



Fachbericht zum Projekt:

Pflanzenbasierte Fasern für regionale Wertschöpfungsketten in der TechnologieRegion Karlsruhe – Skalierung der biobasierten Bauwirtschaft (PFBau)



Das Projekt wird gefördert vom Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz im Rahmen der Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg aus Landesmitteln, die der Landtag Baden-Württemberg beschlossen hat.

Ort: Karlsruhe
Datum: 15.12.2023

Status: final

Impressum

Fachbericht zum Projekt:
Pflanzenbasierte Fasern für regionale Wertschöpfungsketten in der TechnologieRegion
Karlsruhe – Skalierung der biobasierten Bauwirtschaft (PFBau)“

Projektleitung

TechnologieRegion Karlsruhe GmbH
Emmy-Noether-Straße 11, 76131 Karlsruhe

Verantwortlich für den Inhalt des Berichtes

TechnologieRegion Karlsruhe GmbH
Emmy-Noether-Straße 11, 76131 Karlsruhe
Lenz Sulzer, lenz.sulzer@trk.de;

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Alexander Schwarz;
Dr. Sven Wydra, sven.wydra@isi.fraunhofer.de;

Verfasst im Auftrag von

TechnologieRegion Karlsruhe GmbH
Emmy-Noether-Straße 11, 76131 Karlsruhe

Bildnachweis

Deckblatt: TechnologieRegion Karlsruhe GmbH

Fertigstellung

Dezember 2023

Hinweise

Dieser Bericht einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr. Die Darstellungen in diesem Dokument spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung des Auftraggebers wider.

Inhalt

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Inhaltliche Einordnung | 4 |
| 2 | Bauprodukte und -genehmigungen..... | 6 |
| 3 | Natürliche Rohstoffe und Pflanzen-Fasern zum Einsatz in Bauprodukten..... | 8 |
| 4 | Herausforderungen neuartiger Bauprodukte mit Pflanzenfasern | 10 |
| 4.1 | Unternehmerische Aktivität | 10 |
| 4.2 | Forschung und Entwicklung | 11 |
| 4.3 | Wissenstransfer | 12 |
| 4.4 | Harmonisierte Zielvorstellungen..... | 13 |
| 4.5 | Marktentwicklung..... | 14 |
| 4.6 | Ressourcenverfügbarkeit..... | 15 |
| 4.7 | Legitimität pflanzlicher Rohstoffe | 16 |
| 5 | Schlussfolgerungen..... | 17 |
| 6 | Literaturverzeichnis..... | 19 |

1 Inhaltliche Einordnung

Unter Berücksichtigung der Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus hinweg, ist die Bauwirtschaft als besonders umweltrelevante Industrie anzusehen. So entfallen 40% der jährlichen CO₂-Emissionen in Deutschland auf die Bauwirtschaft (Elbers 2022). Etwa die Hälfte des Treibhausgasausstoßes bei der Errichtung und Nutzung von Hochbauten hierzulande gehen auf die Phase der Herstellung, Errichtung und Modernisierung oder Rückbau von Gebäuden sowie auf die direkten Emissionen der Bauwirtschaft zurück. Dieser als „graue Energie“ bezeichnete Energieeinsatz kann durch die Wahl nachwachsender Rohstoffe um 40-60% gesenkt werden (BBSR 2019).

Etwa 90 % des inländischen mineralischen Rohstoffabbaus werden in Gebäuden verbaut. Mit Einführung der Ersatzbaustoffverordnung für das verpflichtende Recycling mineralischer Baustoffe ist ein erster Schritt in Richtung einer umfassenderen Kreislaufwirtschaft im Bau unternommen, allerdings verbleibt ein hohes Emissionseinsparungspotenzial. Entsprechend wird der Einsatz nachwachsender Rohstoffe als ein möglicher Beitrag gesehen, um die Nachhaltigkeit der Bauwirtschaft zu erhöhen (Zinke et al. 2016), bzw. eine Kreislaufwirtschaft unter Nutzung nachwachsender Rohstoffe im Bau bietet damit ein Emissionsreduktionspotenzial von jährlich 7 Mio. Tonnen CO₂ zu erreichen (BBSR 2019).

Vor dem Hintergrund des Ukraine-Krieges und den damit verbundenen Auswirkungen auf globale Lieferketten sowie einer insgesamt ansteigenden Rohstoffkonkurrenz auf dem Weltmarkt und die Notwendigkeit der Sicherstellung von mehr Autarkie (Desrisking) in Wertschöpfungsketten wird erheblicher Bedarf zur Regionalisierung des Bausektors auch im Bereich des Rohstoffbezugs gesehen. Auch erzeugen die derzeitigen logistischen und physischen Herausforderungen der Rohstoffbeschaffung einen entsprechenden Handlungsdruck. Unter Berücksichtigung eines insgesamt steigenden prognostizierten Bedarfs an nachwachsenden Rohstoffen (vgl. UBA 2022) durch bspw. die chemische Industrie und thermische Nutzung und im Bau - insbesondere von Holz - ist zur Verringerung der Nutzungskonkurrenz und regionalen Diversifizierung trotz aktuell hoher Holzvorräte eine stärkere Berücksichtigung vielfältiger nachwachsender Rohstoffpotenziale in verschiedenen Bau-Gewerken anzustreben.

Bislang findet die Anwendung bio-basierter Bauprodukte mit Ausnahme von Bauholz lediglich in begrenztem Umfang statt, sodass der Anteil biobasierter Bauprodukte nur etwa 1% des Gesamtrohstoffaufkommens in der Bauwirtschaft ausmacht (siehe Tabelle 1). Im Vergleich der Marktreife von Bauprodukten aus nachwachsenden Rohstoffen ist der Markt für holzbasierte Bauprodukte am weitesten entwickelt. So wurde laut statistischem Bundesamt 2021 im Durchschnitt jede fünfte Baugenehmigung für Wohn- und Nichtwohngebäude ausgesprochen für Gebäude, bei denen Holz der vorwiegende Baustoff war (Destatis 2021). Zudem bildet der Holzbau einen besonderen Fokus relevanter Förderprogramme (TAB 2022b), weshalb die Untersuchung sich vor allem auf weitere nachwachsende Rohstoffe und deren Potenzial bezieht.

Tabelle 1 Übersicht über Märkte für bioökonomierelevante Produktgruppen in der Wertschöpfungskette Bau (Zinke et al. 2016)

| Produktgruppe | Produzierte Menge 2011 | Produzierter Wert 2011 [Mrd. €] | Bemerkungen |
|--|------------------------|---------------------------------|--|
| Baumaterialien, biobasiert | | 14,549 | |
| Holz, Holzwerkstoffe | | 14,409 | |
| biobasierte Kunststoffe | 38.400 t | 0,140 | Entspricht 2,5% des Baumaterials aus Kunststoff (2011: 5,6 Mrd. €) |
| Bauchemikalien | > 90.000 t | | Darin auch Betonverflüssiger aus Stärke bzw. Pflanzenölen |
| Baurelevante Klebstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe | 19.250 – 30.900 t | 0,035 – 0,056 | |
| Baurelevante Farben und Lacke, biobasiert | 94.700 t | | Schätzung, Annahme, dass 10% der baurelevanten Farben und Lacke biobasiert sind |
| Dämmstoffe aus NawaRo | 2 Mio. m ³ | | Entspricht 7,2% des Produktionsvolumens aller Dämmstoffe (2011: 28,4 Mio. m ³) |

Tabelle 2 Beispielhafte Darstellung mögl. relevanter Bauarten & Produktgruppen (vgl. DIBt o.D.)

| Bauart | Produktgruppen (Beispiele) |
|--|---|
| Bauwerksabdichtung | Abdichtungsbahnen für die Bauwerks- und Dachabdichtung Flüssigkunststoffe |
| Betontechnologie | Betonzusatzmittel Fasern für Beton Beton |
| Brandschutz | Dämmschichtbildende Baustoffe und Brandschutzbeschichtungen Schwerentflammbare Baustoffe Nichtbrennbare Baustoffe |
| Bauprodukte mit Relevanz für die Innenraumluft | Fußbodenbeschichtungen Universalklebstoffe für Bodenbeläge Dekorative Wandbekleidungen für Innen |
| Holzbau | Geklebte Produkte und Bauarten Mechanische Verbindungsmittel im Holzbau Holz-Beton-Verbundsysteme |
| Mauerwerksbau | Ergänzungsbauteile und Zubehör für Mauerwerk Mauermörtel und Klebstoffe |
| Wand, Dach, Fassade | Fassadensysteme mit Fassadenbekleidungen aus Faserzementplatten und -tafeln Thermisch getrennte Halter und Konsolen für Fassaden |
| Wärme- und Schallschutz | Wärme- und Schalldämmprodukte Wärmedämm-Verbundsysteme |

2 Bauprodukte und -genehmigungen

Eine spezielles Charakteristikum des Bausektors besteht in der besonderen Relevanz der regulatorischen Umgebung (TAB 2022a). Zudem findet sich im Bauwesen notwendigerweise eine hohe Sicherheitsorientierung (Justus 2020; TAB 2022a). Entsprechend kommt der Rechtskonformität der eingesetztem Bauarten und in diesen zur Anwendung kommenden Produktgruppen (Tabelle 2) eine besondere Bedeutung zu.

Die Zulassungs- und Genehmigungspflichten für Bauprodukte und Bauarten ergeben sich im deutschen Recht aus der Musterbauordnung bzw. aus den daraus abgeleiteten Landesbauordnungen der Bundesländer sowie der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (Justus 2020). Dabei sind im einfachsten Fall vor allem drei Stufen Bauaufsichtliche Ver- und Anwendbarkeitsnachweise für Bauprodukte und -arten relevant, die unterschiedlich umfangreich sind (Tabelle 3).

Tabelle 3 Bauaufsichtliche Ver- und Anwendbarkeitsnachweise für Bauprodukte und -arten

| Verwendbarkeitsnachweise für Bauprodukte | Anwendbarkeitsnachweise für Bauarten |
|--|--|
| allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) | allgemeine Bauartgenehmigung (aBG) |
| allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis für das Bauprodukt (abP) | allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis für die Bauart (abP) |
| Zustimmung im Einzelfall (ZiE) | vorhabenbezogene Bauartgenehmigung (vBG) |

Für Bauprodukte oder Bauarten, die signifikant von den Technischen Baubestimmungen abweichen, für die es keine solchen Bestimmungen gibt, und auch keine anerkannten Regeln der Technik existieren - z.B. besonders innovative Baustoffe - muss ein Ver- bzw. Anwendbarkeitsnachweis im Einzelfall beantragt werden. Dieser ist allerdings mit zusätzlichen Kosten und zusätzlichem Aufwand verbunden und berechtigt nicht für den grundsätzlichen Markteintritt eines Produktes¹. Sofern für Baustoffe, deren Verwendung bereits dokumentiert und zertifiziert ist, eine Zulassung gilt, beschränkt sich diese allerdings auf spezifisch vorgegebene Bauweisen und Verwendung in festgelegten Bauklassen. Hiervon abweichende, durch die Weiterentwicklung von Produkten technisch mögliche Abweichungen sind damit rechtlich nicht tragbar bis diese durch Technische Normen oder Novellierung der Verordnungen erfasst sind.

Diese Pfadabhängigkeit schränkt die Anwendung neuer Bauprodukte ein und verhindert damit eine marktgetriebene Verbreitung von Innovationen sofern diese nicht durch den Gesetzgeber und die technischen Gutachten antizipiert wird. Im Regelfall werden sowohl Materialien und Bauteile wie auch deren Anwendung und Einsatzmöglichkeiten durch eigene DIN-Normen geregelt oder in entsprechenden Normen-Anlagen definiert. Eine Novellierung dieser Regelungen ist sehr aufwändig und kostspielig.

¹ Dies gilt ebenfalls für Bauprodukte und -arten, für die entsprechende Nachweise durch Rechtsverordnung vorgesehen sind.

Auf Praxisebene ist weiterhin zu ergänzen, dass eine Gewährleistung für die Verbauung neuer Baustoffe und Bauteile durch Handwerker und bei der Beauftragung von dritten bspw. Ingenieurbüros für Statik und Prüfung von Sicherheitsaspekten bei einem noch nicht definierten und mit einem Standardprozess oder einer Einsatznormung unterlegten Gegenstand unwahrscheinlich ist.

Für einzelne Demonstrationsgebäude wird in der Regel eine Zustimmung im Einzelfall erwirkt. Diese ist aber zu kostspielig und aufwändig, um einen regelmäßigen Einsatz eines neuen Baustoffs oder eines definierten Bauteils zu erreichen, da jede Zulassung nur für einen einzigen Anwendungsfall gilt und damit selbst auf baugleiche weitere Bauvorhaben nicht übertragbar ist. Eine Skalierung einer innovativen Lösung aus dem Einzelfall kann damit nur bei gesichertem Marktzugang, großen finanziellen Ressourcen und mit seriell einsetzbaren Gewerken und Bauteilen – und damit ohne öffentliche Unterstützung – nur einen sehr beschränkten Akteurskreis erfolgen.

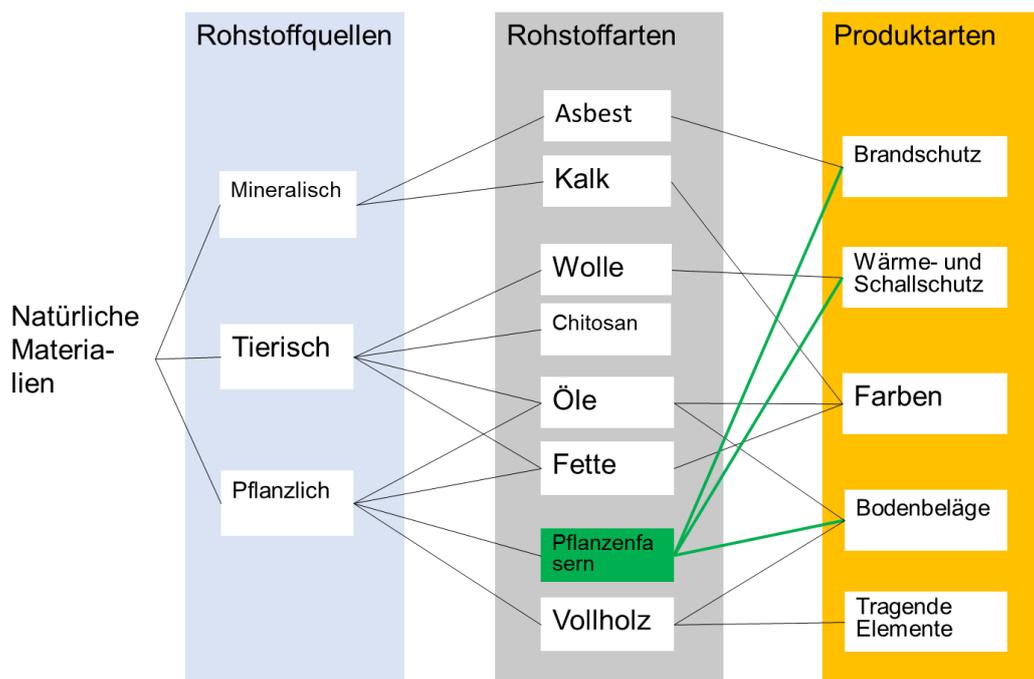
Neben der baurechtlichen Zulassung sind häufig weitere Produktinformationen relevant, etwa solche, die zur Führung bestimmter Produktbezeichnungen und Zertifizierungen berechtigen. Hier spielen Produktinformationen und Labels zur Herkunft der Rohstoffe, technische Produkteigenschaften und die Zusicherung von Nachhaltigkeitsparametern eine wesentliche Rolle, die zum Qualitätsnachweis und der Klimabilanzierung von Baustoffen sowie für Lebenszyklus-Analysen eines ganzen Entwurfs genutzt werden.

Die Europäische Umweltproduktinformation (Environmental Product Declaration EPD) stellt hierfür eine länderübergreifende Grundlage dar, welche mit den nationalen Labels und Dokumentationsstandards bereits kompatibel bzw. in Teilen noch in Einklang zu bringen ist. Mittelbar können also zusätzliche Produktinformationen ausschlaggebend für die Zulassung und Anwendung von Bauprodukten sein.

3 Natürliche Rohstoffe und Pflanzen-Fasern zum Einsatz in Bauprodukten

Die Nutzung natürlicher Rohstoffe datiert Jahrhunderte zurück (TAB 2022b). Während Holz lange Zeit der dominierende Baustoff in unseren Breiten war, wurde er letztlich durch Stahl und Beton ersetzt (TAB 2022b). Pflanzliche Fasern stellen neben mineralischen und tierischen Rohstoffen eine Untergruppe natürlicher Materialien dar, die sich grundsätzlich für den Einsatz in zahlreiche Bauprodukten eignen (s. Abbildung 1). Die Quellen, aus denen sich pflanzliche Fasern gewinnen lassen sind vielfältig und reichen vom gezieltem (agro-)forstwirtschaftlichem Anbau der entsprechenden Rohstoffe, z.B. Hanf oder Flachs, bis hin zur Nutzung von Neben- und Abfallströmen aus bestehenden Wertschöpfungsprozessen, zum Beispiel Zellulose und Lignin aus der Papierherstellung oder Ernterückstände wie Stroh aus dem Getreideanbau. Weitere Potenziale bieten Koppelnutzungen für die Nutzung von Fetten und Ölen und Extrakte aus der Rohstoffaufbereitung sowie Sägenebenprodukte.

Abbildung 1 Beispiele für Typen natürlicher Rohstoffe und deren Einsatzmöglichkeiten im Bau.



Neben der Direktverwertung pflanzenbasierter Fasern finden auch Kunstfasern auf nachwachsender Basis häufiger Eingang in die industrielle Nutzung bei Bauprodukten. Biopolymere sind aufgrund der präzise regulierbaren Produkteigenschaften beliebt für technisch anspruchsvolle Gewerke und werden in Komposit-Lösungen angewandt. Masentechnisch dominiert die Verwendung von Naturfasern, wobei Holz und Holz-nebenströme mit Abstand den größten Anteil an der biobasierten Wertschöpfung in der Bauwirtschaft haben (s. Tabelle 1). Die Forschung nennt eine Reihe von Vorteilen des Einsatzes von pflanzlichen Fasern bzw. entsprechender Komposit-Produkte bzw. Nachteile und bestehende Entwicklungsbedarfe (Tabelle 4).

Tabelle 4 Potenzielle Vor- und Nachteile von pflanzlichen Fasern bzw. entsprechender Komposit-Produkte (z.B. Amin et al. 2022; Vázquez-Núñez et al. 2021; Ahmad et al. 2022; Duque-Acevedo et al. 2022)

| Potenzielle Nachhaltigkeits-Vorteile | Nachteile bzw. bestehende Entwicklungsbedarfe |
|--|---|
| Großes Aufkommen und Erneuerbarkeit faserhaltiger Biomasse | Ungleichmäßigen Qualität der Ausgangsstoffe |
| Binden von CO ₂ in den Endprodukten | Schlechtere thermische und mechanischen Eigenschaften |
| Geringere Toxizität bzw. größere Umweltfreundlichkeit | Verminderte Haltbarkeit |
| Bessere biologische Abbaubarkeit und Rezyklierbarkeit | Höhere Feuchtigkeitsabsorption |
| Geringere Dichte bzw. höhere Leichtigkeit | |
| Potenzial Abfallströme zu veredeln | |

Naturgemäß können Naturprodukte gewissen Schwankungen unterliegen, allerdings sind diese Abweichungen in der Regel so geringfügig, dass diese nicht ausschlaggebend für die Anwendung oder nicht-Anwendung der Produkte sind. Entsprechende Ansprüche und Voraussetzungen für einzelne Gewerke sind vorab gut abschätzbar. Eine grobe Schätzung der Relevanz einzelner Produktgruppen kann zusammengefasst werden als: je größer das Masseaufkommen der Bauprodukte ist, desto weniger relevant sind exakte die Präzision der einzelnen Komponenten und deren Aufbereitung.

Ein weiteres wichtiges Einsatzgebiet nachwachsender Baustoffe ist die Möglichkeit der Bestandertüchtigung von Gebäuden (FNR 2023a). Neben Gewichtsvorteilen für die Nachverdichtung durch geringere spezifische Dichten biobasierter Materials, wirken sich die dynamischen Eigenschaften von Pflanzenfasern hinsichtlich Wasserdampfdiffusion, Wärme- und Wasserleitfähigkeit durch heterogene Porengrößen, eine hohe Widerstandsfähigkeit bei Wasserexposition und eine hohe Temperaturamplitude in der Wärmedämmung im Winter aber auch Kältewahrung im Sommer positiv aus (FNR 2023a,b).

Für die Anwendung von biobasierten Produkten unter dem Gesichtspunkt der Kreislaufwirtschaft ist die Unterscheidung von naturbelassenen und mit additiven versetzten Produkten sowie komplexen und mit heterogenen Eigenschaften versetzte Komposit-Lösungen besonders relevant. Während Rohprodukte besonders gut wiederverwendet werden können, sind insbesondere brandhemmende Zusätze sowie Komposit-Material unterschiedlicher Recycling- und Restverwertung hinderlich. Die Zielsetzung ist hier, möglichst reine Naturprodukte auf modularer Ebene zu schaffen, welche anspruchsvolle technische Eigenschaften erfüllen und homogen in Kreisläufe gebracht werden können.

4 Herausforderungen neuartiger Bauprodukte mit Pflanzenfasern

Die vorliegende Untersuchung im Rahmen der Initiative identifizierte eine Reihe von Herausforderungen für neuartige Bauprodukte mit pflanzlichen Fasern. Diese erstrecken sich über verschiedene Bereiche des Innovationssystems Bau.

4.1 Unternehmerische Aktivität

Die deutsche Bauwirtschaft ist insgesamt fragmentiert und vornehmlich in KMUs organisiert (TAB 2022a). Während der Bereich der Bauchemie von einigen großen Marktteilnehmern geprägt ist² sind der Handel und Rohstoffvertrieb aufgrund hoher Logistikkosten regional organisiert. Insbesondere auf der Ebene der planenden und ausführenden Architektur-, Ingenieurs- und Handwerksbetriebe ist eine sehr hohe Fragmentierung mit zahlreichen kleineren und Kleinstbetrieben festzustellen (BBSR 2019). Es ist davon auszugehen, dass dies insbesondere für pflanzenfaserbasierte Bauprodukte zutrifft. So spricht eine aktuelle Kurzstudie des TAB (2022b, S. 5) zum urbanen Holzbau z.B. von einer „von Kleinstbetrieben geprägten Branche“. Dies erhöht die Transaktionskosten der Koordination und verringert die Möglichkeit Skaleneffekte zu realisieren. Wenn jedoch - wie beim Holzbau - eine größere Koordination nötig ist, weil sich die Arbeitssequenz von der im konventionellen Bau unterscheidet (TAB 2022b), verstärkt sich dieses Problem noch. Gleichzeitig ist es für kleinere Unternehmen aufwändiger fortschrittliche IT-Systeme zu implementieren, die bspw. einen einfacheren Datenaustausch der am Bau Beteiligten ermöglichen. Ebenso scheinen kleinere Betriebe weniger geeignet, um die Standardisierung der Produktion voranzutreiben - und somit die Senkung der Produktionskosten. Auch bedeutet die Fragmentierung eine hohe Hürde für die Entwicklung von Innovationen: Die Notwendigkeit der Zertifizierung verschiedenster Teilaspekte bedeutet letztlich einen signifikanten Konsum an Ressourcen wie etwa Zeit und Geld.³ Insofern ist es wenig verwunderlich, dass die Zahl der Unternehmen, welche neue Gewerke am Objekt testen wollen, überschaubar ist.

Auch die Umsetzung einzelner innovativer, biobasierter Produkte unterliegt diesen Herausforderungen. So stellt jedes neue Produkt einen zusätzlichen notwendigen Wissenserwerb für Baustoffhandel, Handwerksunternehmen und Bauplaner dar. Damit bestehen auch auf Anwenderseite Transaktionskosten, wobei das Handwerk gegenüber den übrigen Akteuren als noch fragmentierter anzusehen ist. Eine jede Innovation bedeutet für die daran beteiligten Akteure ein unternehmerisches Risiko, welche diese in industriellem Maßstab nur zu tragen bereit sind, sofern eine umfassende Zulassung der Produkte erfolgt ist, welche einen Mindestabsatz gewährleistet. Gleichwohl wird das Potenzial zur Nutzung von Innovativen Produkten als Nischen für die Positionierung der einzelnen Akteure als relevant und gewinnbringend gesehen.

² Deutsche Bauchemie e.V., 2023 - <https://deutsche-bauchemie.de/>

³ Dauer des Zulassungsprozesses beträgt bei Zementinnovationen ca. 10-15 Jahre (TAB 2022a).

Mit Ausnahme der Bauchemie besteht weiterhin ein Nachfragemonopol, wodurch der Baupreis zum entscheidenden Wettbewerbskriterium wird und Betriebe zur Suche möglichst geringer Kostenstrukturen im Bauvorhaben treibt (vgl. Brömer 2014 in BBSR 2019). Ein proaktives Vorgehen bei der Etablierung biobasierter Produkte ist damit eher durch große Produkthanbieter oder eine ausgeprägte und mengenmäßig ausreichende Nachfrage nach innovativen Baustoffen zu erwarten.

4.2 Forschung und Entwicklung

Eine Analyse der seit 2015 begonnenen (Teil-)Projekte des „Waldklimafonds“ und des Förderprogramms „Nachwachsende Rohstoffe“ in der Projektdatenbank des Projektträgers Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) impliziert, dass ein Fokus der Forschungsförderung zu natürlichen Baumaterialien auf dem Holzbau liegt. Während eine Suche nach dem Begriff „Holzbau“ 82 geeignete Treffer ergab für Projekte ab 2015, ist die Anzahl an Projekten für andere natürliche Baumaterialien insb. Faserprodukte bedeutend geringer (Tabelle 5).

Insgesamt spiegelt sich dies auch in der Zahl von Lehrstühlen, Forschungsprojekten und Fördermitteln weiterer Fördergeber wider. Es wird dennoch an einem breiten Spektrum biobasierter Baustoffe geforscht, welche technische Prüfungen durchlaufen und zunehmend auch in den Demonstrationsbetrieb ohne Regelnutzung übergehen. Unter den dt. Hochschulfakultäten besitzen die meisten Spitzeninstitute entsprechende Programme und Lehrstühle. Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und die Hochschule Karlsruhe (HKA) als in der TRK ansässige Institute besitzen hier wesentliche Kompetenzen und zählen mit zur Spitzengruppe der FuE-Akteure in diesem Bereich. Insbesondere die Bautechnik zur seriellen und modularen Vorproduktion von Bauteilen und digitalen Öko-Bilanzierung und Integration in BIM und Lean-Building-Prozesse ist ein regionales Kompetenzfeld, welches hervorzuheben ist.

Verschiedene innovative pflanzenfaserbasierte Baustoffe haben erfolgreich den Markteintrittsprozess durchlaufen, darunter insbesondere Dämmprodukte aus Cellulose, Stroh, etc. sowie Naturfaserputze und weitere Bereiche (FNR 2023b, FNR 2024). Aus dem betrachteten Gebiet der TRK und des Oberrheins sind u.a. die BAFA Neu GmbH für Hanf⁴ oder Neptu GmbH mit der allochthonen Rohstoffquelle Seegrass⁵ als relevante Entwicklungs- und Markttreiber zu nennen.

In der angrenzenden französischen Region Grand-Est belegen viele bereits etablierte und in der regulären Anwendung befindliche Produkte den technisch möglichen höheren Verbreitungsgrad und die mögliche Produkt- und Nutzungsvielfalt. Der Unterschied bei der Verbreitung und die schwierige Übertragung der technisch nachgewiesenen Eignung über die Grenze hinweg liegt im Wesentlichen in der Anwendungsregulierung begründet.

⁴ <https://bafa-gmbh.de/Produkte-Industrieprodukte.asp>

⁵ <http://www.neptugmbh.de/>

Tabelle 5 Projektförderung durch die FNR im Fokusbereich des Projektes PFBau.

| Suchbegriff | Anzahl baubezogener Projekte (Projekte ab 2015) |
|---------------|---|
| Holzbau | 82 |
| Pflanzenfaser | 0 |
| Faserstoff | 9 |
| Baustoff | 23 (davon nicht primär Holzbau bezogen: 10) |

Im Gegensatz zur Nutzung pflanzenfaserbasierter Baustoffe, scheint die Produktion der entsprechenden Biomasse weniger Forschung und Entwicklung zu bedürfen. Verschiedene Untersuchungen im TRK-Gebiet und dem Oberrhein haben gezeigt, dass ein technisches Anbaupotenzial für verschiedene Pflanzen, insbesondere Hanf und Miscanthus besteht (vgl. Meister et Mediavilla 1999, Müller-Sämann et al. 2003), welche in Abschnitt 4.6 näher beschrieben werden. Für die Landwirte ist der Einstieg in die Produktion bestimmter Faserpflanzen vielmehr eine Investitionsentscheidung, da für den Anbau bestimmter Pflanzen teils neue Landmaschinen beschafft werden müssen (Genossenschaften), eine schnelle und sichere Umstrukturierungsrefinanzierung der initialen Kosten notwendig ist und Betriebe zusätzliches Knowhow erwerben müssen.

Im Bereich der räumlichen Ertragspotenzialerhebung verweisen o.g. Studien ebenfalls auf geringe technische Hürden bei der Kultivierung und Erntetechnologie. Feldversuche zum Anbau und Maschinenteknik des LTZ Augustenberg wie auch bestehende Wertschöpfungs-systeme bspw. in der Region Grand-Est bestätigen diese Annahmen. Insofern kommt es für die Primärproduktion vorrangig auf das (langfristige) Commitment der Abnehmer an, was für einen nachfragegesteuerten Innovationsprozess spricht.

4.3 Wissenstransfer

Der Transfer aus der Forschung, speziell durch die Zusammenarbeit von Unternehmen mit der Wissenschaft stelle durch die niedrigeren Förderquoten für die Produktprüfverfahren als nicht experimentelle Vorhaben ein unzumutbares Risiko dar für Unternehmen dar (Zitat eines interviewten Unternehmens). Dies betrifft durch die besonderen Prüfanforderungen in ungleich höherem Maße tragende Bauelemente, die das größte Baustoff-massepotenzial und damit Nachfragesicherheit und CO₂-Senkepotenzial bieten.

Wie erwähnt, erhöht zudem die kleinteilige Struktur des Bausektors die Transaktionskosten der Akteure für eine entsprechende Koordination. Zusätzlich behindert die fehlende Vernetzung von Handwerk und Herstellern den Wissens- bzw. Innovationstransfer, wodurch der Markteintrittsprozess nach der Produktentwicklung verzögert wird. Praxismedien legen z.B. nahe, dass der Holzbau sich nach wie vor durch Trial-and-Error weiterentwickelt worüber aufseiten potenzieller Auftraggeber jedoch nach wie vor Unwissenheit bzw. Unkenntnis zu bestehen scheinen (Bundesstiftung Baukultur 2019).

Mittlerweile existieren verschiedene Datenbanken, welche relevantes Wissen zu nachhaltigen Baumaterialien verfügbar machen wollen, von denen nachfolgend einige beispielhaft genannt werden (Tabelle 6).

Tabelle 6 Ausgesuchte Datenbanken zum nachhaltigen Bauen

| Name der Datenbank | Kurzbeschreibung | Herausgeber | Link |
|---------------------------|--|--|--|
| dataholz.eu | Sammlung bauphysikalischer und ökologischer Daten für Holz- und Holzwerkstoffe, Baustoffe, Bauteile und Bauteilfügungen für den Holzbau. | Holzforschung Austria – Österreichische Gesellschaft für Holzforschung (HFA-ÖGH) | https://www.dataholz.eu/ |
| DGNB Navigator | Bauprodukteplattform mit Herstellerangaben zu Nachhaltigkeitsaspekten | Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. | https://www.dgnb-navigator.de/ |
| FNR Produktdatenbanken | Sammlung von Produktdaten, Anwendungsleitfäden und Marktdaten | Fachagentur Nachhaltige Rohstoffe e.V. | https://baustoffe.fnr.de/ https://baustoffe.fnr.de/daemmstoffe/produkt Datenbank-daemmstoffe |
| naturePlus database.org | Produktdatenbank mit allgemeinen, technischen und Umwelt-bezogenen Informationen von Bauprodukten | NaturePlus e.V. | https://www.natureplus-database.org/ |
| ÖKOBAUDAT | Vereinheitlichte Datenbasis für die Ökobilanzierung von Bauwerken | Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen | https://www.oeko-baudat.de/ |

4.4 Harmonisierte Zielvorstellungen

Bislang scheint es keine dezidierte politische Strategie für pflanzenbasierte Baustoffe zu geben. Die aktuelle Kurzstudie zum urbanen Holzbau des TAB (2022b) weist darauf hin, dass Nachhaltiges Bauen von einer Harmonisierung der Strategien der beteiligten Ministerien auf Bundesebene profitieren könnte.

Dies könnte beispielsweise das Verhältnis der Priorisierung von Holz und jährlich zu erntenden NawaRo für Baustoffe oder thermische und weitere Stoffliche Nutzungen bzw. die Abwägung und Prognose der Nachfragentwicklung und Bestandsmengen räumlich differenziert umfassen. Eine entsprechende harmonisierte Zielstellung könnte sich bspw. positiv auf die Erarbeitung expliziter Bundes-Förderinstrumente zur Stärkung weiterer pflanzenbasierter Baustoffe neben erfolgreichen Holzbauförderprojekten auswirken.

4.5 Marktentwicklung

Der Markt für Baustoffe mit Pflanzenfasern ist derzeit ein Nischenmarkt. Selbst der Holzbau stellt nach wie vor im Gesamtbauaufkommen eine Nische dar. Zwar wurde 2021 knapp jede fünfte Baugenehmigung für Wohn- und Nichtwohngebäude ausgesprochen, die vorwiegend auf Holz setzen. Jedoch betrug die Wachstumsrate des Marktanteils zwischen 1993 und 2021 jährlich lediglich ca. 2 %. Außerdem konzentriert sich der Holzbau nach wie vor auf Gebäude mit 1 bis 2 Wohnungen und umfasst nur vereinzelt den Mehrgeschossbau (Destatis 2021). Auch bleibt Bauen mit nachwachsenden Rohstoffen bislang teurer als konventionelles Bauen (Bundesstiftung Baukultur 2019) wobei über einen Lebenszyklus hinweg betrachtet Kostenunterschiede weitgehend egalisiert werden können (Zitat Workshopteilnehmer).

Im Privatkundenmarkt besteht ein Segment für pflanzenbasierte Baustoffe im Einfamilienhausbau. Die Kunden sind bereit entsprechende Mehrkosten zu tragen – ähnlich dem Bio-Lebensmittelmarkt (Zitat Workshopteilnehmer). Gleichwohl handelt es sich hierbei um eine Marktnische. Institutionelle Investoren und gewerbliche Bauaufträge, welche den Großteil der Bauwirtschaft bilden, sind ohne Kostenvorteile nicht zu einer alternativen Auftragsgestaltung zu bewegen. Auch wenn einzelne Unternehmen aus der TRK sich auf entsprechende Bereiche spezialisiert haben, reicht dies nicht für eine breite Industrialisierung aus.

Ein zukünftiges Nachfragepotenzial wird dennoch erwartet. Einerseits bieten Kreditvergaberegulungen und Nachhaltigkeitsberichterstattung mit den entsprechenden ab 2024 und 2025 greifenden Verordnungen einen signifikanten Anreiz durch „grüne Bauten“ die Nachhaltigkeit des Investorenportfolios zu erhöhen. Andererseits kann mit zunehmender Preisentwicklung von CO₂-Zertifikaten ein zumindest in beschränktem Ausmaß relevanter Business-Case durch CO₂-Bindung in pflanzenbasierten Baustoffen entstehen.

Eine weitere Hebelwirkung für die Verstärkung der Nachfrage liegt in der Ausbildung und Schulung insbesondere von Baustoffhändlern und ausführenden Handwerksbetrieben. Diese bilden häufig den kundenseitigen Erstkontakt und beraten bei der Materialwahl. Gleichzeitig herrscht durch die besondere Fragmentierung des Marktes mit kleinen Betrieben ein offener Bedarf bei der Schulung im Umgang mit innovativen, pflanzenbasierten Baustoffen. Dies führt zur Zurückhaltung und Nichtübernahme von Gewährleistungen obwohl Fachanbieter gute Auftragslagen nachwies (Zitat Workshopteilnehmer).

Ein weiteres hervorzuhebendes Potenzial für eine zukünftig wachsende Nachfrage liegt in der wachsenden Zahl von Bestandsgebäuden und einem signifikanten prognostizierten Trend hin zur mehr Bestandsertüchtigung (FNR 2023a), Low-Tech Aus- und Umbau (vgl. BBSR 2023) und einem insgesamt aufwachsen der Kreislaufwirtschaft.

Was die Produktion der eingesetzten Rohstoffe anbelangt, argumentieren Befürworter zwar, dass eine kostentechnische Konkurrenzfähigkeit von relevanten Kulturen wie z.B.

Miscanthus, Silphie, Soja, oder Hanf durchaus gegeben sei. Vielmehr liegen die Hemmnisse in der Ernte, Lager und Verarbeitungslogistik. Zudem schrecken Landwirte vor dem Risiko zurück, das damit einherginge, sich an einen zu kleinen Abnehmerkreis zu binden. Gleichzeitig sind kleinere Firmen wie bspw. die BAFA Neu GmbH zu klein, um den notwendigen Maßstab für einen industriellen Abnehmermarkt zu erreichen bzw. das Marketing für den Eintritt leisten zu können (Zitat Experteninterview).

4.6 Ressourcenverfügbarkeit

Entsprechend der oben genannten Aspekte erscheint die Ressourcenverfügbarkeit, monetär via Forschungsförderung wie Wissen durch Aus- und Weiterbildung, begrenzt, wenn es um den dezidierten Einsatz nachwachsender Rohstoffe geht. Letztlich lag der Fokus der Förderpolitik bislang vor allem auf der Energieeffizienz von Gebäuden gegenüber deren Materialeffizienz und Wiederverwertbarkeit. Zudem sind nachhaltigkeitsrelevante Bauförderungsinstrumente bis dato technologieoffen.

Für die TechnologieRegion Karlsruhe sind die in den Anlage 7 auf Folie 37 beschriebenen Rohstoffe als von gesteigerter Relevanz zu betrachten. Hanf und Miscanthus sind die zentralen Faserpflanzen, welche sich für die Kultivierung im Oberrheingebiet besonders eignen und als wirtschaftlich tragfähig eingeschätzt werden (vgl. Meister et Mediavilla 1999, Müller-Sämann et al. 2003). Diese zeichnen sich durch vielfältige Anwendung, vollständige Nutzung und geeignete Standortfaktoren für den Anbau aus, wobei die Investitionskosten bei Hanf für die den Aufschluss und die Aufbereitung am Standort TRK eine wesentliche Hemmschwelle darstellen (ebenda, Workshopteilnehmer bestätigt).

Weitere offene Potenziale bestehen vor allem in der Nutzung des regionalen Holzaufkommens, welches aktuell trotz Verwertbarkeit und Nachfrage in der Bauwirtschaft häufig als Rohholz exportiert wird, in Form von Bauholz, wie auch durch Verwertung der Nebenströme aus Verschnitt und Sägespänen, Schliffstäuben sowie Borke) mit nahezu 100% Nutzung von (Hemi-) Cellulose, Lignin und Tanninen in Bauchemikalien, als Fasern oder Schäben.

Als Nebennutzung bestehender Landwirtschaftlicher Erzeugnisse sind Getreide-Stroh und historisch stark verbreitete Anbaupflanzen wie Lein im Kraichgau und Hopfengewächse als Koppelprodukte, sowie Kenaf oder Fasernessel mit der Faser als Kernprodukt im Baubereich verwertbar - jedoch mit geringen wirtschaftlichen Aussichten durch landschaftliche Fragmentierung, geringe Anbauflächeneignung oder zu niedrige Erträge (vgl. Meister et Mediavilla 1999, Müller-Sämann et al. 2003).

Rohstoffübergreifend ist die Nutzung von Pflanzenkohle als Betonbeimischung und Zusatz zu zahlreichen Baustoffen ein bisher wenig berücksichtigtes, ubiquitäres Potenzial. Weintrester bietet sich in der Weinbauregion TRK für eine entsprechende Nutzung an. Als Nischenanwendung ist außerdem die Nutzung von Biertreber als Reststoff der Brauwirtschaft für die Mycelzucht eine geeignete lokal verfügbare Ressource.

Unter dem Gesichtspunkt der Flächennutzung können am Standort TRK außerdem extensiv zu bewirtschaftende Ressourcen aus der Au-Landschaft des Oberrheins und der Zuflüsse als nutzbare Potenziale betrachtet werden. Im Bereich der Weiden- und Weichholztriebnutzung gibt es bspw. aktuelle Beispiele zur Tragwerkserrichtung in der Region, welche am KIT entwickelt wurden. Eine Kostenanalyse dieser Anwendung befindet sich aktuell in der Evaluation.

4.7 Legitimität pflanzlicher Rohstoffe

Abstrakt betrachtet stellt der Einsatz pflanzenbasierter Rohstoffe einen Wandel der Baukultur dar. So stellt etwa die Forderung, den gesamten Lebenszyklus von Bauwerken und Gebäude als ggf. (temporäre) Rohstofflager zu betrachten (z.B. Bundesstiftung Baukultur 2020) einen Bruch mit der dominanten linearen Vorstellung dar, dass diese möglichst „für die Ewigkeit“ bestehen sollen. Dies ist insofern relevant als dass das Ökosystem Bau sich in Wechselwirkung mit dominanten Denkmustern entwickelt hat und diese somit (implizit) bevorzugt. So orientieren sich z.B. die Honorarordnung für Architekten und Ingenieure und die darin definierten Leistungsphasen an den Standardabläufen der konventionellen Bauweise. Eine Überarbeitung dieser Vorschriften zur stärkeren Berücksichtigung der Zirkularität in der Bauwirtschaft ist allerdings angekündigt.

Bezüglich des Holzbaus weist das TAB (2022b) darauf hin, dass das Vergaberecht kooperativen Erfordernissen wenig Rechnung trägt. Demgegenüber ist davon auszugehen, dass Themen wie Urbanisierung und die Klimakrise das Interesse an nachhaltigen Baumaterialien weiter steigern werden. An dieser Stelle ist von einem, aktuell noch primär akademisch geprägten Bewusstseinswechsel auszugehen, welcher jedoch zunehmend Einzug in die Industrie hält. Seitens der Landwirtschaft besteht eine grundsätzliche Offenheit für den Anbau neuer/alter Faserpflanzen – vorausgesetzt es lässt sich kostentechnisch (Ertragseffizienz gegenüber anderen Früchten) für den Landwirtschaftsbetrieb realisieren. Dies betrifft sowohl Landwirte im Haupt- wie im Nebenerwerb, letztere insbesondere wegen des geringeren Aufwands im Anbau mehrjähriger NawaRo und einjähriger, nicht bewirtschaftungsintensiver Pflanzen.

5 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend ergeben sich Chancen und Potenziale für bzw. durch pflanzenbasiertes Bauen. Gleichzeitig bestehen auch erhebliche Hürden. Auf Basis der Literaturanalyse sowie der Gespräche mit Stakeholdern können folgende Handlungsbedarfe sowohl in der TRK als auch im gesamten Innovations-Ökosystem abgeleitet werden:

Förderung der Kommerzialisierung und Skalierung: Um den Transfer der Forschungsergebnisse in den Markt zu erreichen wäre bspw. eine Markteintritts-Folgefinanzierung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten oder eine rechtliche bzw. versicherungstechnische öffentliche Bürgschaft bis zur Regelzulassung eines Bauproduktes im kommerziellen Demonstrationsbetrieb denkbar. Innovations- und Transferpotenzial wird weiterhin im Cross-Branchen-Bereich gesehen. Hier kann viel Arbeit gespart werden, insbesondere durch die Entwicklung simpler Basis-Module oder Werkstoffe die in verschiedenen Bereichen genutzt werden können.

Vernetzung relevanter Akteure: Die verschiedenen Akteure sollten noch enger zusammenarbeiten. Optimal wäre insbesondere eine Zusammenarbeit von Firmen, die Komplettmodule bauen und vertreiben mit Planungsbüros welche diese seriell einsetzen, um Freiheitsgrade bei technischen Anwendungsfällen, beteiligte Einzelakteuren und Einzelprüfungen zu verringern. Ein Lösungsweg hierfür könnten regionale Joint Ventures von Gewerkeherstellern und Planern bzw. Bauherren sein.

Informationsbereitstellung: Für viele Akteursgruppen wäre eine verbesserte Transparenz und Informationslage bei biobasierten Baustoffen sehr hilfreich. Bislang sind z.B. entsprechende Umwelt- und Herkunftslabels zur Dokumentation und Hervorhebung der einpreisbaren ökobilanziellen Vorteile oft uneinheitlich und schwierig zu verstehen. Hinzu kommt, dass Angebote z.B. im Building Information Modelling offenbar noch nicht vollumfänglich auf die Bedürfnisse des Bauens mit erneuerbaren Rohstoffen zugeschnitten sind und eine entsprechende Weiterentwicklung erst bei Vorliegen ausreichender Produktdaten zu erwarten ist. Dies beinhaltet auch regulatorische Fehlanreize wie die höhere Emissionsbilanzierung von nachwachsenden Rohstoffen gegenüber fossilen Recyclingprodukten.

Anreizsetzung für nachhaltiges Bauen: Die Anreize dafür nachhaltige Baustoffe einzusetzen ist zu erhöhen. In jüngerer Vergangenheit beschlossene Schritte sind z.B. die Einführung von CO₂-Schattenpreisen für Sanierungen und Neubauten aus Landesmitteln in Baden-Württemberg⁶⁷ oder die Einführung der Förderung von Nachhaltigkeitsaspekten im Rahmen der Bundesförderung für effiziente Gebäude, die über das Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude nachgewiesen wird. Darüber hinaus könnten zusätzliche Schritte hilfreich sein, wie eine CO₂-Besteuerung für Gebäude.

⁶ <https://www.heuking.de/de/news-events/newsletter-fachbeitraege/artikel/neues-klimaschutzgesetz-in-baden-wuerttemberg-wirkt-sich-auf-vergaben-aus.html>;

⁷ https://beteiligungportal.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/beteiligungportal/Dokumente/220-920_CO2-Schattenpreis-Verordnung_01.pdf

Abschließend soll darauf verwiesen werden, dass Materialinnovationen lediglich einen Ansatzpunkt bieten um die Nachhaltigkeit des Bausektors zu erhöhen. Ergänzend muss es ebenfalls zu systemischen Veränderungen kommen, z.B. bzgl. der Frage „Sanierung oder Neubau?“, oder des Verständnisses der Lebenszeit von Gebäuden. Hinzukommt, dass mit einem zunehmendem Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen deren Verfügbarkeit tendenziell abnimmt in Abhängigkeit von ihren Regenerationszyklen. Ebenfalls zu Bedenken ist die Frage der Kreislaufführbarkeit von Kompositmaterialien mit pflanzlichem Anteil, wobei die betrachteten Faserpflanzen unter technischen, jedoch noch nicht unter regulatorischen Aspekten als Additivfrei einsetzbar wahrgenommen werden.

6 Literaturverzeichnis

Ahmad, Hammad; Chhipi-Shrestha, Gyan; Hewage, Kasun; Sadiq, Rehan (2022): A Comprehensive Review on Construction Applications and Life Cycle Sustainability of Natural Fiber Biocomposites. In: *Sustainability* 14 (23), S. 15905. DOI: 10.3390/su142315905.

Amin, Muhammad Nasir; Ahmad, Waqas; Khan, Kaffayatullah; Ahmad, Ayaz (2022): A Comprehensive Review of Types, Properties, Treatment Methods and Application of Plant Fibers in Construction and Building Materials. In: *Materials (Basel, Switzerland)* 15 (12). DOI: 10.3390/ma15124362.

BBSR (2019): Mögliche Optionen für eine Berücksichtigung von grauer Energie im Ordnungsrecht oder im Bereich der Förderung AZ:10.08.17.7-17.07b

BBSR (2019): Entwicklung der Marktstruktur im deutschen Baugewerbe. ISSN: 1868-0097

BBSR (2023): Lowtech im Gebäudebereich. Fachsymposium TU Berlin 16.05.2022 ISSN: 2199-3521

Bundesstiftung Baukultur (2019): Ettersburger Gespräch 2019. Strategiepapier, zuletzt geprüft am 20.03.2023.

Bundesstiftung Baukultur (2020): Ökologisches Bauen. Ergebnispapier zum Fachgespräch am 11. August 2020, zuletzt geprüft am 20.03.2023.

Destatis (2021): Baugenehmigungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden nach überwiegend verwendetem Baustoff. Lange Reihen ab 1980 - 2021, zuletzt geprüft am 28.03.2023.

DIBt (o.D.): Website DIBt, zuletzt geprüft am 03.03.2023.

Duque-Acevedo, Mónica; Lancellotti, Isabella; Andreola, Fernanda; Barbieri, Luisa; Belmonte-Ureña, Luis J.; Camacho-Ferre, Francisco (2022): Management of agricultural waste biomass as raw material for the construction sector: an analysis of sustainable and circular alternatives. In: *Environ Sci Eur* 34 (1). DOI: 10.1186/s12302-022-00655-7.

Elbers, Ulrike (2022): Ressourcenschonendes Bauen – Wege und Strategien der Tragwerksplanung. In: *Bautechnik* (99), S. 57–64. DOI: 10.1002/bate.202100114.

FNR (2023a): Altbausanierung mit nachwachsenden Rohstoffen. 5. Aktualisierte Auflage.

FNR (2023b): Baustoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. 7. Aktualisierte Auflage. https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/P18485_fnr_brosch_bauenNR_A5_v7r06_230926_web.pdf

FNR (2024): Produktdatenbank Dämmstoffe <https://baustoffe.fnr.de/daemmstoffe/produkt-datenbank-daemmstoffe>, zuletzt geprüft am 17.10.2023

Justus, Oliver (2020): Regelung von Bauprodukten und Bauarten. Gütegemeinschaft Holzbau-Ausbau-Dachbau, zuletzt geprüft am 27.03.2023.

Meister, E.; Mediavilla, V. (1999) Prüfung des Anbaus und der Möglichkeiten einer Markteinführung von neuen Faserpflanzen (Hanf, Kenaf, Miscanthus) <https://www.landwirtschaft-bw.de/>

Müller-Sämann, K.M.; Reinhardt, G.; Vetter, R.; Gärtner, S (2003) Nachwachsende Rohstoffe in Baden-Württemberg: Identifizierung vorteilhafter Produktlinien zur stofflichen Nutzung unter Berücksichtigung umweltgerechter Anbauverfahren. FZKA-BWPLUS - BWA 20002

TAB (2022a): Innovative Technologien, Prozesse und Produkte in der Bauwirtschaft (Arbeitsbericht Nr. 199), zuletzt geprüft am 20.03.2023.

TAB (2022b): Urbaner Holzbau, zuletzt geprüft am 04.04.2023.

UBA (2022) Die Nutzung natürlicher Ressourcen – Ressourcenbericht für Deutschland 2022

Vázquez-Núñez, Edgar; Vecilla-Ramírez, Andrea M.; Vergara-Porras, Berenice; Del López-Cuellar, María Rocío (2021): Green composites and their contribution toward sustainability: A review. In: *Polymers and Polymer Composites* 29 (9_suppl), S1588-S1608. DOI: 10.1177/09673911211009372.

Zinke, H.; El-Chichakli, B.; Wydra, S.; Hüsing, B. (2016): Bioökonomie für die Industrienation, zuletzt geprüft am 27.03.2023.