschine gefertigt. Dabei werden zwei Kettfäden in 0° -Richtung um die eigene Achse rotiert, um den Schussfäden (90° -Richtung) einzuklemmen und eine biaxiale Bewehrungsstruktur zu erstellen. Über einen nachgelagerten Beschichtungsprozess wird eine PVC-Beschichtung aufgebracht, die neben der Verschiebefestigkeit der Fadensysteme, auch eine einfachere Handhabbarkeit und Haltbarkeit gegenüber bestimmten Matrices sicherstellt. Drehergewebe haben allerdings den Nachteil, dass über die Rotation (sog. Ondulation) die Kettfäden nicht gestreckt, sondern wellenförmig im Textil liegen. Diese Ondulation sorgt dafür, dass sich das Textil bei einer Zugbeanspruchung erst streckt, bevor es die auftretenden Kräfte aufnehmen kann. Daher wurde im Projekt LehmTex eine Gelegemaschine zur Herstellung von biaxialen Gelegen genutzt. Hierbei werden die Kett- und Schussfäden, wie der Name bereits sagt, aufeinander abgelegt und mit einem dritten Fadensystem, dem sog. Wirkfaden, abgebunden bzw. verbunden. Gelege weisen daher keine Ondulation auf und

können direkt auf eine Beanspruchung von außen reagieren. Solche Gelegestrukturen werden auch im Bereich der Betonbewehrung (Stichwort: textilbewehrter Beton) eingesetzt. Alle weiteren Schritte beruhen somit auf dem textilen Herstellungsverfahren von Gelegen. Gewebe werden im Projekt aufgrund der genannten Nachteile nicht berücksichtigt.

Bewehrungsstrukturen für Beton, aber auch für Lehm, müssen eine offene Struktur aufweisen, damit die Matrix das Bewehrungstextil durchdringen und ein optimaler Verbund sichergestellt werden kann. Im Projekt werden daher auch ausschließlich offenmaschige Gelegestrukturen betrachtet. In der folgenden Skizze ist eine biaxiale Gelegestruktur erläutert.

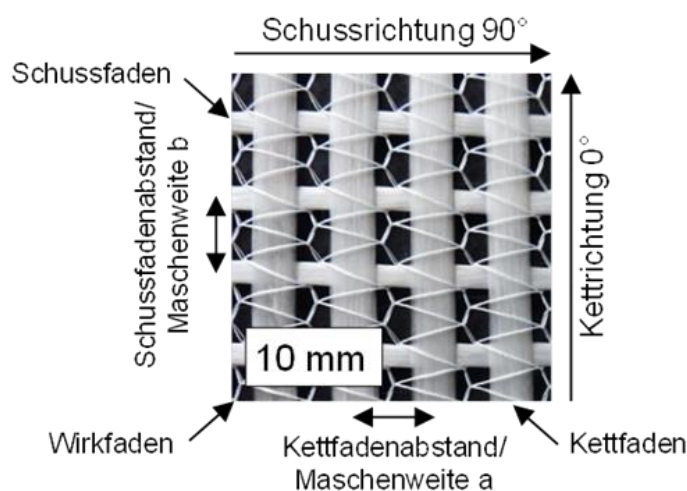


Abbildung 11: Aufbau eines biaxialen Geleges

Die Maschenweite als drittes Kriterium, neben dem textilen Herstellungsverfahren und der textilen Struktur, entscheidet über den Bewehrungsgrad in 0° und 90° Richtung. Je mehr Fasern pro Laufmeter eingebracht werden, umso höher ist die maximale Bruchkraft des Textils. Diesbezüglich muss allerdings darauf geachtet werden, dass eine ausreichende Durchtränkung des Bewehrungstextils mit der Lehmmatrix gewährleistet ist und aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten auch keine Ressourcenverschwendung (Überdimensionierung) stattfindet. Als Nachbehandlungsmethode kommt vor allem eine Textilbeschichtung in Frage, die allerdings auch die Anforderungen an eine biologische Abbaubarkeit und die wirtschaftlichen Zielkriterien erfüllen muss.

Das ITA recherchiert in einem ersten Schritt im AP4 nach markterhältlichen Lösungen, die die Vorgaben der textilen Bewehrungsstruktur erfüllen könnten. Dabei wurden zwei Produkte für interessant befunden, eine ausreichende Textilmenge angeschafft und die Lehmbauplatten mit diesen Textilbewehrungen getestet.

Dies betrifft folgende Textilprodukte:

1. Flachsegele, Fa. Bcomp, Fribourg (Schweiz), ampliTex powerRibs, 0/90°, mesh size 15 mm, 1500 tex
2. Jutegewebe, Fa. LECO-Werke Lechtreck GmbH & Co. KG, Emsdetten, Produkt H185

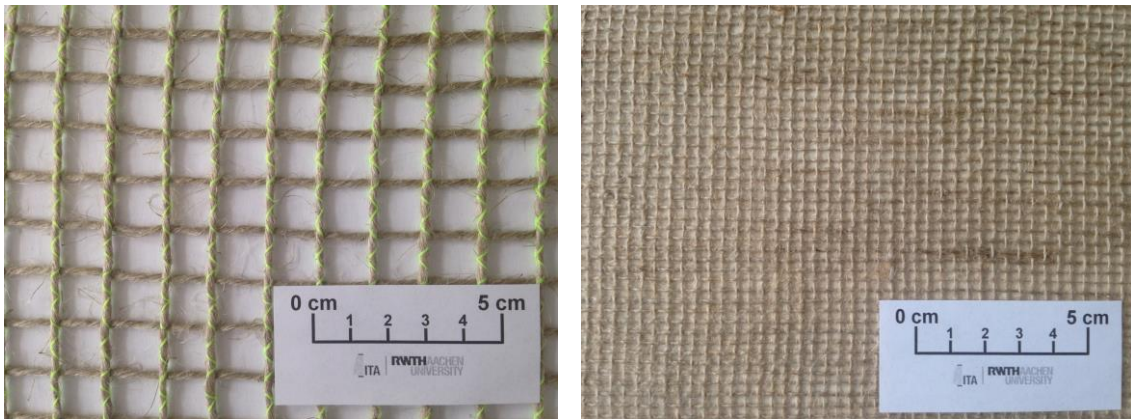


Abbildung 12: Flachsegele Fa. Bcomp (links) und Jutegewebe der Fa. Leco (rechts)

Zusätzlich wurde am ITA ein Zellulosegelege entwickelt und hergestellt. Die Zellulosefaser wurden von der Fa. Cordenka bezogen und weisen neben guten mechanischen Eigenschaften auch die Eigenschaft „biologisch abbaubar“ auf. Zur Herstellung der Gelegemuster wurde die Maschine „Cetex/Karl Mayer, HDR-6-60 / 2 ES - LS3 EL“ am ITA verwendet, die neben 3D-Abstandsgewirkten auch zweidimensionale, biaxiale Gelegestrukturen herstellen kann. Im Folgenden ist die Produktion bildlich dargestellt (Schusseintrag & Abbindung, links und Warenabzug, rechts).

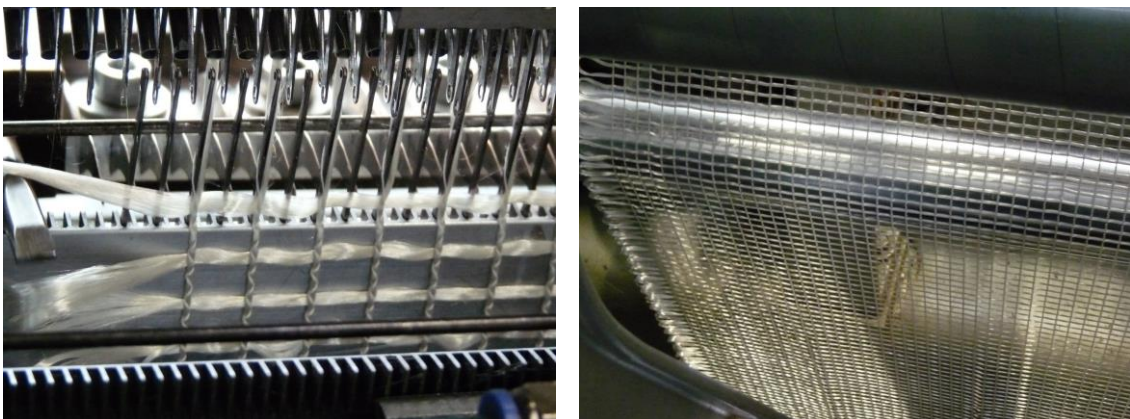


Abbildung 13: Herstellung des Zellulosegeleges am ITA

Die eingesetzten Cordenka-Fasern haben einen Garntiter von 378 tex. Die Maschenweite beträgt in Kennrichtung 8,3 mm und in Schussrichtung 8,4 mm. Als Bindungsart wurde eine Fransebinde gewählt, die für eine gute Verschiebefestigkeit der Fadensysteme gegeneinander sorgt. Neben den oben dargestellten drei Textilbewehrungsarten wurden auch Kurzfasperlösungen der Fa. Lehorange genutzt.

Hierzu zählen folgende Kurzfaserlösungen:

1. Hanffasern, fein und grob (jeweils 30 mm lang), Fa. BaFe
2. Gärreste
3. Holzfasern, Fa. Gutex
4. Seegrass, Fa. Neptutherm

Alle aufgeführten Bewehrungsarten wurden zur Herstellung von Lehmbauproben genutzt und im Anschluss die Biegezugfestigkeit der jeweiligen Lehmbauplatten getestet.

7. Prüfergebnisse der neuen Lehmbaupatte (AP5)

Neben den Prüfungen der neu entwickelten Lehmbauplatten wurden auch Prüfungen zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit an marktüblichen Rigipsplatten durchgeführt. Rigipsplatten werden ebenfalls im Trockenbau als raumabschließendes Wandsystem genutzt und haben einen deutlich höheren Marktanteil. Im Folgenden sind Bilder der Prüfdurchführung dargestellt. Diese zeigen sowohl die Prüfungen der Rigipsplatte, als auch die Prüfungen der neu entwickelten Lehmbauplatten.



Abbildung 14: 4-Punkt-Biegeprüfung der Lehmbauplatten (oben) und Rigipsplatten (unten) am ITA

Die erzielten Ergebnisse aller getesteten Bewehrungsarten sind in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 4: Ergebnisse aller 4-Punkt-Biegeprüfungen im Überblick

Probenart	Ermittelte durchschnittl. Biegezugfestigkeiten in MPa (Ermittlung ITA-Labor)	Informationen
Rigips-Platte, 12,5 mm, in Längsrichtung, Rückseite in der Zugzone	4,26	Vergleich zu einer marktüblichen Rigipsplatte
Rigips-Platte, 12,5 mm, in Längsrichtung, Vorderseite in der Zugzone	6,24	
Rigips-Platte, 12,5 mm, in Querrichtung, Rückseite in der Zugzone	2,42	
Rigips-Platte, 12,5 mm, in Querrichtung, Vorderseite in der Zugzone	2,51	
Lehmbauplatte der Fa. Lehmorange, 16 mm, Kettrichtung	1,92 (max. 2,15, min. 1,27)	Benchmark, Ergebnisse der Lehmbauplatten mit dem beschichteten Vitrunlan-Drehergewebe
Lehmbauplatte der Fa. Lehmorange, 16 mm, Schussrichtung	1,25 (max. 1,66, min. 0,75)	
Lehmbauplatte der Fa. Lehmorange, 20 mm, Kettrichtung	1,71 (max. 1,85, min. 1,60)	
Lehmbauplatte der Fa. Lehmorange, 20 mm, Schussrichtung	0,91 (max. 1,17, min. 0,68)	
Probenart	Ermittelte durchschnittl. Biegezugfestigkeiten in MPa (Ermittlung ITA-Labor)	Pronzetuale Festigkeit im Vergleich zur Benchmarkprobe
Lehmbauplatte der Fa. Lehmorange, 20 mm, Hanffasern, Deutschland (Fa. BaFa)	0,53	31%
Lehmbauplatte der Fa. Lehmorange, 20 mm, Flachsgewebe (Fa. Bcomp)	1,08	63%
Lehmbauplatte der Fa. Lehmorange, 20 mm, Gärreste	0,18	11%
Lehmbauplatte der Fa. Lehmorange, 20 mm, Holzfasern 2,7kg	0,65	38%
Lehmbauplatte der Fa. Lehmorange, 20 mm, Feine Hanffasern, Ungarn, L=3cm	0,64	37%
Lehmbauplatte der Fa. Lehmorange, 20 mm, Grobe Hanffasern, Ungarn, L=3cm	0,59	35%
Lehmbauplatte der Fa. Lehmorange, 20 mm, Jutegewebe (Fa. Leco)	1,04	61%
Lehmbauplatte der Fa. Lehmorange, 20 mm, Jutegewebe (Fa. Leco)	1,32	77%
Lehmbauplatte der Fa. Lehmorange, 20 mm, Jutegewebe (Fa. Leco), in Lehm/Ton eingeweicht	1,22	71%
Lehmbauplatte der Fa. Lehmorange, 20 mm, Holzfasern (Fa. Gutex),	0,63	37%
Lehmbauplatte der Fa. Lehmorange, 20 mm, Seegrass (Fa. Neptutherm)	0,61	36%
Lehmbauplatte der Fa. Lehmorange, 20 mm, Viskosegewebe (ITA)	0,85	50%

Die Ergebnisse der neuen Lehmbauplatten wurden mit den Ergebnissen der Ursprungsplatte verglichen. Dabei konnte keine Bewehrungslösung die angestrebten Biegezugfestigkeiten der Ursprungsplatte erreichen (Ziel: 100 %). Am besten abgeschnitten haben die Bewehrungslösungen „Jutegewebe von Fa. Leco“ (1.Platz, 77 %), „Flachsgewebe Fa. Bcomp“ (3.Platz, 63 %) und „Viskosegewebe ITA“ (3.Platz, 50 %).

Die Biegezugfestigkeit der Ursprungsplatte ist dabei nur ein Richtwert, da keine Mindestgrenze über eine Norm vorgegeben ist. Eine ausreichende Biegezugfestigkeit der Platte ist notwendig, um ein Durchbrechen der Platte während dem Transport und der Anbringung auf der Baustelle zu verhindern. Ein solcher Grenzwert (Mindestwert) wird gerade vom Normungssausschuss diskutiert. Aufgrund der Tatsache, dass der angestrebte Richtwert der Ursprungsplatte nicht erreicht wurde, wurde im Folgenden an der Optimierung des am ITA entwickelten und hergestellten Viskosegeleges gearbeitet.

8. Recyclingversuche (AP6) und Prüfergebnisse der recycelten Lehmbauplatte (AP7)

Die in AP4 entwickelten und in AP5 getesteten Bewehrungslösungen erfüllten nach Abschluss der Arbeitspakete nicht die im Lastenheft angegebenen Richtwerte. Daher wurde in Absprache mit der Fa. Lehmorenge entschieden, dass die Arbeitspakete AP4 und AP5 nochmals in einem iterativen Prozess durchlaufen werden müssen. Die in AP6 und AP7 angedachten Recyclingversuche wurden daher hintenangestellt, damit das Kernziel „Entwicklung einer biologisch abbaubaren Textilbewehrung für die Lehmbauplatten der Fa. Lehmorenge“ erreicht werden kann.

Die Optimierung des Viskosegeleges erfolgte am ITA unter der erneuten Nutzung der Maschine „Cetex/Karl Mayer, HDR-6-60 / 2 ES - LS3 EL“. Dabei wurde der Garntiter der eingesetzten Cordenka-Fasern verdoppelt, in dem zwei Cordenka-Rovings à 378 tex, in einem Maschineneinzug zusammengeführt wurden. Somit konnte der Garntiter in Kettrichtung auf 756 tex verdoppelt werden. Es wurde erneut eine Textilmenge von ca. 5 m² hergestellt und an die Fa. Lehmorenge versendet. Die Bewehrung wurde von der Fa. Lehmorenge in eine Lehmbauplatte eingebaut und die gefertigte Lehmbauplatte im Anschluss am ITA getestet. Am ITA wurden hierfür die Prüfproben aus der Lehmbauplatten geschnitten und die 4-Punkt-Biegeprüfungen im Labor durchgeführt. Die ermittelte relative Biegezugfestigkeit konnte mittel der Erhöhung des Garntiters von 50 % auf 68 % gesteigert werden. Leider reicht auch diese Biegezugfestigkeit nicht an die Werte der Ursprungsplatte heran.

Nach optische Begutachtung der getesteten Proben und nach Rücksprache mit der Fa. Lehmorange wird vermutet, dass das Herstellungsverfahren hinsichtlich der Einbringung der textilen Bewehrungsstruktur nicht optimal ist. Die neu entwickelten textilen Bewehrungslösungen verzichten durchgehend auf eine Beschichtung, da diese entweder nicht biologisch abbaubar ist oder die Zielkosten nicht eingehalten werden können. Unbeschichtete Lösungen haben den Nachteil, dass die Verschiebefestigkeit zur Problemen bei der Handhabung führen kann. Dabei verschieben sich die Kett- und Schussfäden bei der Handhabung der Textilien zueinander, sodass einige Fasern nicht mehr gestreckt vorliegen und die auftretenden Zugkräfte nicht sofort aufnehmen können. Dies führt zu einer Minderung der Bewehrungsleistung und zu einer verminderten Biegezugfestigkeit der Lehmbauplatte. Zusätzlich kann es zu einem Schrumpfverhalten der Bewehrung kommen, da vor allem die Naturfasern stark schrumpfen, sobald sie in Kontakt mit Wasser kommen.

Eine Lösung des Problems kann aus Sicht der Projektpartner nur über eine Optimierung des Herstellungsprozesses gefunden werden. Ein Spannrahmensystem, das die Bewehrungstextilien während der Produktion der Lehmbauplatte auf Spannung hält und somit auch eine Lagentreue ermöglicht, könnte hierbei ein Lösungsansatz sein. Am Ende des DBU-Projekts LehmTex wurde diese Option untersucht. Das ITA hat hierfür einen Spannrahmen aus Holz gefertigt und diesen an die Fa. Lehmorange gesendet. Dabei wurde das neu entwickelte Viskosegelege eingespannt, sodass die Fa. Lehmorange lediglich die Lehmmatrix aufbringen musste. Im Folgenden ist dieser Spannrahmen dargestellt.



Abbildung 15: Spannrahmenlösung mit Grundplatte (links), Mittelrahmen (mittig) und Oberrahmen (rechts)

Die Ergebnisse der Spannrahmenversuche lagen bei Erstellung des Endberichts noch nicht vor. Es wird erwartet, dass eine Steigerung der Biegezugfestigkeit mit dem vorgespannten Viskosegelege erzielt wird. Ob dieser Wert an den Richtwert der Ursprungsplatte herankommt, kann nicht garantiert werden. Beide Projektpartner sind sich einig, dass über eine Optimierung des Herstellungsverfahrens die angestrebten Zielwerte realisiert werden können.

Die Fa. Lehmorange verfügt heute bereits über Bewehrungslösungen, die eine biologische Abbaubarkeit ermöglichen (s. Ergebnisse AP5) und eine Biegezugfestigkeit $> 1,3 \text{ MPa}$ erreichen. Über

die oben erläuterte Optimierung des Herstellungsprozesses kann dieser Wert noch deutlich gesteigert werden.

9. Ökonomische und Ökologische Bewertung (AP8)

Neben den mechanischen Kennwerten und den technischen Aspekten der Lehmbauplatte wurden auch eine ökologische und eine ökonomische Bewertung der neu entwickelten Bewehrungslösungen durchgeführt. Zur ökologischen Bewertung wurde eine Wirkungsabschätzung der einzelnen Faserarten in der Lehmbauplatte nach ISO 14040 durchgeführt und mit den Werten der Ursprungsplatte (Glasfaser ohne Berücksichtigung der PVC-Beschichtung) und der marktüblichen Rigipsplatte verglichen. Zu den Kriterien zählen folgende Umweltwirkungen:

- Verknappung abiotische Ressourcen (Fossile Brennstoffe)
- Verknappung abiotische Ressourcen (nicht fossile Ressourcen)
- Versauerungspotenzial von Boden und Wasser
- Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht
- Treibhauspotenzial
- Eutrophierungspotenzial
- Potenzial für die Bildung von troposphärischem Ozon
- Landnutzung
- Wasserverbrauch

Die verwendeten Daten stammen größtenteils vom Umweltbundesamt („ProBas - Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme“ [www2]). Weitere Daten stammen aus folgenden Quellen: Nova Institute und [www3].

Tabelle 5: Umweltwirkungen von Jute, Flachs und Hanf

Umweltwirkung pro m ²	Jute		Flachs		Hanf		Maximum	Minimum
Verknappung abiotische Ressourcen (Fossile Brennstoffe)	1,2147	0,00%	1,2172	0,00%	1,2379	0,01%	33,5300	1,2147
Verknappung abiotische Ressourcen (nicht fossile Ressourcen)	0,0013	4,33%	0,0013	4,34%	0,0013	4,34%	0,0027	0,0002
Versauerungspotenzial von Boden und Wasser	0,0011	1,17%	0,0005	0,00%	0,0005	0,07%	0,0035	0,0005
Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht	0,0000	6,45%	0,0000	6,45%	0,0000	6,45%	0,0000	0,0000
Treibhauspotenzial	0,1045	0,14%	0,0891	0,00%	0,7271	5,91%	2,1800	0,0891
Eutrophierungspotenzial	0,0001	0,48%	0,0001	0,00%	0,0001	0,05%	0,0008	0,0001
Potenzial für die Bildung von troposphärischem Ozon	0,0004	6,45%	0,0000	0,00%	0,0000	0,00%	0,0004	0,0000
Landnutzung	0,0024	0,05%	0,0030	0,06%	0,0029	0,05%	0,6918	0,0000
Wasserverbrauch	0,0254	0,00%	0,0261	0,00%	0,0259	0,00%	11,3200	0,0254
Umweltwirkung Gesamt	19,07%		10,84%		16,88%			

Tabelle 6: Umweltwirkungen von Viskose, Glasfaser und Gipskarton

Umweltwirkung pro m ²	Viskose		Glasfaser		Gipskarton		Maximum	Minimum
Verknappung abiotische Ressourcen (Fossile Brennstoffe)	6,4772	3,15%	3,1372	1,15%	33,5300	19,35%	33,5300	1,2147
Verknappung abiotische Ressourcen (nicht fossile Ressourcen)	0,0027	9,68%	0,0013	4,33%	0,0002	0,00%	0,0027	0,0002
Versauerungspotenzial von Boden und Wasser	0,0017	2,49%	0,0008	0,67%	0,0035	6,45%	0,0035	0,0005
Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht	0,0000	6,45%	0,0000	6,45%	0,0000	0,00%	0,0000	0,0000
Treibhauspotenzial	0,2169	1,18%	0,1689	0,74%	2,1800	19,35%	2,1800	0,0891
Eutrophierungspotenzial	0,0002	0,74%	0,0001	0,31%	0,0008	6,45%	0,0008	0,0001
Potenzial für die Bildung von troposphärischem Ozon	0,0001	0,71%	0,0002	3,45%	0,0003	5,63%	0,0004	0,0000
Landnutzung	0,6918	12,90%	0,0018	0,03%	0,0000	0,00%	0,6918	0,0000
Wasserverbrauch	0,0693	0,05%	1,1148	1,24%	11,3200	12,90%	11,3200	0,0254
Umweltwirkung Gesamt	37,36%		18,37%		70,15%			

Umweltwirkungen von Lehmbauplatten (nur Material) im Vergleich zu handelsüblicher Gipskartonplatte

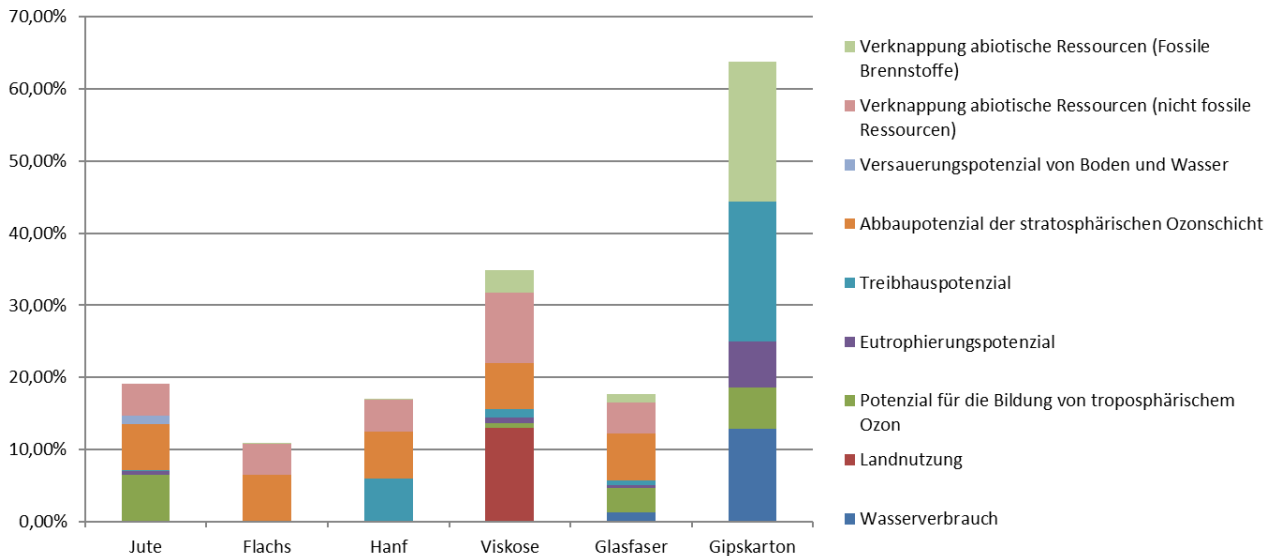


Abbildung 16: Ergebnisse der ökologischen Bewertung bzgl. einer Wirkungsabschätzung nach ISO 14040

Demnach schneiden vor allem die betrachteten Naturfasern Jute, Flachs und Hanf positiv ab. Die biologisch abbaubaren Viskosefasern haben aufgrund ihres speziellen Herstellungsverfahrens (s. Kapitel 5) keine positive Ökobilanz im Vergleich zu den Glasfasern. Hierbei ist zu beachten, dass bei der Ökobilanz der Glasfasern nicht die PVC-Beschichtung berücksichtigt worden ist. Diese wird die Ökobilanz deutlich verschlechtern, sodass ein unbeschichtetes Viskosetextil ökologisch besser ist, als ein PVC-beschichtetes Glastextil. Im Vergleich zu einer marktüblichen Rigipsplatte sind alle Bewehrungslösungen in Verbindung mit der Lehmmatrix ökologisch besser.

Bei der ökonomischen Bewertung wurde vor allem auf die von der Fa. Lehmorange festgelegten Zielkosten der einzusetzenden Textilbewehrung geachtet (< 1,5 €/m²). Die für die Prüfungen extern beschafften Textilien der Fa. Bcomp (Flachsegelege, 8,5 €/m²) und der Fa. Leco (Jutegewebe, ~ 3,5 €/m²) übertreffen diese Zielkosten deutlich. Allerdings wurde von beiden Textilherstellern nur Kleinstmengen beschafft, sodass hierbei noch ein großes Einsparpotential vorhanden ist. Bei der Abnahme von Großmengen könnte das Jutegewebe der Fa. Leco für die Lehmbauplatten der Fa. Lehmorange auch interessant sein. Das gleiche gilt für das am ITA neu entwickelte Viskosegelege. Die Zielkosten sollten bei der Abnahme von größeren Mengen und auf Basis eines langfristigen Kooperationsvertrags mit den Viskosefasern erreichbar sein. Entwickelt wurde aus den beschriebenen technischen Gründen eine Gelegestruktur; aus ökonomischer Sicht könnte eine Gewebevariante z. B. von der Fa. Delcotex (Bielefeld), Fa. Vitrolan oder Fa. Dr. Günther Kast GmbH & Co. (Sonthofen) interessant sein.

10. Nutzbarkeit für den Dachverband Lehm e.V. (AP9)

Die Fa. Lehmorange ist Mitglied im DVL, im Fachbeirat Normung im DVL (Regelung von Lehmplatten), und im UPD (Umweltproduktdeklaration) Fachbeirat. Zukünftiges Bauen mit Lehm wird sich auch daran messen lassen müssen, in wie weit deren Inhaltsstoffe bzw. Hilfsmittel umweltverträglich sind. Ein reger Austausch über Ergebnisse, Anwendungen und Aussichten neuer Bewehrungen fand und findet mit den neuen Erkenntnissen mit dem DVL statt, explizit gerade hinsichtlich der UPD. Hinsichtlich der zukünftigen Norm für Lehmplatten, gilt es ein Serienprodukt zu generieren und in die Anwendung zu bringen, um dann den Stand der Technik neu zu definieren. Der Abschlussbericht wird dem DVL zur Verfügung gestellt.

11. Zusammenfassung und Ausblick

Im DBU-Projekt LehmTex wurden insgesamt 13 biologisch abbaubare Bewehrungslösungen entwickelt. Diese basieren sowohl auf Kurzfasern-, als auch auf Textilkonzepten. Alle Bewehrungslösungen wurden zur Herstellung von Demonstratorplatten genutzt und im Anschluss auf ihre Biegezugfestigkeit getestet. Alle erzielten Ergebnisse wurden zum einen mit der aktuellen „Standardplatte“ der Fa. Lehmorange und zusätzlich zu einer marktrelevanten Rigipsplatte verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass einzelnen Bewehrungslösungen die geforderte Biegezugfestigkeit der „Standardplatte“ fast vollständig erreichten (knapp 80 % der ursprünglichen Biegezugfestigkeit). Diesbezüglich ist zu beachten, dass der Vergleichswert der „Standardplatte“ kein geforderter Zielwert ist. Ein Zielwert wird aktuell im Normungsausschuss des Dachverbands Lehm diskutiert und demnächst festgelegt.

Auch die Herstellungsmethodik der textilbewehrten Lehmbauplatten hat einen großen Einfluss auf die Biegezugfestigkeit der hergestellten Platten, da sie über die Lagentreue und den Streckungszustand der textilen Bewehrung entscheidet. Beides hat einen enormen Einfluss auf die letztendlich zu erzielende Biegezugfestigkeit. Lösungsansätze zur Optimierung der Lehmplattenherstellung wurden zwischen der Fa. Lehmorange und ITA diskutiert und bieten eine Möglichkeit das Thema im Zuge eines Folgeprojekts zielführend abzuschließen

12. Literatur- bzw. Quellenverzeichnis

- [End09] Enders Hans-Josef S.-R.A. (2009): Technische Biopolymere. München: Hanser.
- [FAO13] FAO (2013): <http://www.fao.org/docrep/006/y5143e/y5143e1g.htm>.
- [Geo10] Cadisch G. (2010): Fasernliefernde Pflanzen.
- [Ges551] Gessner W. (1955): Naturfaern Chemiefasern. Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig.
- [Han09] Hans-Josef Enders A.S.-R. (2009): Technische Biopolymere. München: Hanser.
- [Iri12] Iris Lewandowski (2012): Faserpflanzen.

- [KAT13] KATALYSE-Institut, Köln (2013): <http://www.umweltlexikon-online.de/RUBlandwirtsrohstoffe/Jute.php>.
- [Kru12] Andrea K. (2012): Polymere und Komposite aus Nawaro 7. Vorlesung.
- [Lüt13] Lütz M. (2013): Verwendung von Naturfasern in Faserverbundwerkstoffen.
- [Rei12] Reinhard Lieberei C.R. (2012): Nutzpflanzen. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- [Lüt05] U. Lüttge M.L.G.B. (2005): Botanik. Weinheim: WILEY-VCH.
- [www1] (2013): www.ble.de.
http://www.ble.de/DE/01_Markt/02_Beihilfen/03_Hanf/hanf_node.html, zuletzt geprüft am 06.08.2013.
- [www2] www.probas.umweltbundesamt.de/php/; geprüft am 21.05.2018.
- [www3] www.eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/, geprüft am 21.05.2018.