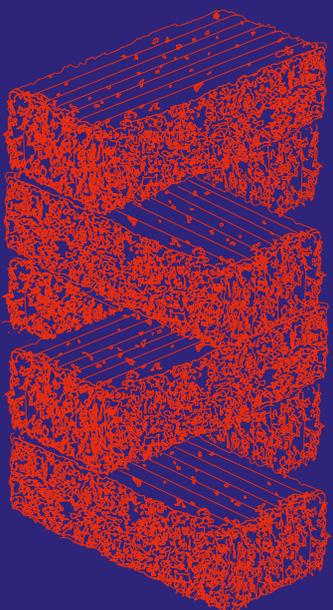


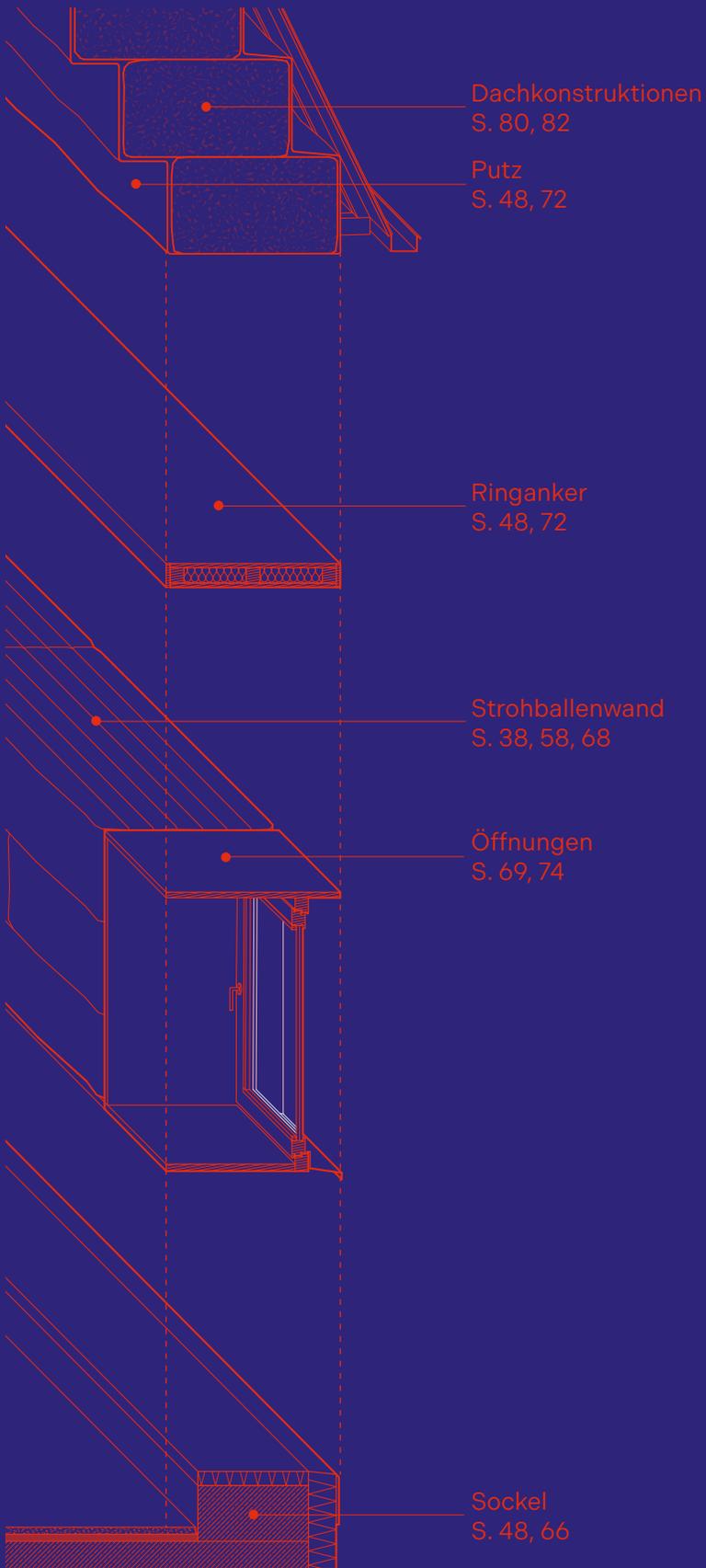
AUFSTROH



BAUEN

0 Inhalt

4	Einleitung
6	Abstract
8	Aktuelle Situation
12	Abgrenzung der Bauweisen
16	Vor- und Nachteile
22	Grundlagen
24	Historische Entwicklung
36	Baustoff Stroh
42	Herstellung von Baustrohballen
46	Bauphysik
48	Wärmeschutz
52	Feuchteschutz
56	Schallschutz
58	Brandschutz
60	Tragwerk
62	Vertikale Lasten
66	Horizontale Lasten
68	Konstruktion
70	Fundament und Sockel
72	Wände
76	Wandverkleidungen
78	Öffnungen
80	Innenwände und Stützen
82	Ringanker
84	Dach
86	Gewölbekonstruktionen
88	Genehmigung
90	Allgemeines
92	ZiE und vBg
94	Referenzen
108	Ausblick
112	Nachwort
114	Danke
116	Quellenverzeichnis
118	Hilfreiche Links, Adressen und Netzwerke
120	Impressum



AUF STROH BAUEN

Ein Einblick in den lasttragenden Strohballenbau

Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades eines MArch - Teil 1
Universität für industrielle und künstlerische Gestaltung Linz

Anna Dienberg

Studienrichtung
Architektur Base Habitat | Kennzahl 443

Institut
Raum und Design

Betreuung
Studio Urban | MA Andrijana Ivanda

Linz, 2024

1

Abstract

Warum Bauen mit Stroh

Abgrenzung der Bauweisen

Vor- und Nachteile

Einleitung

ABSTRACT

Um die Folgen der Klimakrise eindämmen zu können, ist der Wandel zu einer nachhaltigeren Architekturpraxis unerlässlich. Die Wahl der Baustoffe spielt dabei eine wichtige Rolle, weshalb das Interesse an ökologischen Materialien im Bauwesen in letzter Zeit stark wächst. Eines dieser Materialien ist Stroh: es vereint in seiner Herstellung, Verwendung und Entsorgung gleich mehrere ökologische und ökonomische Vorteile. Aufgrund seiner hohen Dämmleistung wird Stroh aktuell in erster Linie als Dämmstoff verwendet. Wie einige Beispiele aus der jüngeren Architektur zeigen, kann Stroh in Form von Quaderballen auch statisch eingesetzt werden. In diesem Fall übernehmen die Strohballen sowohl dämmende als auch lasttragende Funktionen, wodurch ein homogener Wandaufbau entsteht und jede weitere Tragkonstruktion redundant wird. [Minke, Krick

2014; FASBA 2019]

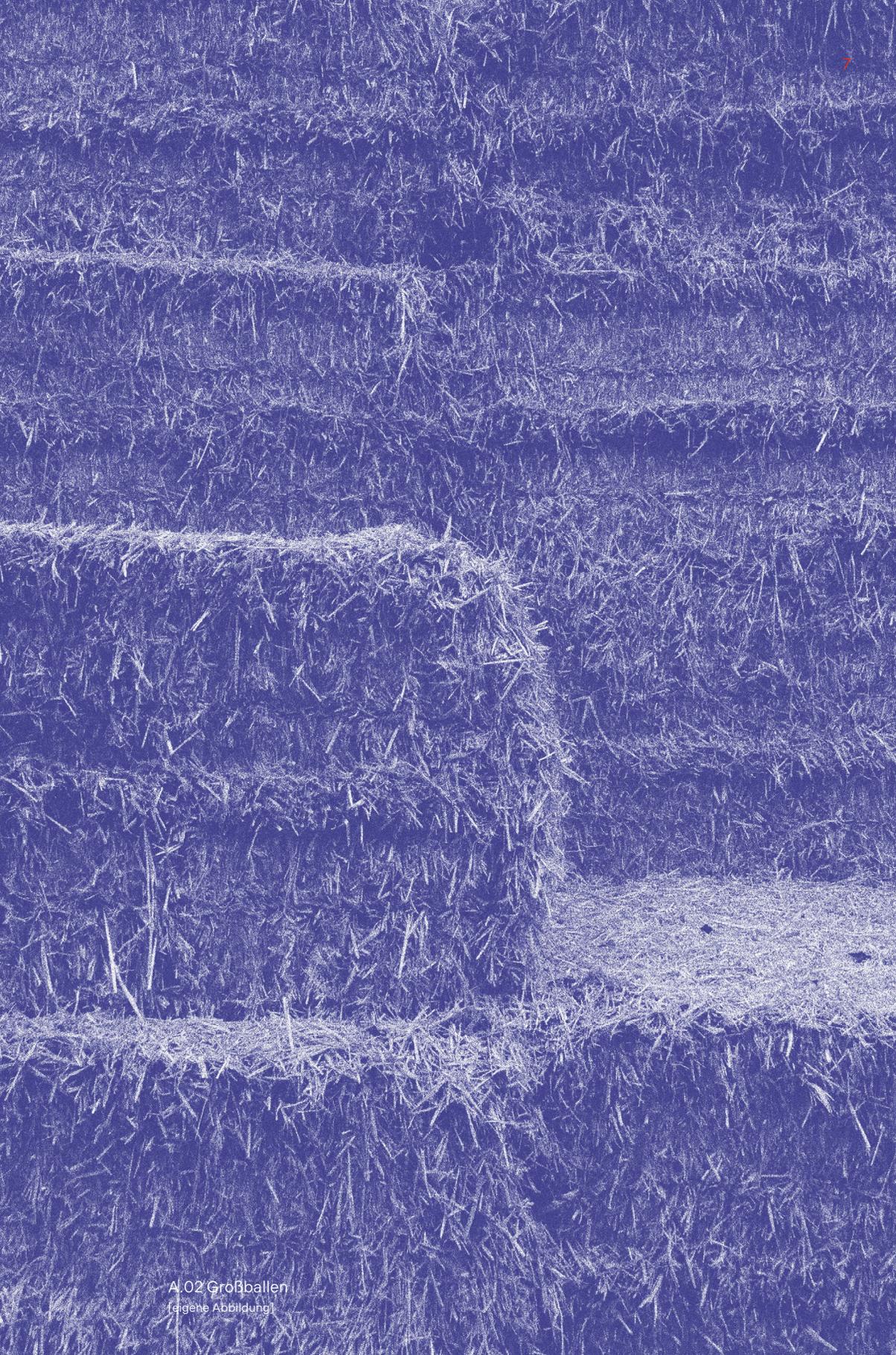
Die Zahl der so ausgeführten Bauten in Deutschland ist jedoch gering, da sowohl das Bauprodukt „Strohballen“ als auch die Bauweise „lasttragendes Bauen mit Stroh“ rechtlich nicht geregelt sind und einer Zustimmung im Einzelfall bedürfen, die einen hohen Zeit- und Arbeitsaufwand mit sich bringt. Außerdem müssen einige Besonderheiten beim Planen und Bauen mit Strohballen beachtet werden. Die Forschung dazu ist noch in den Anfängen und der Kreis an Fachleuten relativ klein. [Tauben,

Hoppe, Morgenthal 2021]

Die vorliegende Arbeit stellt den ersten Teil meiner Masterarbeit dar und soll einen theoretischen Einblick in den lasttragenden Strohballenbau mit Großballen geben. Er beinhaltet Informationen zum Baustoff Stroh, ebenso wie materialspezifische Entwurfsaspekte und Hinweise zur

Bauantragsstellung gemäß der aktuellen Rechtslage in Deutschland. Hinsichtlich der lasttragenden Bauweise in der Architektur gibt es nur wenig Literatur, daher fließen einige Informationen aus mündlichen Quellen ein, in Form von Gesprächen mit Fachleuten aus der Forschung, der Architektur, dem Handwerk der Landwirtschaft und Genehmigungsbehörden, die bereits an der Realisierung ähnlicher Gebäude mitgewirkt haben. Sie werden ergänzt durch eigene Erfahrungen und Erkenntnisse durch die Teilnahme an Workshops und Seminaren sowie der eigenen Planung eines Realisierungsobjekt in lasttragender Strohballenbauweise.

Der zweite Teil wird in einem separaten Buch vorgestellt und beinhaltet einen fiktiven Entwurf, der aus den Erkenntnissen des ersten Teils abgeleitet wird. Es handelt sich um einen öffentlichen Gebäudekomplex im ländlichen Kontext, der mit einer lasttragenden Strohballenbauweise auf aktuelle Fragestellungen der Entwicklung ruraler Räume eingeht.



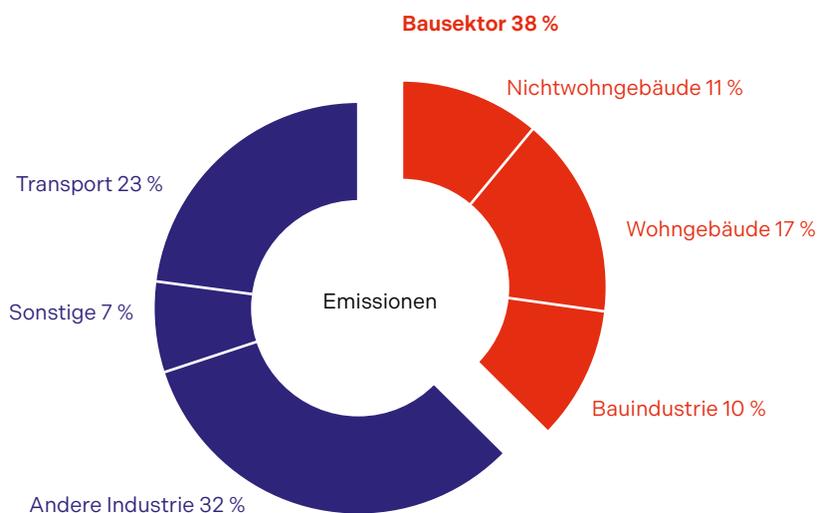
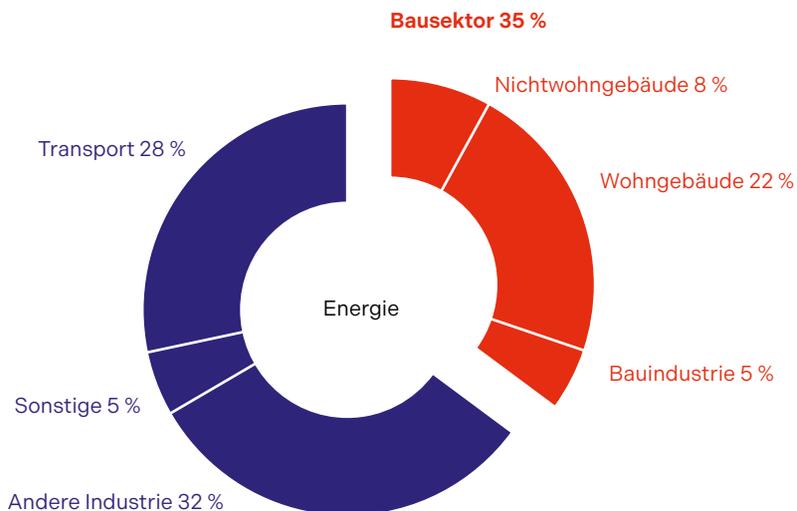
A.02 Großballen
(eigene Abbildung)

AKTUELLE SITUATION

Mit rund 37 % ist der Bausektor einer der Hauptverantwortlichen des weltweiten Energieverbrauchs und CO₂-Ausstoßes und somit ein wichtiger Hebel zur Bekämpfung des Klimawandels. Allein die Produktion und Verarbeitung von Baumaterialien machen schätzungsweise 9 % der globalen energiebezogenen CO₂-Emissionen aus. [UNEP 2022, 37, 72] Aufgrund der steigenden Weltbevölkerung wird mit einer Verdopplung des Bedarfs an Baumaterialien bis 2060 gerechnet, wobei dieser Anstieg vor allem endliche Ressourcen wie mineralische Stoffe und Metalle betrifft [OECD 2019, 1]. Umso wichtiger ist eine rasche Entwicklung von alternativen Baustoffen, die mit einer ressourcenschonenden Zukunft vereinbar sind.

Stroh stellt als Nebenprodukt der Landwirtschaft ein günstiges und regional verfügbares Baumaterial dar, das jährlich geerntet und leicht recycelt werden kann. Der Strohballenbau ist mit einem allgemein steigenden Umweltbewusstsein in den letzten Jahrzehnten immer beliebter geworden. Ausgehend von den USA verbreitet sich diese Bauweise Ende des 20. Jahrhunderts auch in vielen europäischen Ländern. [Minke und Krick 2023, 5, 10]

Obwohl seine Entwicklung in Deutschland durch die vergleichsweise strenge Gesetzeslage gehemmt wird, entstehen bis 2021 hierzulande mehr als 1000 Strohballenhäuser [Das Haus 2021]. Mit der Gründung des FASBA (Fachverband für Strohballenbau Deutschland eV) im Jahr 2002 erhält die Entwicklung dieser Bauweise eine Plattform auf nationaler Ebene. Dadurch entstehen in den folgenden zwei Jahrzehnten relevante Nachweise, Gutachten und Richtlinien, die das Bauen mit Stroh und seine Genehmigung erleichtern.



Der aktuelle Stand in Theorie und Praxis des Strohballenbaus ist bei der tragenden Bauweise weit weniger fortgeschritten als bei der nichttragenden Bauweise. Zwar erlangen beide Bautechniken mit einem wachsenden Umweltbewusstsein seit Ende der 1970 Jahre wieder mehr Bekanntheit, jedoch verbreitete sich die nichttragende Bauweise wesentlich schneller, da hier auf bewährte statische Systeme (meist aus Holz) zurückgegriffen werden konnte [Minke, Krick 2014]. Zur nichttragenden Bauweise erscheinen seit Ende des 20. Jahrhunderts Standardwerke, die zur internationalen Verbreitung dieser Bauweise beitragen [Taubе, Hoppe, Morgenthal 2021].

Die lasttragende Bauweise entsteht erstmals mit der Entwicklung von Strohballenpressen um 1900 in den USA in Nebraska. Auch sie wird während des 20. Jahrhunderts von industriellen Baustoffen verdrängt und ist nach wie vor kaum präsent in der zeitgenössischen Architektur. In der Schweiz ist sie aufgrund geringerer baurechtlicher Regulationen weiter fortgeschritten und hat bereits mehrgeschossige Gebäude in dieser Bauweise hervorgebracht [Taubе, Hoppe, Morgenthal 2021].

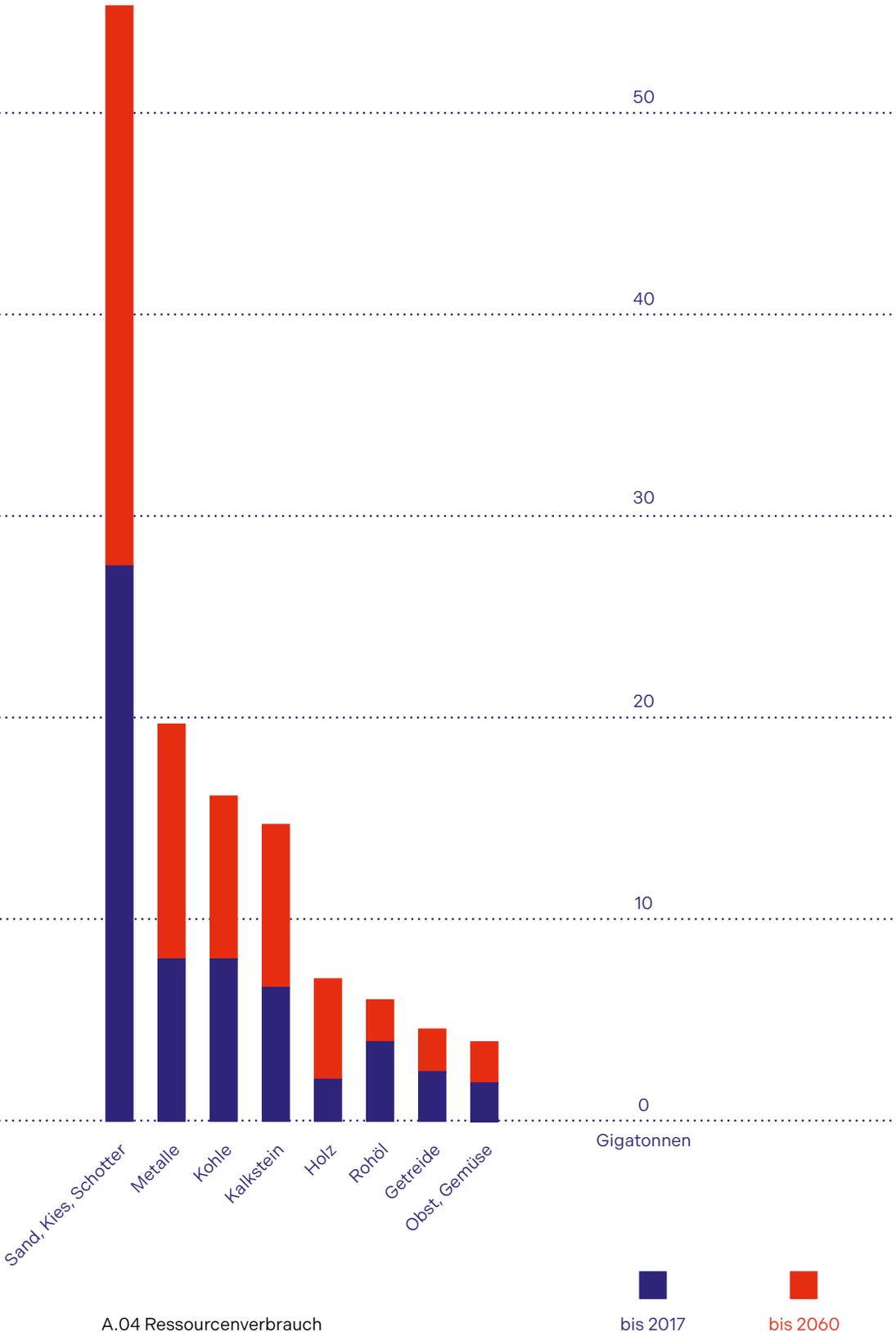
In Deutschland sind für die lasttragende Bauweise neben einer regulären Baugenehmigung momentan noch zusätzliche Einzelfallgenehmigungen notwendig, die einen erhöhten Kosten- und Zeitaufwand mit sich bringen. Zur lasttragenden Bauweise haben hierzulande Minke und Krick an der Universität Kassel beigetragen [Krick 2008] sowie Danielewicz und Reinschrift an der Hochschule Magdeburg-Stendal [FASBA 2019]. Aktuell stellen Taube et al. seit 2017 weitere Forschungsvorhaben an der Bauhaus-Universität in Weimar an, um zur Standardisierung der lasttragenden Bau-

weise beizutragen und langfristig die zur Zeit noch bestehenden fachplanerischen und baurechtlichen Hürden abzubauen.

[Taubе, Hoppe und Morgenthal 2021, 2, 12]

Im September 2022 finden erstmals die alljährlichen deutschlandweiten Strohballenbautage statt, die eine Informations-, Austausch- und Vernetzungsmöglichkeit im deutschsprachigen Raum bieten.

Die vorliegende Arbeit soll einen Einblick in das lasttragende Bauen mit Strohballen in Deutschland verschaffen. Einleitend werden zunächst die unterschiedlichen Bauweisen voneinander abgegrenzt und Vor- und Nachteile des Strohballenbaus aufgezeigt. Der Hauptteil beschreibt die historische Entwicklung und die Herstellung von Baustrohballen und geht anschließend auf die bauphysikalischen, statischen und konstruktiven Besonderheiten dieser Bauweise ein. Er schließt ab mit Hinweisen zur Genehmigungsplanung und Antragstellung, speziell hinsichtlich der Zustimmung im Einzelfall und vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung. Im darauffolgenden Fazit werden die wichtigsten Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst und ein möglicher Ausblick auf die Zukunft des Strohballenbaus gegeben.



A.04 Ressourcenverbrauch
[OECD 2022, 72]

 bis 2017  bis 2060

ABGRENZUNG DER BAUWEISEN

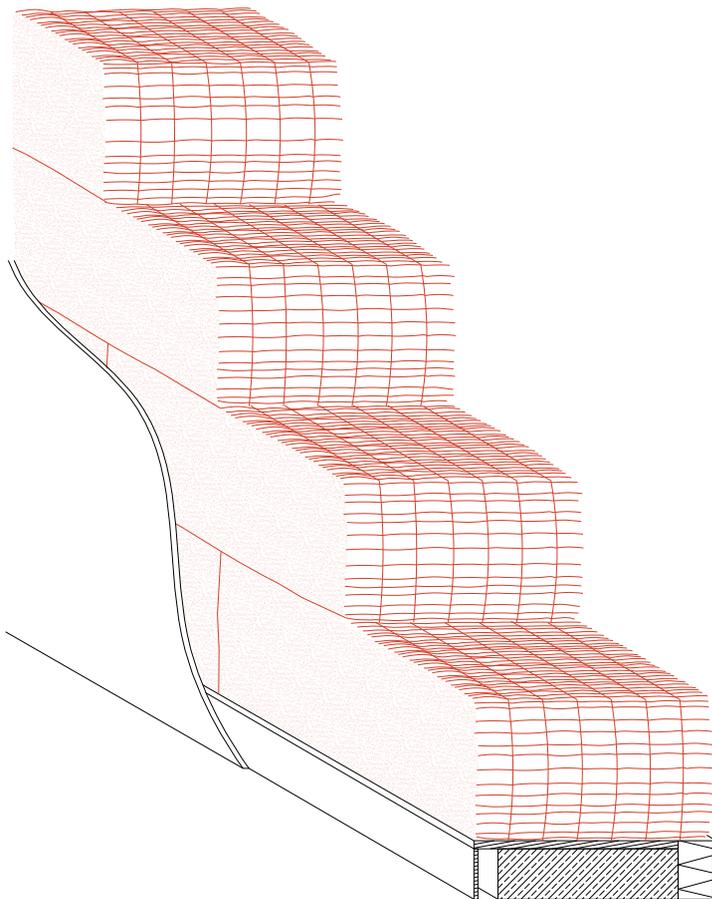
Strohballen können grundsätzlich nicht-tragend oder tragend verbaut werden. Bei den nichttragenden Bauweisen übernehmen die Strohballen keinerlei statische, sondern lediglich dämmende Funktionen. Ein zusätzliches Tragsystem, meist aus Holz, trägt vertikale und horizontale Lasten ab. Die Strohballen können je nach gewähltem Wandaufbau vor, zwischen oder hinter der tragenden Konstruktion liegen.

[Minke und Krick 2023, 39, 40] Abhängig von ihrer Ausrichtung – hochkant liegend, flach liegend oder stehend – erzielen sie unterschiedliche Eigenschaften hinsichtlich ihrer Wärmeleitfähigkeit und Putzhaftung. Die ETA für Baustroh regelt die Rahmenbedingungen für dieses Bauprodukt, sodass neben der regulären Baugenehmigung keine weitere Sondergenehmigung erforderlich ist. [Minke und Krick 2023, 53]

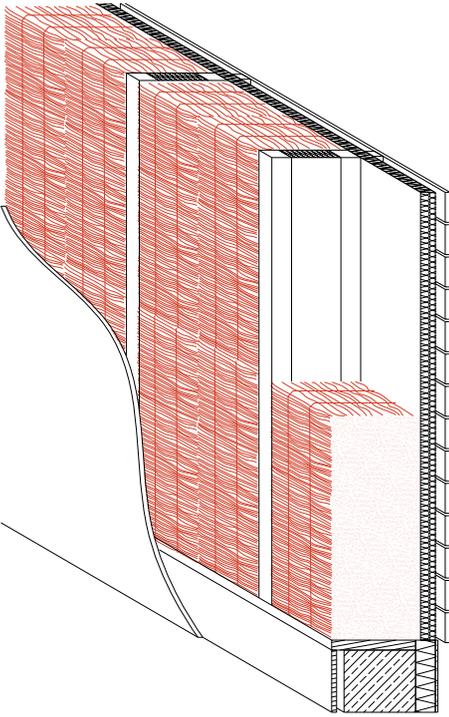
Die lasttragende Bauweise hingegen ist in Deutschland noch unregelt und erfordert ein aufwendigeres Genehmigungsverfahren. In diesem Fall vereinen die Strohballen sowohl dämmende als auch tragende Funktionen in sich, wodurch ein homogener Wandaufbau entsteht und jede weitere Tragkonstruktion redundant wird. [FASBA 2019, 21] In der Regel werden für diese Bauweise dichter gepresste Großballen verwendet, die im Verbund mithilfe eines Krans flach liegend aufeinander gestapelt und durch einen Ringbalken abgeschlossen werden. Beidseitig verputzt kann dieser Aufbau eine Feuerwiderstandsklasse von F90-B erreichen [Kade 2022, 3] und mehrere Geschosse tragen [Schmidt 2022, 33 f.].

Eine Unterkategorie der lasttragenden Bauweise stellt die Hybridbauweise dar, bei der neben den druckbelasteten Strohballen noch weitere lasttragende Bau-

teile eingesetzt werden. Beispielsweise kann eine tragende Wand aus schmal dimensionierten Holzständern bestehen, die durch teillasttragende Strohballen stabilisiert werden. Von Hybridbauweisen ist auch dann die Rede, wenn zwar ein homogener lasttragender Wandaufbau aus Strohballen existiert, aber auch andere Bauteile wie Stützen oder Innenwände Lasten abtragen. So sind beispielsweise bei längeren Wandöffnungen Zwischenstützen erforderlich, die einen Teil des Sturzes und somit der Lasten übernehmen. Bei Hybridbauweisen ist das unterschiedliche Setzungsverhalten der tragenden Materialien in der Planung besonders zu beachten, um spätere Bauschäden zu vermeiden. [Minke und Krick 2023, 37]

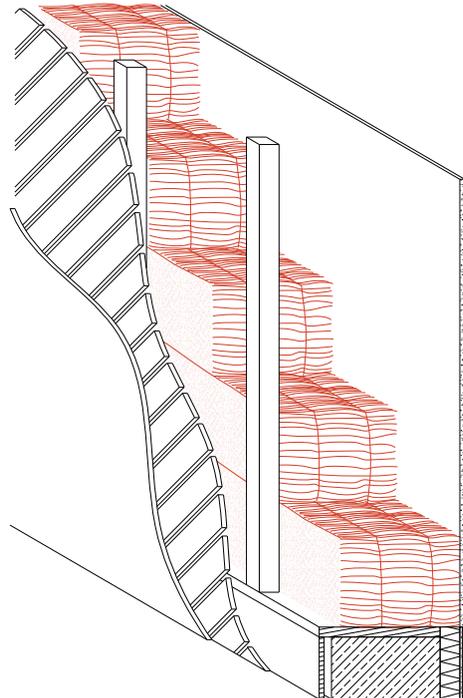


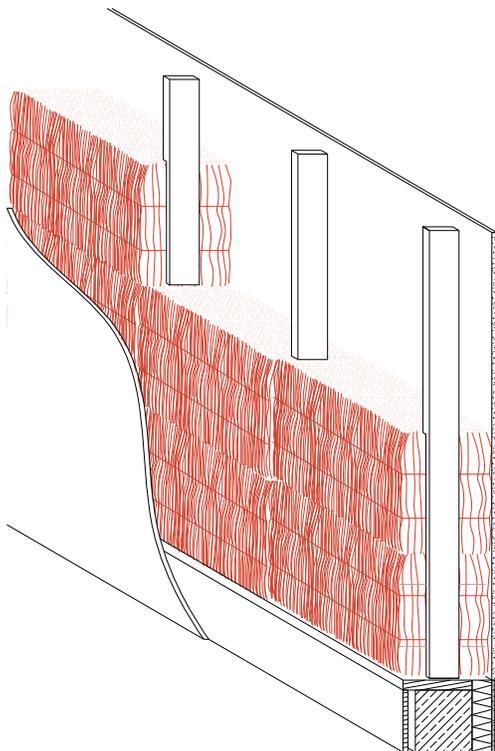
A.05 Lasttragende Bauweise mit Großballen
[eigene Abbildung]



Holzständersystem
Nichttragende Kleinballen

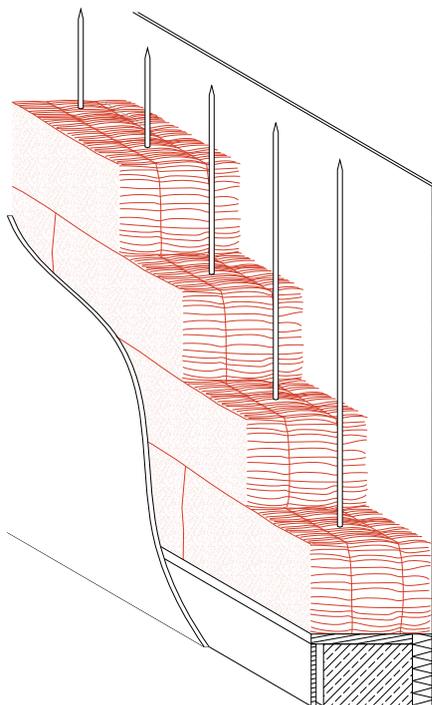
Vorgesetzte Außendämmung
Nichttragende Kleinballen





Hybridbauweise
Teillasttragende Kleinballen

Nebraska-Stil
Lasttragende Kleinballen



VOR- UND NACHTEILE

Vorteile Stroh ist ein natürlicher Rohstoff, der alljährlich nachwächst und in vielen Regionen der Welt lokal verfügbar ist (siehe S. 36 f.). Sein ökologischer Fußabdruck ist denkbar gering: während der Wachstumsphase bindet das Getreide CO₂, die Herstellung von Strohballen erfolgt energiearm und während der Gebäudenutzungsdauer sorgt Stroh mit seinen guten Dämmeigenschaften für einen geringen Heizbedarf. Es kann im Recyclingprozess vollständig ökologisch abgebaut und beispielsweise als Düngemittel dem Kreislauf wieder zugeführt werden. [Minke und

Krick 2023, 6]

Als Nebenprodukt des Getreideanbaus erfordern Baustrohballen in ihrer Herstellung kaum bis keinen zusätzlichen Aufwand, da die Produktionsketten in der Agrarwirtschaft bereits vorhanden sind. Für die Landwirtschaft eröffnet sich außerdem ein neuer Absatzmarkt in der Baubranche, der Arbeitsplätze in ländlichen Regionen bietet und kleinere Agrarbetriebe und -gemeinschaften fördern kann. [Gruber, Gruber und Santler 2012, 39]

Stroh zeichnet sich durch einen sehr geringen Primärenergiegehalt aus. Krick definiert den Primärenergiegehalt nach Kohler/Klinge als „die Menge an nicht erneuerbarer Energie, die benötigt wird, um ein (Bau-) Produkt herzustellen“, wobei der Transport zur Baustelle und der Einbau der Baustoffe nicht inkludiert sind. Der Primärenergiegehalt von Strohballen liegt mit 50 bzw. 63 kWh/Mg deutlich unter dem anderer Baumaterialien. [Krick

2008, 44, 47]

Aufgrund der Einfachheit des Strohballenbaus können auch Laien, die normalerweise vom Bauprozess ausgeschlossen

sind, an vielen Arbeitsschritten beteiligt werden. Bei der Selbstbauweise spielen der soziale Faktor des gemeinschaftlichen Errichtens und das Identifikationspotential mit dem Gebäude eine große Rolle. Mit guter Vorbereitung können hierbei außerdem Kosten gespart werden. [Gruber, Gruber und Santler 2012, 39, 40]

Strohballengebäude sind solide und, wie einige Beispiele zeigen, lange haltbar. In Nebraska werden Strohballenhäuser bewohnt, die schon vor rund 100 Jahren errichtet wurden [Corum 2005, XXIV]. Durch sein hohes Elastizitätsmodul erzielt Stroh außerdem eine hohe Erdbebensicherheit: wie seismische Simulationen an der University of Nevada in Reno zeigen, können Strohballenhäuser Erdbeben der Stärke 6,7 ohne Einsturzgefahr überstehen [Center for Civil Engineering Earthquake Research 2010].

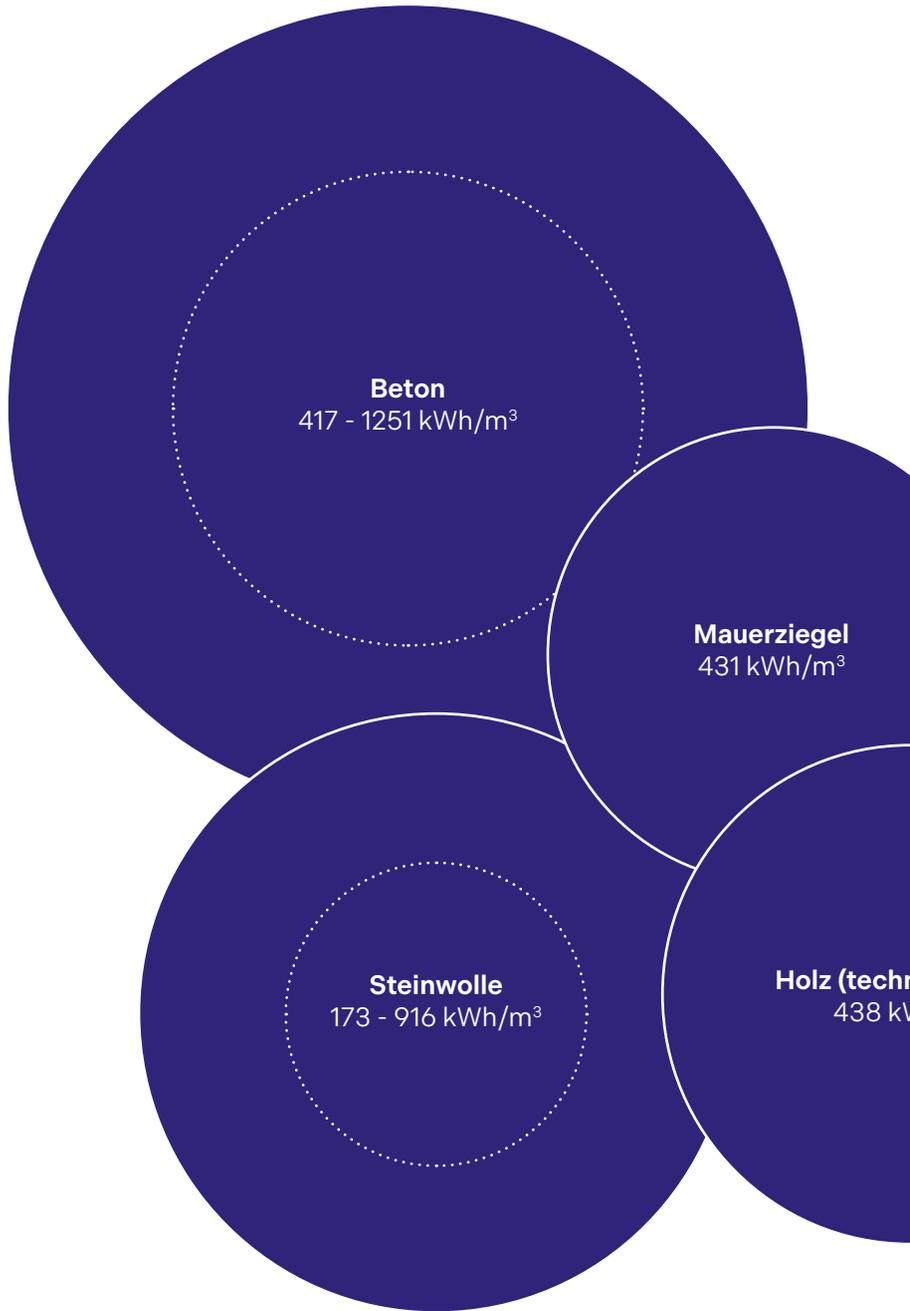
Nachteile Die lasttragende Strohballenbauweise ist jedoch nicht in jedem Kontext geeignet: das Bauen mit Großballen erfordert hohe Wandstärken von bis zu 125 cm, verbraucht somit wertvolle Fläche und ist für viele innerstädtische Bauvorhaben undenkbar. Auch die statischen und konstruktiven Möglichkeiten sind im Vergleich mit anderen Baustoffen begrenzt, wenngleich bereits mehrgeschossige und anspruchsvolle Projekte in der Schweiz realisiert wurden [Bocco Guarneri 2013].

Ein wichtiges Kriterium im gesamten Bauprozess ist der Witterungsschutz: beginnend beim Dreschen und Pressen der Ballen über den Transport bis hin zum Einbau auf der Baustelle muss das Stroh vor Feuchtigkeit geschützt werden [Minke und Krick 2023, 76]. Ernte- und Baustellenabläufe müssen flexibel sein und sich an möglicherweise schlechte Witterungsbedingungen anpassen, was zu Verzögerungen und Mehrkosten führen kann.

Nicht nur auf gesetzlicher, sondern auch auf fachlicher Ebene gehört der lasttragende Strohballenbau noch zu den weniger etablierten Bauweisen in Deutschland. Der Kreis an erfahrenen Fachplaner:innen und Handwerker:innen ist noch klein, was die Fehleranfälligkeit in der Planungs- und Bauphase erhöht. Die geringen Rohmaterialkosten für Stroh werden durch Mehrkosten in Planung und Ausführung wieder ausgeglichen.

Die meisten Nachteile der lasttragenden Strohballenbauweise sind auf seine (noch) geringe Bekanntheit und Verbreitung in Deutschland zurückzuführen. Mit einer Etablierung dieser Bauweise könnten diese Nachteile möglicherweise behoben werden. Mehrkosten führen kann. Nicht

nur auf gesetzlicher, sondern auch auf fachlicher Ebene gehört der lasttragende Strohballenbau noch zu den weniger etablierten Bauweisen in Deutschland. Der Kreis an erfahrenen Fachplaner:innen und Handwerker:innen ist noch klein, was die Fehleranfälligkeit in der Planungs- und Bauphase erhöht. Die geringen Rohmaterialkosten für Stroh werden häufig durch Mehrkosten in Planung und Ausführung wieder ausgeglichen.

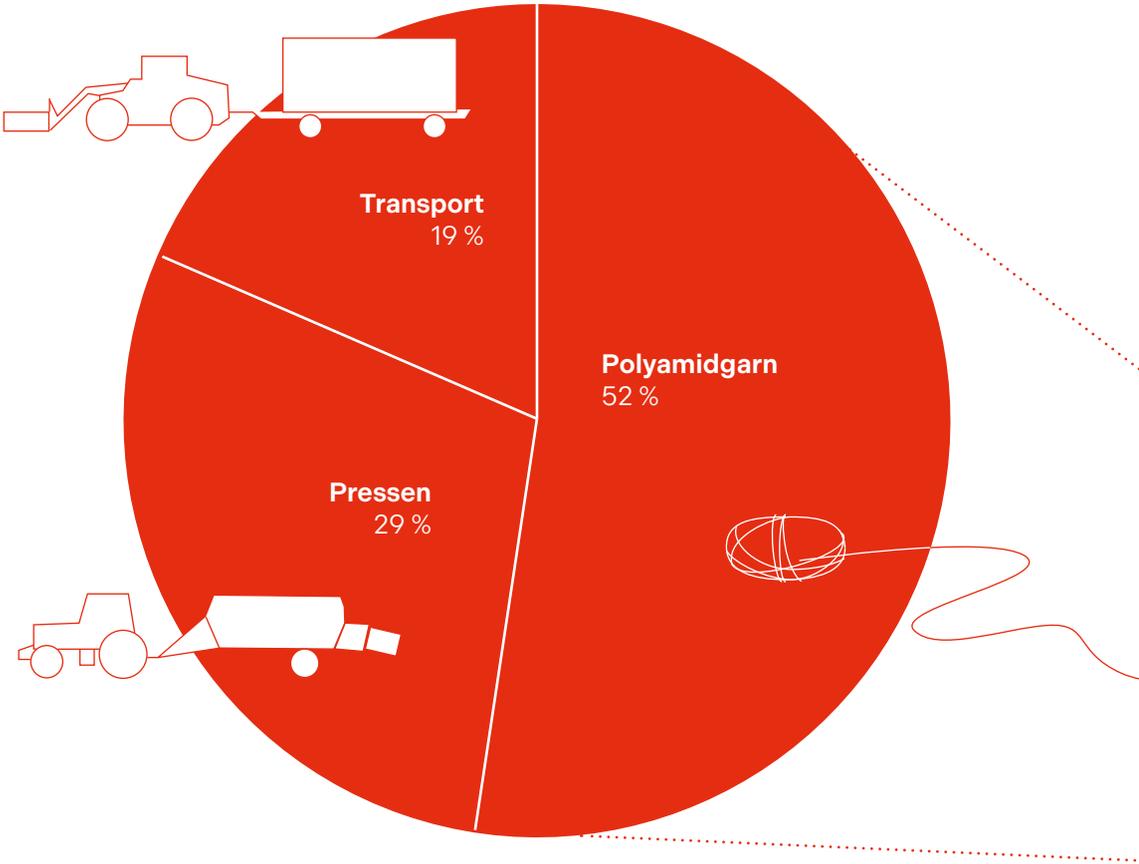


Polysterol (XPS)
1102 - 1133 kWh/m²

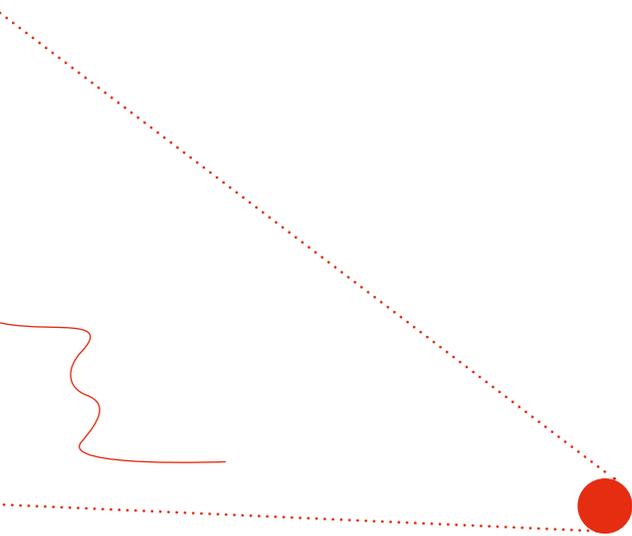
nisch getr.)
Wh/m³



Strohballen
3,3 - 3,9 kWh/m³



A.08 Anteile der Prozesselemente am Primärenergiegehalt von Großballen
[verändert nach Krick 2009, 47]



Strohballen
3,3 - 3,9 kWh/m³

2

Historische Entwicklung

Baustoff Stroh

Herstellung von Baustrohballen

Grundlagen

HISTORISCHE ENTWICKLUNG

Vor rund 12.000 Jahren beginnt die Sesshaftigkeit des Menschen und damit auch die Bewirtung von Land. Durch die Getreideernte fällt seither Stroh als Nebenprodukt an. Forschende gehen davon aus, dass Stroh von Beginn an für die Errichtung von Behausungen genutzt wird, vor allem zur Dachdeckung oder in Kombination mit Lehm. [Souza 2022] Ab dem 13. Jahrhundert treten in städtischen Gebieten vermehrt Großbrände auf, weshalb Brandschutzbestimmungen eingeführt und Strohdächer weitestgehend verboten werden [Krick 2008, 19].

Mit dem Aufkommen von dampfbetriebenen Strohballenpressen um 1880 in den USA ist es erstmalig auf effiziente Weise möglich, loses Stroh in eine haltbare Form zu pressen. Im Staat Nebraska, der durch spärlichen Baumbestand geprägt ist, wird dank des umfangreichen Ackerbaus daher ein alternativer Baustoff für das mangelnde Bauholz gefunden: Ende des 19. Jahrhunderts entstehen dort die ersten dokumentierten lasttragenden Strohballenhäuser und verleihen dieser Bauweise später den Beinamen „Nebraska-Stil“. Obwohl sie zunächst nur als provisorische Unterkünfte für Landarbeiter:innen gedacht sind, stellen sie sich mit der Zeit als beständige Bauweise heraus. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts entstehen nach Welsch ca. 70 Bauten. [Minke und Krick 2023, 8]

Wie viele andere vernakuläre Bauweisen wird auch der Strohballenbau im Laufe des 20. Jahrhunderts mit der weltweiten Verbreitung industriell hergestellter Baumaterialien verdrängt. Erst ab den 70er Jahren erlebt das Bauen mit Stroh ausgehend von den USA aufgrund mehrerer Projekte und Veröffentlichungen eine Renaissance, die ab den 90er Jahren

auch auf europäische Länder übergreift. Vor allem der nichttragende Strohballenbau verbreitet sich schneller als die lasttragende Bauweise, wenngleich beide bis heute nur Nischen im Bauwesen besetzen.

[Gruber, Gruber und Santler 2012, 11 ff.]

In Deutschland entsteht das erste nichttragende Strohballenhaus 1999, im Jahr 2005 folgt das erste lasttragende Gebäude. Nur vereinzelt entstehen in den Folgejahren weitere Beispiele dieser Bauweise. In anderen Ländern Europas wie der Schweiz gelten freiere Genehmigungsbedingungen. Dort werden unter der Leitung von Werner Schmidt seit 2002 mehrere lasttragende Bauten, darunter auch ein dreigeschossiges Gebäude bei Graun realisiert [Atelier Schmidt].

Der im Jahr 2002 gegründete FASBA treibt die Entwicklung des Strohbaus in Deutschland voran. Das Erwirken einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung sowie der Europäischen Technischen Bewertung ETA [DIBt 2017] erleichtert fortan die Verwendung von Strohballen als nichttragende Wärmedämmung. Darüber hinaus verfasst der FASBA 2014 eine Strohballenbaurichtlinie, die sich ebenfalls hauptsächlich auf Stroh als nichttragendes Bauprodukt bezieht [FASBA 2019]. Ein Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis AbZ legt außerdem die Feuerwiderstandsklasse von verputzten Wandkonstruktionen mit Strohballendämmung auf F30 bzw. F90-B fest [Materialprüfanstalt Braunschweig 2014] und dient als Grundlage für Brandschutznachweise.



A.09 Scheune von Lottie Morris, Nebraska
[k. A./Welsch um 1907, bearbeitet]







A.10 Erste Strohballenpressen (vorige Seite)
[Rhodes um 1910, bearbeitet]



A.11 Strohdach
[Dewell um 1942, bearbeitet]





A.12 Garage aus Stroh in Nebraska
[k. A./Welsch um 1920, bearbeitet]







A.13 Das Loan Oak Gebäude in Nebraska (vorige Seite)
[k.A./Welsch um 1946, bearbeitet]



A.14 Farm McCreath in Nebraska
[Condra & Manners 1926, bearbeitet]

BAUSTOFF STROH

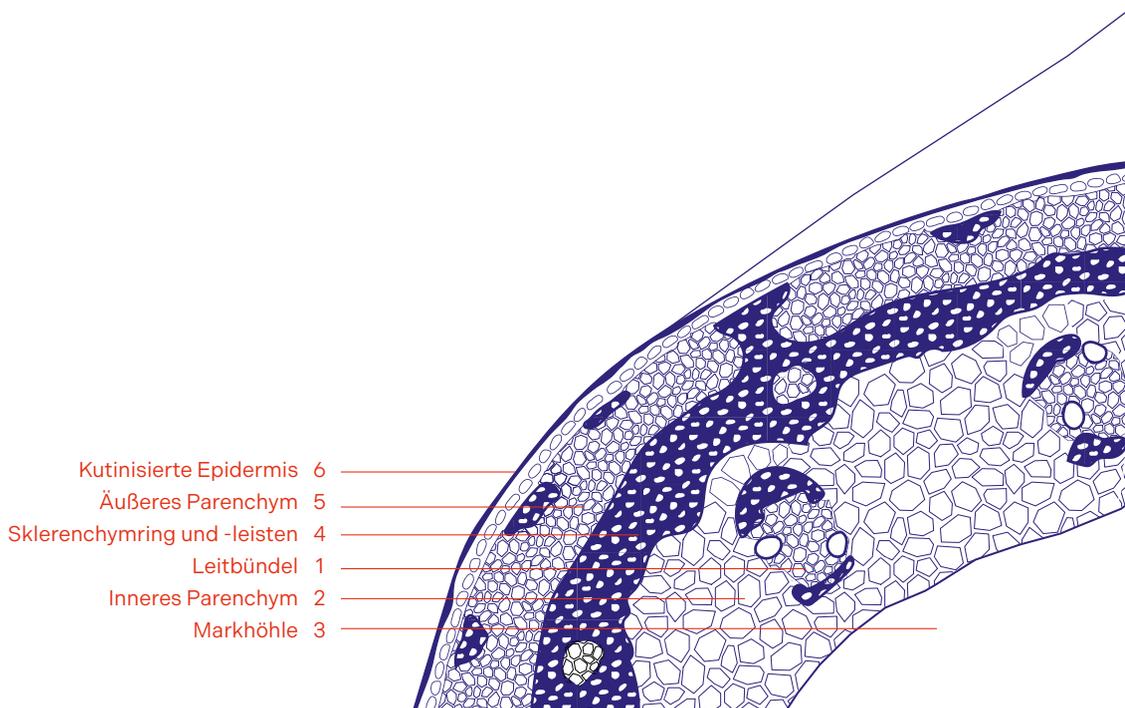
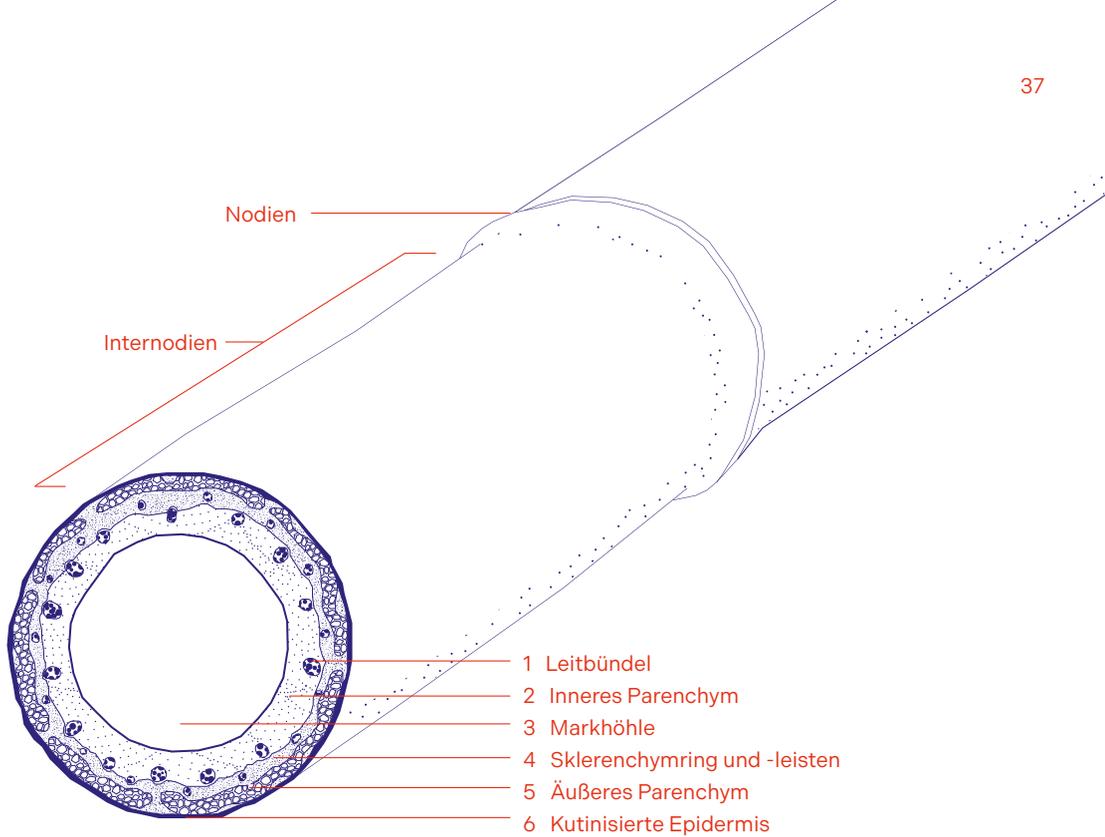
Der Begriff „Stroh“ stammt vom mittelhochdeutschen „stro“ (streuen, ausbreiten) und bezeichnet die trockenen Halme von Getreide und Faserpflanzen ohne Wurzeln und Ähren. Stroh kann biologisch und in Fruchtwechselwirtschaft angebaut werden, die eine Auslaugung des Bodens verhindert [Gruber, Gruber und Santler 2012, 39]. Es gibt sieben verschiedene Getreidearten, die in unterschiedlichen Regionen der Welt angebaut werden: in gemäßigten Klimazonen finden sich vor allem Weizen, Roggen, Gerste und Hafer, während in wärmeren Regionen vorwiegend Reis, Mais und Hirse angebaut werden. [GOW 2023]

Alle Getreidesorten teilen denselben Aufbau: der Halm besteht aus rohrförmigen Internodien (Halmabschnitten), die von Nodien (Knoten) getrennt werden. Das Innere des Halmes ist hohl. Die Halmwand besteht aus Zellulose, eingebettete Leitbündel zur Versorgung der Pflanze und Lignin als Traggerüst. Außen ist der Halm von einer dünnen, hydrophoben Schicht überzogen, welche die Pflanze vor Witterung und Austrocknung schützt. Dies und der hohe Silikatgehalt von Stroh hemmen den Verrottungsprozess. [Krick 2008, 19 f.]

Seine guten Dämmeigenschaften liegen in den zahlreichen Luftporen und der Markhöhle im Inneren des Halmes begründet. Es wird davon ausgegangen, dass eine erhöhte „Holzigkeit“ einer Getreidesorte, also ein erhöhter Lignin-gehalt, positive Auswirkungen auf die Festigkeit von Bauballen hat. Gersten- und Haferstroh sind weniger stabil und im Gegensatz zu Weizen und Roggen nicht als Baustroh geeignet [Minke und Krick 2023, 14]. In wärmeren Regionen kommt auch Reisstroh lose oder in Form von Ballen als Baustoff infrage [Ashour 2015].

Als Nebenprodukt der Landwirtschaft wird Stroh hauptsächlich als Düngemittel und Einstreu für Tiere sowie als Brennmaterial und Rohstoff für Biomasseenergie verwendet. Abzüglich der landwirtschaftlichen Weiterverwertung fallen in Deutschland jedes Jahr 5-13 Mio. Tonnen überschüssiges Stroh an [DBFZ 2019, 3]. Nach Schätzungen von Minke und Krick [2023, 7] können mit dem zusätzlich anfallenden Stroh rund 700.000 Einfamilienhäuser pro Jahr gedämmt werden. Diese Mengeneinschätzung bezieht sich auf Kleinballen und nicht auf lasttragende Großballen - sie verdeutlicht aber eindrücklich das Potenzial dieses Baustoffs noch nicht ausgeschöpft ist.

Der optimale Baustrohballen wird gleichmäßig dicht gepresst, weist eine goldgelbe Farbe, straffe Bindungen und eine relativ scharfkantige Quaderform auf. Es sind keine Beikräuter enthalten und der Geruch ist neutral. Die Halme sind möglichst lang und intakt und liegen überwiegend senkrecht zur Bindung. Schwarze oder gräuliche Verfärbungen und modriger Geruch deuten auf Schimmelpilzbefall hin und disqualifizieren den Ballen als Baustrohballen. [DIBt 2017] Ihre Qualität hängt maßgeblich vom Herstellungsprozess ab, weshalb beim Ernten, Pressen, Transportieren und Lagern einige Aspekte beachtet werden müssen.



A.15 Aufbau eines Strohhalmes

[verändert nach Aufhammer und Fischbeck 1973, 23]

— geeignet zum Strohballenbau

— nicht geeignet zum Strohballenbau

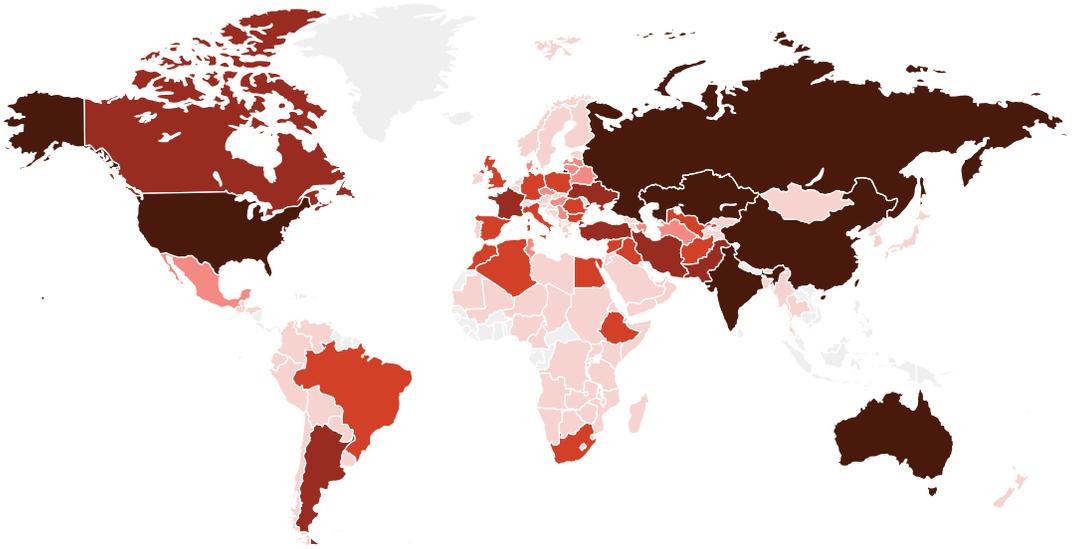




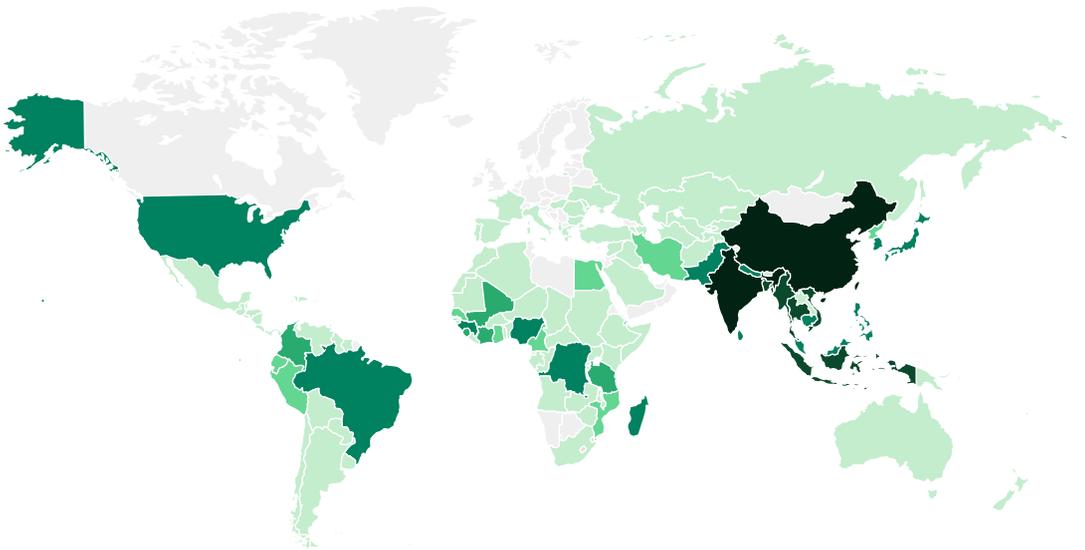
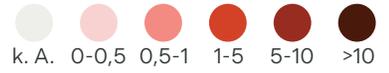
Weizen

Dinkel

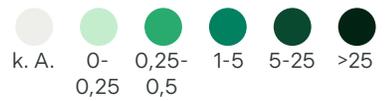
Mais



A.17 Weizenanbau weltweit 2021 (in Mio. ha)
[verändert nach Proplanta]



A.18 Reisanbau weltweit 2021 (in Mio. ha)
[verändert nach Proplanta]





A.19 Strohpotenzial in Deutschland (in t Frischmasse/km²)
[verändert nach Brosowski 2013]

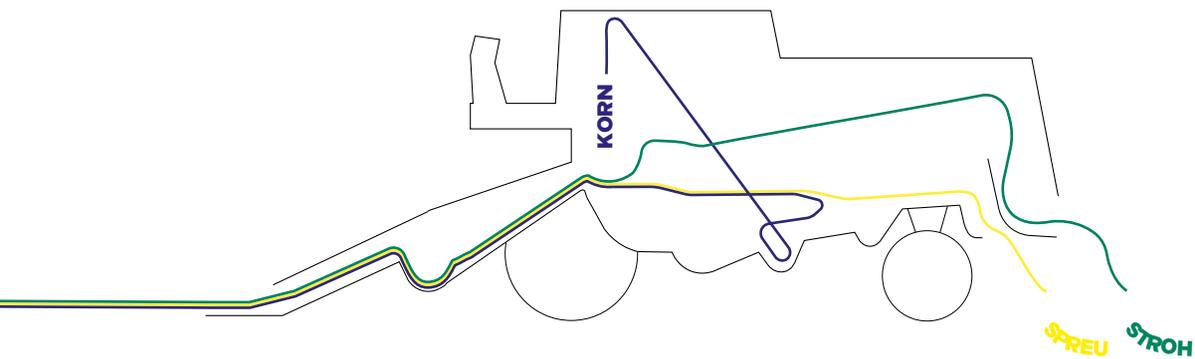
HERSTELLUNG VON BAUSTROHBALLEN

In den Sommermonaten von Juni bis August sind die meisten Getreidesorten erntereif. Ungefähr zwei Tage vor und nach sowie während der Ernte sollte es nicht regnen, da der massebezogene Feuchtegehalt im Stroh nicht mehr als 15 % betragen sollte, um Schimmel zu vermeiden [FASBA 2019]. In Jahren mit höherem Niederschlagswerten kann das Getreide noch vor der Ernte grau, anfälliger für Pilzbefall und somit ungeeignet zum Bauen werden. Auch Taufeuchte am Tag der Ernte sollte vermieden werden, daher beginnt die Ernte in der Regel um die Mittagszeit.

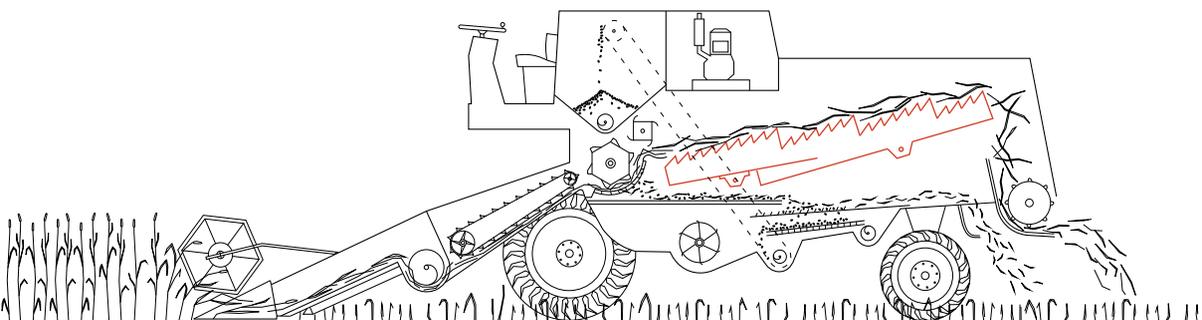
Mit einem Mähdrescher wird die Getreidepflanze kurz über dem Boden abgemäht und anschließend gedroschen. Hierbei wird das Hauptprodukt – das Korn – von der Spreu und dem Stroh getrennt. Dieser Vorgang kann entweder durch ein Tangential- oder ein Axialdreschwerk erfolgen, welche unterschiedliche Auswirkungen auf die Halmstruktur und -länge haben. Beim Tangentialdreschwerk wird das Getreide zunächst an der Dreschtrommel vorbeigeführt, die mit mehreren Schlagleisten das Korn aus den Ähren schlägt. Dann wird es auf einem Hordenschüttler gerüttelt, um auch übrig gebliebenes Restkorn vom Stroh zu lösen und im Kornkammer zu sammeln. Das Stroh wird schließlich rückseitig des Dreschers abgelassen und bildet längliche Haufen auf dem Feld (Schwaden). [Minke und Krick 2023, 16]

Axialdreschwerke hingegen führen das Stroh nicht nur an der Dreschtrommel vorbei, sondern mehrmals um sie herum, um das Korn wirksamer zu entnehmen. Bei der Rotation wird die Halmstruktur allerdings stark geschädigt, was sich negativ auf die Ballenfestigkeit auswirkt. Einige Mähdrescher enthalten optional

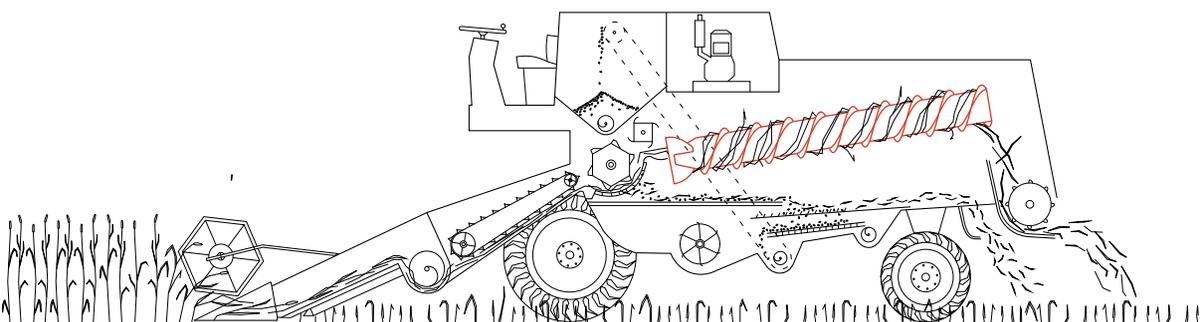
nachgeschaltete Strohhäcksler, die das Halmgut vor dem Ablassen zusätzlich klein schneiden. Da für Baustrohballen nur lange und intakte Halme infrage kommen, sollte die Strohernte nur mit Tangentialmähdreschern und ohne nachgeschalteten Strohhäcksler erfolgen. [Minke und Krick 2023, 16]



Funktionsprinzip eines Mähdreschers



Tangentialmähdrescher



Axialmähdrescher

A.20 Funktionsprinzip und Arten von Mähdreschern

[Estler; eigene Abbildungen]

Nach dem Drusch muss das Stroh je nach Feuchtegehalt ein bis zwei Tage nach-trocknen, bevor es zu Klein-, Quader- oder Rundballen gepresst werden kann. Rundballen werden zwar nicht zum Bauen verwendet, können aber aufgetrennt und umgepresst werden. Diese Vorgehensweise ist jedoch nicht optimal, da mit jedem Verarbeitungsschritt die Halmstruktur stärker geschädigt wird. Die Breite und Höhe von Klein- und Quaderballen werden vom Kanal der Presse vorgegeben, die Länge der Ballen kann beliebig variieren.

[Hansen, Warmuth und Warmuth 2014, 7] Es sollten 5-10 % Reserveballen vorgesehen werden, um mangelhafte Exemplare jederzeit austauschen zu können.

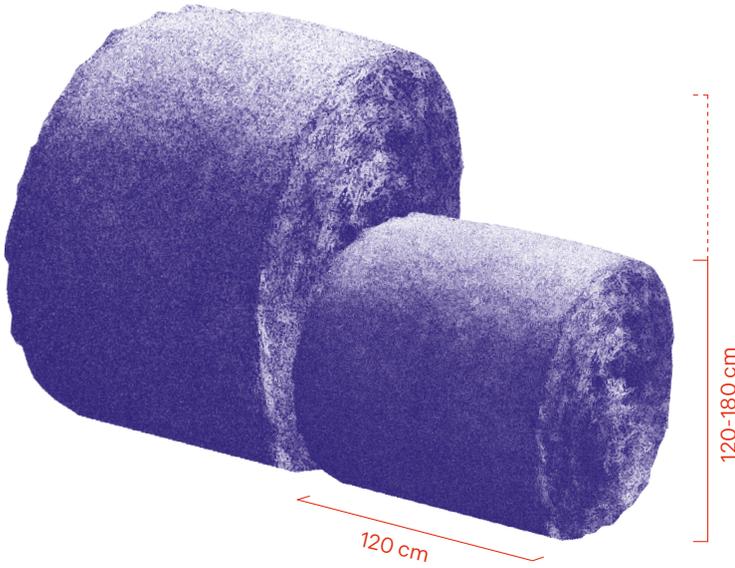
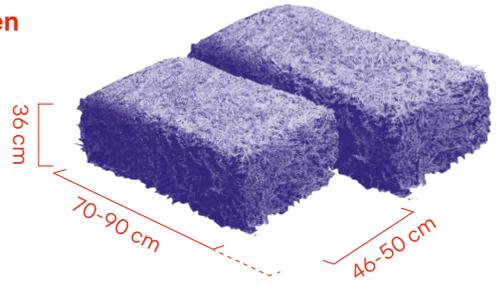
Kleinballen haben in der Regel Abmessungen von 36 x 49 x 90 cm (Höhe x Breite x Länge) und eine zweifache Bindung. Mit einer Dichte von rund 100 kg/m³ weisen sie zwar sehr gute Dämmeigenschaften, aber eine geringere Festigkeit und Maßhaltigkeit als Großballen auf. Deshalb werden sie vor allem bei der nichttragenden Bauweise als Dämmung eingesetzt. Durch ihr handliches Format sind sie außerdem prädestiniert für Selbstbauprojekte. [Minke und Krick 2023, 15]

Übliche Abmessungen für Groß- oder Quaderballen sind 70/90 x 120 x 240 cm (Höhe x Breite x Länge). Sie werden vier- bis sechsfach gebunden und wesentlich dichter als Kleinballen gepresst. Dadurch wird ihre Dämmeigenschaft zwar gemindert, die Tragfähigkeit aber erhöht, weshalb sie vorwiegend für die lasttragende Bauweise eingesetzt werden. Ein ausgeglichenes Verhältnis beider Eigenschaften wird mit einer Dichte von rund 150 kg/m³ erreicht.

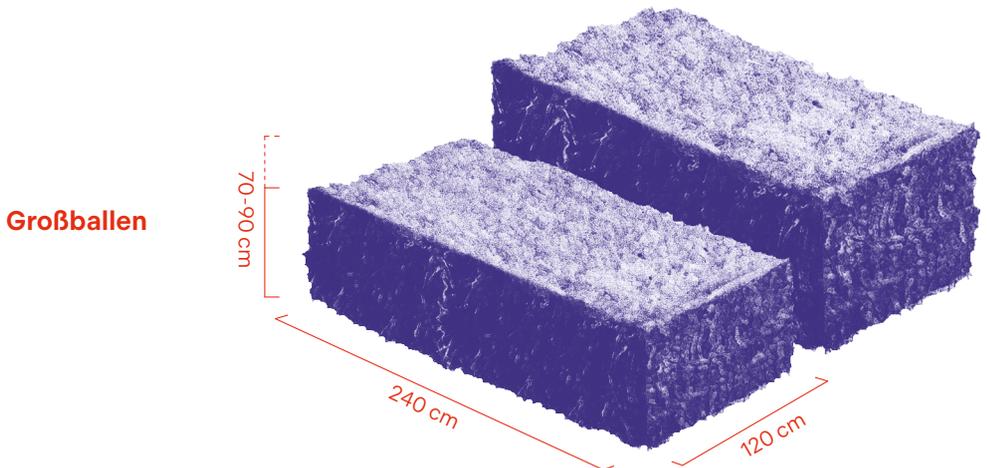
Strohballen sind im Verhältnis zu anderen Baustoffen ein sehr ungenaues Bauprodukt. Durch den Presskanal sind die Breite und Höhe der Ballen meist relativ regelmäßig, ihre Länge hängt jedoch stark von weiteren Faktoren ab. Vor allem die Größe der Schwaden und die Geschwindigkeit, mit der die Ballenpresse fährt, sollten sehr gleichmäßig sein, um möglichst geringe Längenabweichungen der Strohballen zu erzielen. [Gruber, Gruber und Santler 2012, 9] Im besten Fall sollten die Ballen direkt nach dem Pressen auf dem Feld vermessen, dokumentiert und mit kleinen Etiketten gelabelt werden. Die Markierung von Unter- und Überlängen mit einem farblichen Spray oder ähnlichem erleichtern die Zuordnung auf der Baustelle und beschleunigen den Aufbau.

Bis die Ballen eingebaut und verputzt sind müssen sie jederzeit vor Niederschlag und Feuchtigkeit geschützt werden. Beim Transport zur und kurzzeitigen Lagern auf der Baustelle sollten Planen bereitgestellt werden für etwaige Wetterumschwünge. Aus zeitorganisatorischen Gründen kann es sinnvoll sein, die Ballen nicht direkt nach der Herstellung zu verbauen, sondern über Winter zu lagern und erst im Folgejahr ab April einzubauen. Bei der Überwinterung sollte das Stroh trocken und möglichst luftumspült lagern. Direkter Kontakt zu Metallteilen sollte aufgrund von Kondenswasser vermieden werden.

Kleinballen



Rundballen



Großballen

3

Wärmeschutz

Feuchteschutz

Schallschutz

Brandschutz

Bauphysik

WÄRMESCHUTZ

Während der Nutzungsphase eines Gebäudes spielt die Wärmeschutzfähigkeit der Bauteile eine große Rolle. Die Wärmedämmung und Wärmespeicherung sollten dabei in einem dem regionalen Klima angemessenen Gleichgewicht stehen. Weniger dichte Materialien haben in der Regel bessere Dämmeigenschaften, da sie Wärme schlechter leiten, somit aber auch schlechter speichern können. Umgekehrt gilt, dass dichtere Materialien bessere Wärmeleit- und Speicherfähigkeiten, aber schlechtere Dämmwerte aufweisen. Zu beachten ist, dass organische Stoffe bei gleicher Dichte rund doppelt so viel Wärme speichern können wie mineralische Materialien. [Krick 2008, 52 f.]

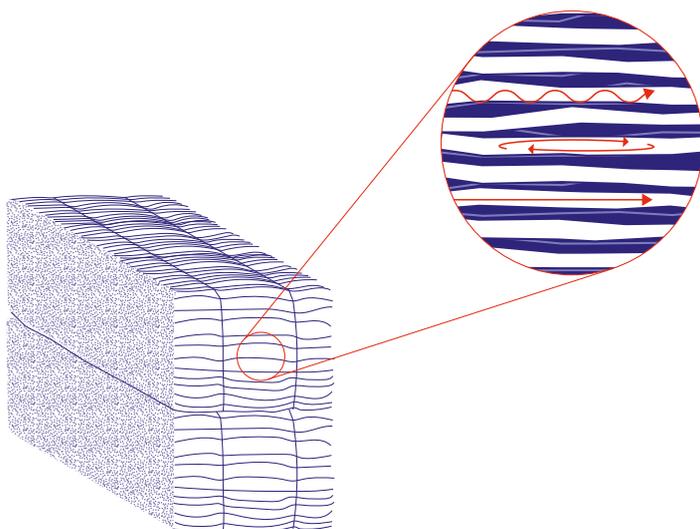
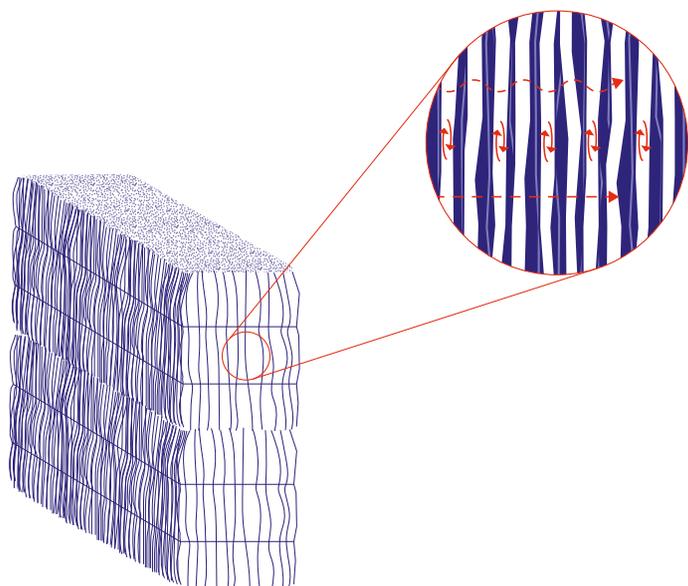
Je schlechter ein Baustoff Wärme leitet, desto besser sind seine Dämmfähigkeiten. Die Wärmeleitung durch einen festen Stoff wird als Transmission bezeichnet. Davon unterscheidet sich die Konvektion, bei der Wärme durch fluide Medien wie Wasser oder Luft transportiert wird. Wärmestrahlung hingegen ist an keinen Stoff gebunden und kann Wärme über elektromagnetische Wellen und somit auch durch ein Vakuum übertragen. [Baunetz 2023b]

In einer Strohballenwand hängen diese drei Transportmechanismen von der Ausrichtung der Halme ab. Bei einem liegenden Ballenformat sind auch die Halme überwiegend waagrecht orientiert und ermöglichen Strahlung, Konvektion und Transmission von Wärme durch das Bauteil. Werden die Ballen hingegen stehend verbaut, bilden die senkrechten Halme Luftkammern, die den Wärmetransport durch das Bauteil erschweren. [Krick 2008, 49 f.]

Beim lasttragenden Strohballenbau ist aus statischen Gründen ein liegendes

Ballenformat vorzuziehen [Cascone, Rapisarda und Cascone 2019, 3]. Bisher liegt kein Literaturwert für die Wärmeleitfähigkeit von Großballen vor, sondern lediglich ein gutachterlich festgelegter Wert von $\lambda = 0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für ein Beispielobjekt in Weimar [Helbig 2022, 10]. Im Bereich der Dämmstoffe, die λ -Werte von $0,024\text{--}0,045 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ aufweisen, ist dies ein schlechter, verglichen mit Nadelholz ($\lambda = 0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) aber ein günstiger Dämmwert.

Zur Berechnung des U-Wertes, der den Wärmeverlust durch ein Bauteil angibt, spielt außerdem die Bauteildicke eine wichtige Rolle: je dicker das Bauteil, desto geringer der U-Wert und desto besser die Dämmwirkung. Bei einem lasttragenden Wandaufbau mit 120 cm starken Strohballen die beidseitig verputzt sind, ergibt sich ein U-Wert von $0,08 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Der Passivhausstandard mit einer Anforderung von $U = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ wird somit um mehr als das Doppelte übertroffen. [Helbig 2022, 10]



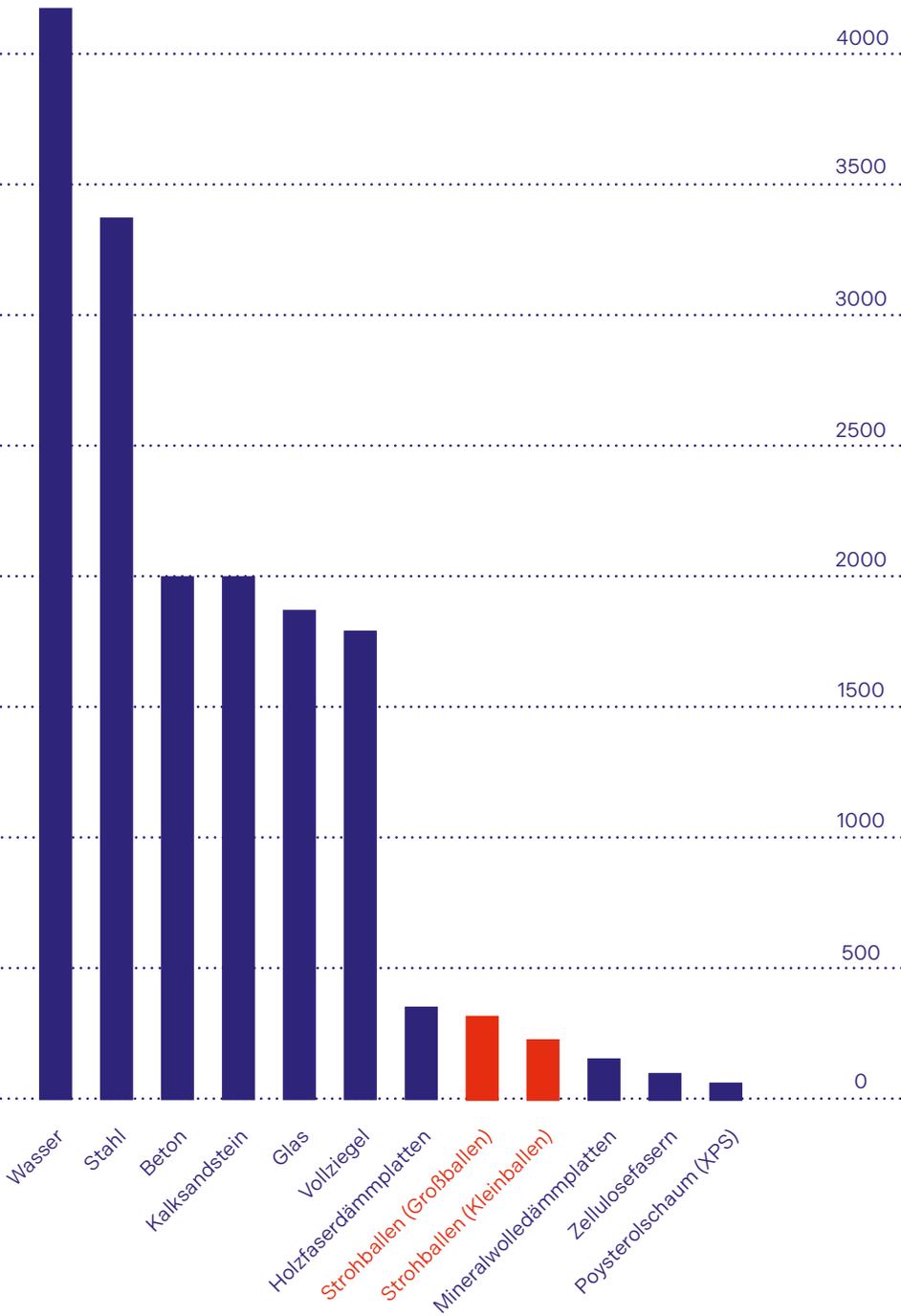
Transmission



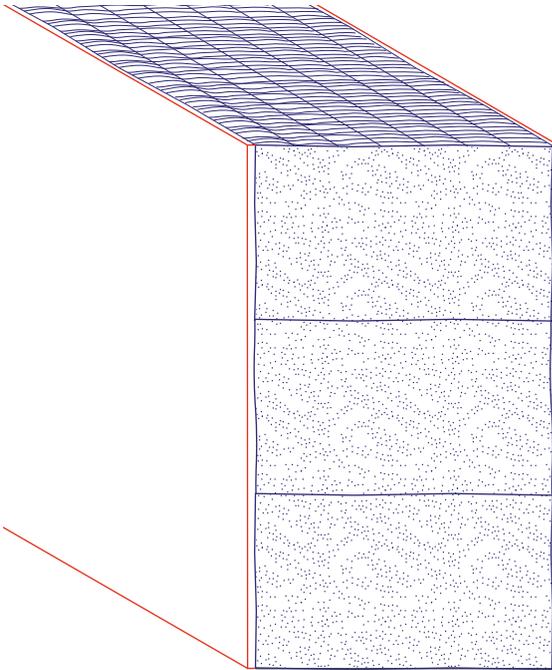
Strahlung



Konvektion



A.23 Wärmespeicherfähigkeit C je Kubikmeter verschiedener Materialien (in kJ/K)
[eigene Abbildung; Krick 2008, 53]



Lehmputz
 3 cm
 0,35 W/(mK)
 1000 kg/m³
0,09 m²K/W

Großballen
 120 cm
 0,10 W/(mK)
 210 kg/m³
12,00 m²K/W

Kalkputz
 3 cm
 0,25 W/(mK)
 500 kg/m³
0,12 m²K/W

R = 12,21 m²K/W

U-Wert = 0,08 W/m²K

Erforderlicher U-Wert Passivhausstandard ≤ 0,15 W/m²K

FEUCHTESCHUTZ

Stroh zählt zu den hygroskopischen Baustoffen, es ist also in der Lage, Feuchtigkeit aus der Umgebung aufzunehmen und wieder abzugeben. Die Vorgänge von Wasseraufnahme (Adsorption) und Wasserabgabe (Desorption) werden als Sorption zusammengefasst. Jeder hygroskopische Stoff hat eine materialspezifische Gleichgewichtsfeuchte, die sich nach einiger Zeit bei konstanter Umgebungsfeuchte und -temperatur einstellt.

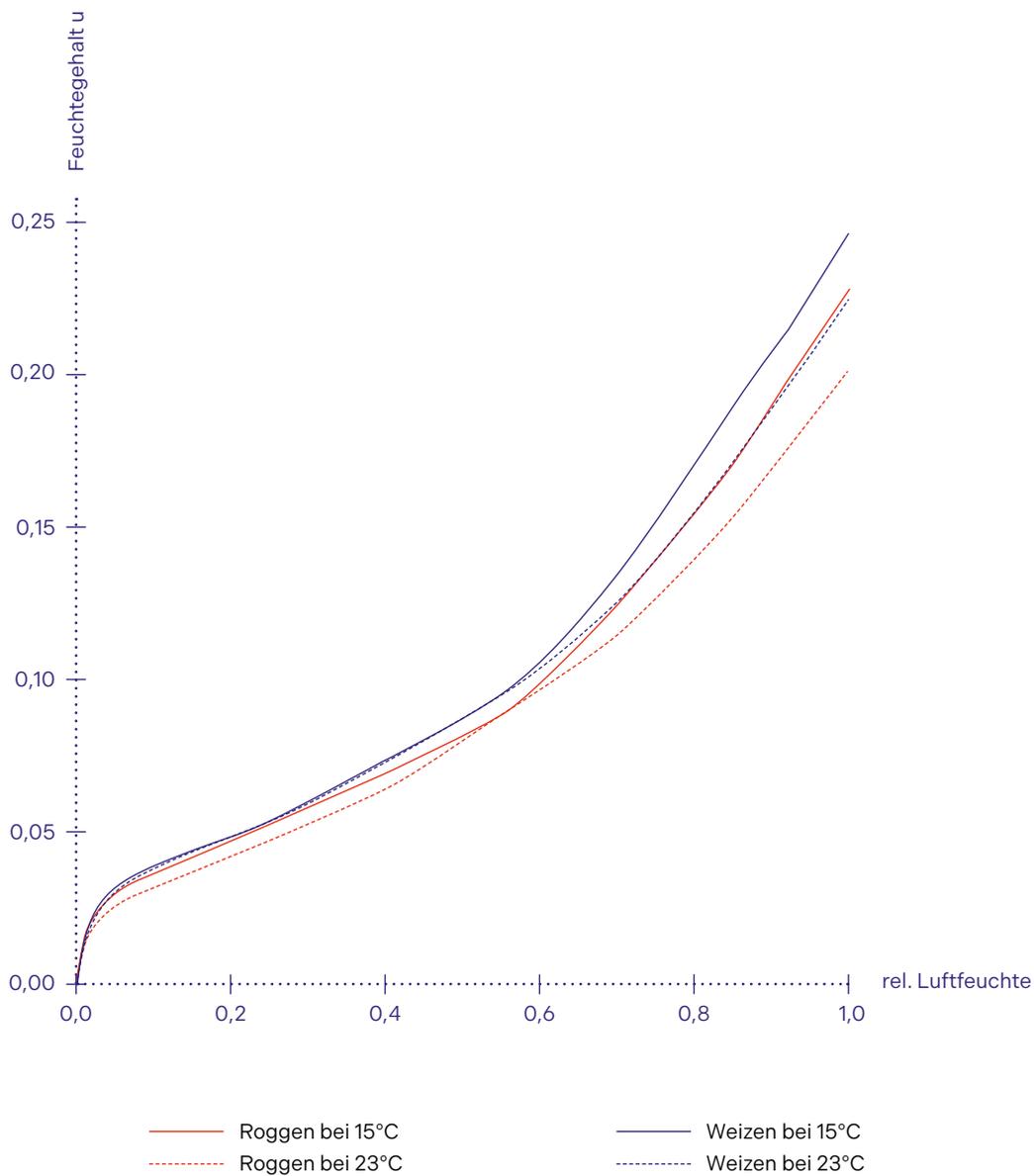
[Baunetz 2023a]

Bei einer höheren Luftfeuchte steigt auch die Gleichgewichtsfeuchte. Die Feuchtigkeitsaufnahme kann nur bis zur maximalen Sättigung (100 % r. F.) erfolgen. Darüberhinausgehende Luftfeuchte kann nicht mehr aufgenommen werden und fällt in Form von Kondensat aus. Der Sättigungswert hängt auch von der Temperatur ab: je wärmer es ist, desto mehr Feuchtigkeit kann die Luft aufnehmen, desto höher ist auch der absolute Sättigungswert. Die Sorptionsisotherme zeigen die Gleichgewichtsfeuchte verschiedener Strohsorten in Abhängigkeit von der Temperatur. [Krick

2008, 25 ff.]

Ein diffusionsoffener Wandaufbau ohne Dampfbremsen oder -sperrern ermöglicht den Feuchtetransport durch das Bauteil. In gemäßigten Klimazonen verläuft das Dampfdruckgefälle in der Regel vom warmen, feuchteren Innen- zum kühleren Außenraum. Daher sollten die gebäudeabschließenden Bauteilschichten in diesen Regionen nach außen hin diffusionsoffener werden. Ist dies nicht der Fall, besteht die Gefahr eines Feuchtestaus im Bauteil, der dazu führen kann, dass die maximale Feuchtesättigung überschritten wird und Kondensat ausfällt. [Minke und Krick

2023, 22 f.]

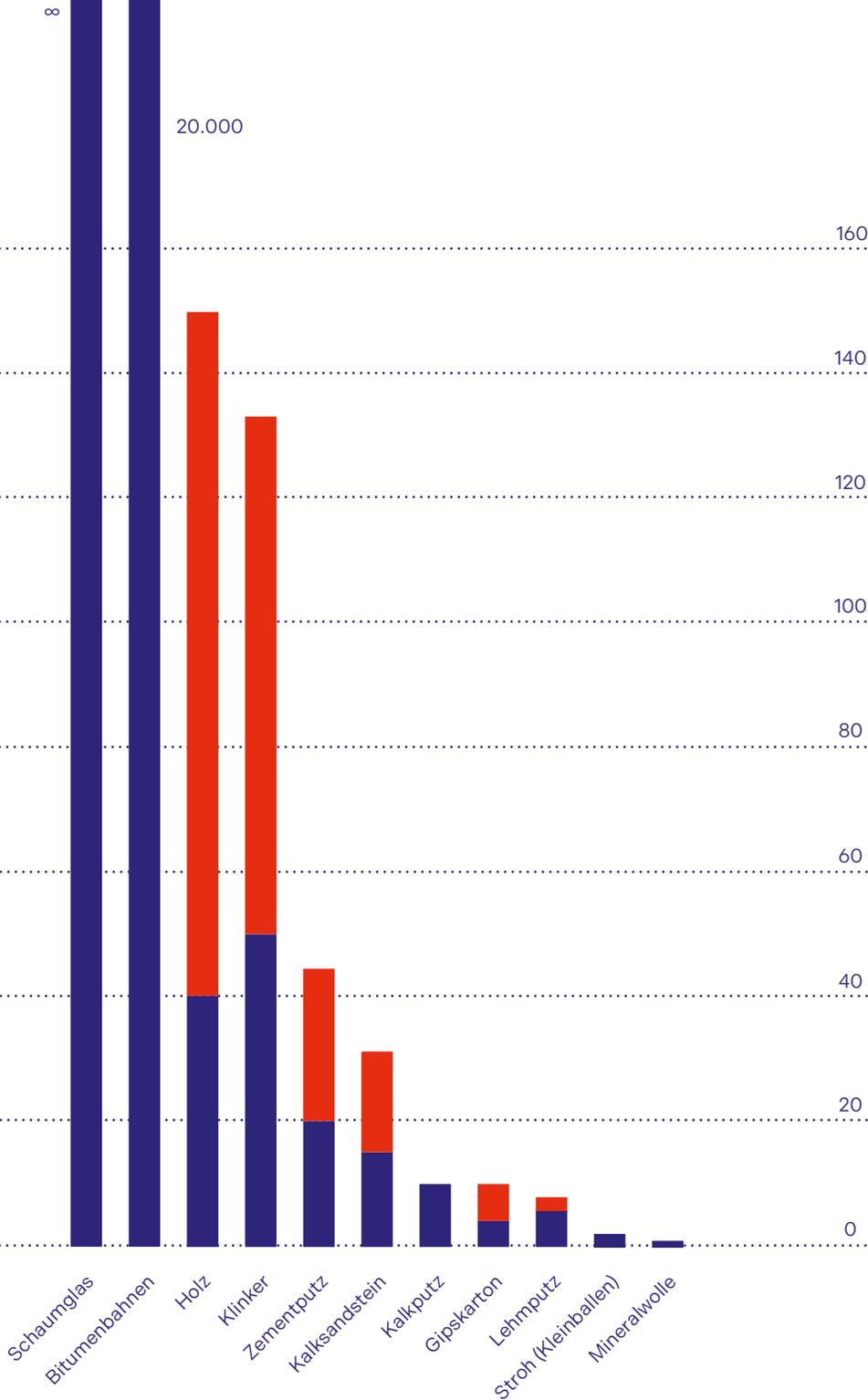


A.25 Sorptionsisotherme von Roggen und Weizen in Abhängigkeit zur Temperatur
[eigene Abbildung; Krick 2008, 28 f.]

Schimmelpilze finden sich in oder auf porösen Materialien und wachsen, indem sie organische Substanz zersetzen. Neben einem geeigneten Substrat benötigen Schimmelpilze ein feuchtes, warmes Klima, um sich ausbreiten zu können. Bei ungünstigen Bedingungen werden Sporen gebildet, die resistenter als der Pilz sind und bei besseren Wachstumsbedingungen wieder auskeimen können. Da Sporen durch den Wind verteilt werden, muss davon ausgegangen werden, dass sie an den meisten Getreidehalmen vorzufinden sind. Erst wenn die Pflanze tot und nicht mehr widerstandsfähig ist und wenn gute Wachstumsbedingungen im Stroh vorliegen, kann sich der Schimmelpilz verbreiten. [Wieland 2004]

Während dieser Prozess für den Nährstoffkreislauf der Natur essenziell ist, kann Schimmel im Bauteil zur Zersetzung des Strohs und zu Bauschäden führen, darüber hinaus sind einige Schimmelpilze gesundheitsschädigend. Nach Untersuchungen des Fraunhofer-Instituts ist ein Schimmelbefall bei einer Luftfeuchtigkeit von unter 75 % r. F. in der Konstruktion ausgeschlossen [Krick 2008, 34].

Dies entspricht einem massebezogenen Feuchtegehalt von 15 %. Ein durchschnittlicher Großballen mit einem Volumen von rund $2,0 \text{ m}^3$ ($120 \times 240 \times 70 \text{ cm}$) und einer Dichte von 150 kg/m^3 weist ein Gewicht von ca. 300 kg auf. Pro Ballen können also 45 Liter Wasser aufgenommen werden, bevor die 15 % Feuchtegehalt überschritten werden und eine Schimmelpilzgefährdung vorliegt. Untersuchungen zeigen außerdem, dass bei einer kurzzeitigen Überschreitung des Maximalwertes die Wahrscheinlichkeit des Schimmelwachstums sinkt [Minke und Krick 2023, 24].



A.26 Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen verschiedener Baustoffe (μ)

[eigene Abbildung; Minke und Krick 2023, 22; DIN eV. 2020]

SCHALLSCHUTZ

Je nach Nutzung innerhalb eines Bauwerkes und angrenzender Räume und Gebäude stellt die DIN 4109 Mindestanforderungen an den Schallschutz bestimmter Bauteile. So müssen schutzbedürftige Räume, die dem dauerhaften Aufenthalt oder der Genesung dienen, vor Geräuschemissionen geschützt werden. Hierbei legt die DIN 4109 das jeweils erforderliche Luftschalldämmmaß $R'w$ abhängig vom Außenlärmpegel und von der Schutzbedürftigkeit des Innenraumes fest.

Das Schalldämmmaß von lasttragenden Strohballenkonstruktionen wurde bisher noch nicht ermittelt. Messergebnisse verschiedener nichtlasttragender Strohballenkonstruktionen liegen hingegen vor: so wurde für eine Wand aus einer 9 cm starken Dreischichtplatte, 50 cm Strohballen und 3-4 cm Lehmputz ein Schalldämmmaß von 55 dB nachgewiesen. Eine 45 cm starke Strohballenwand, beidseitig 2,5 bzw. 3,5 cm verputzt, weist je nach Frequenz ein Schalldämmmaß zwischen 31 und 67 dB auf, was ungefähr vergleichbar mit 10-15 cm starken, massiven Kalksandstein- und Betonwänden ist. Eine 36 cm dicke Strohballenwand, die beidseitig 1 cm stark verputzt ist, kommt auf Messwerte von 43 dB. [Minke und Krick 2023, 27]

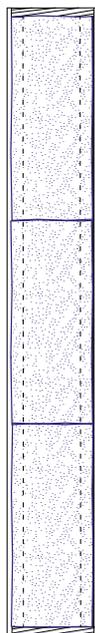
Laut Minke et al. [2023, 26 f.] erreichen Strohballenwände einen besseren Schallschutz als gleich schwere einschalige Bauteile, da das Stroh eine Federwirkung aufweist und Schall im Ballen absorbiert wird. Im Hinblick auf die lasttragende Bauweise ist außerdem zu beachten, dass bei einer größeren flächenbezogenen Masse auch ein besseres bewertetes Schalldämmmaß vorliegt [DIN eV. 2018]. Es ist daher davon auszugehen, dass Großballen, die dichter sind als Kleinballen, auch höhere Schalldämm-

fähigkeiten aufweisen. Darüber hinaus sind die Wandstärken teilweise mehr als doppelt so hoch wie die der geprüften Holzständerwände.

Das Schalldämmmaß lasttragender Strohballenkonstruktionen ist jedoch noch nicht nachweisbar ermittelt. Um auf Standard- und Rechenwerte zurückgreifen zu können, sind weitere Forschungsarbeiten notwendig.

Holzständerwand
 Lehmputz 1 cm
 Ständerwerk mit Kleinballen 36 cm
 Lehmputz 1 cm

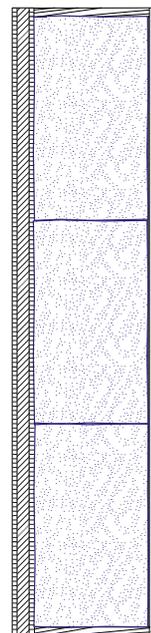
$$R_{w,R} = 43 \text{ dB}$$



38 cm

Kleinballenwand
 Kreuzlagenplatte Fichte 9 cm
 Kleinballen 50 cm
 Lehmputz 4 cm

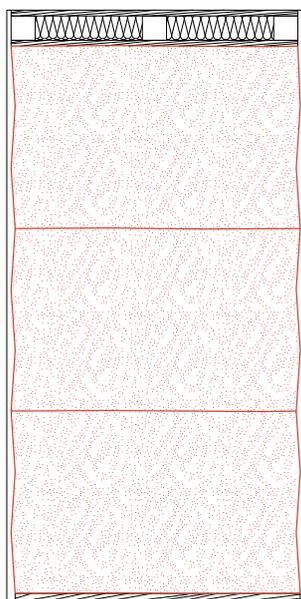
$$R_{w,R} = 55 \text{ dB}$$



63 cm

Lasttragende Großballenwand
 Lehmputz 3 cm
 Großballen 120 cm
 Kalkputz 3 cm

$R_{w,R}$ analog begründbar



126 cm

geprüfter Wandaufbau
 Wert analog begründbar

BRANDSCHUTZ

Für die Beurteilung ihrer Brandschutzeigenschaften können Bauteile und Baustoffe in Feuerwiderstands- und Brandschutzklassen eingeteilt werden. Die Feuerwiderstandsklassen ergeben sich aus der Anzahl der Minuten, die das fragliche Bauteil unter Vollbrandbelastung bei normierten Bedingungen standhält: F30 (feuerhemmend), F60 (hochfeuerhemmend), F90 (feuerbeständig), F120 (hochfeuerbeständig) und F180 (höchstfeuerbeständig). Die Brandschutzklassen von Baustoffe und Bauteile ergeben sich aus ihrer Brennbarkeit: nichtbrennbar, schwerentflammbar, normalentflammbar und leichtentflammbar.

Von der Materialprüfungsanstalt Braunschweig [2014] wurde Stroh in Form von Kleinballen als normalentflammbar eingestuft, wenn es eine Schichtdicke von mindestens 36 cm und eine Rohdichte von $85\text{--}115\text{ kg/m}^3$ aufweist. Werden die Strohballen beidseitig mit mindestens 8 mm nichtbrennbarem Lehm- bzw. Kalkputz verputzt, gilt das Bauteil als schwerentflammbar. [Minke und Krick 2023, 27 f.] Je nach Wandaufbau können strohgedämmte Holzständerkonstruktionen Feuerwiderstandsklassen von F30-B bis zu F90-B erreichen [Materialprüfungsanstalt Braunschweig 2014].

Während loses Stroh sehr schnell Feuer fängt, ist der Brandwiderstand von Strohballenkonstruktionen wesentlich höher. Dies lässt sich durch verschiedene Aspekte erklären: einerseits mangelt es durch die dichte Pressung der Strohhalm im Ballen an Sauerstoff, wodurch die Ausbreitung des Feuers gehemmt wird. Zudem bildet sich, ähnlich wie bei Holz, an den Strohballenoberflächen eine Schicht verkohlter Halme, die ein weiteres Eindringen von Sauerstoff in den Ballen und eine

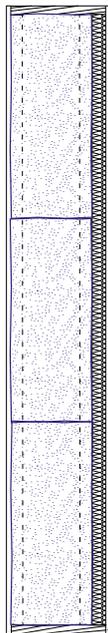
Ausdehnung der Flamme vermindern. Ist der Ballen zusätzlich mit Lehm- bzw. Kalkputz verkleidet, schützt die nichtbrennbare Putzschicht das Stroh vor Entflammen.

[Minke und Krick 2023, 27]

Für die lasttragende Bauweise liegen zum Brandschutz bisher keine allgemeingültigen Nachweise oder Kenndaten vor, auf die in der Planung und der Bauantragsstellung zurückgegriffen werden kann. Die oben aufgeführten Parameter wurden nur an nichttragenden Kleinballen getestet, weshalb Schlussfolgerungen für lasttragende Großballenwände lediglich abgeleitet werden können.

Die geprüften Bauarten [Materialprüfungsanstalt Braunschweig 2014] unterscheiden sich von lasttragenden Strohballensystemen in drei wesentlichen Aspekten: Dichte, Wandstärke und Konstruktionsmaterial. Weil Großballen deutlich dichter gepresst als Kleinballen sind, ist davon auszugehen, dass sie im Vergleich zu Kleinballen eine mindestens gleichwertige - wenn nicht bessere - Brennbarkeitsklasse aufweisen (normalentflammbar). Die Wandstärke ist außerdem je nach Ballenart rund doppelt so dick wie die geprüften Bauarten, sodass von einer längeren Feuerwiderstandsdauer ausgegangen werden kann. Der geprüfte Wandaufbau besteht aus einem verputzten, strohgedämmten Holzständerwerk. Das Holz wird, wie die Strohballen, als normalentflammbar klassifiziert. Bei einer homogenen Strohballenwand, die ebenfalls beidseitig verputzt ist und dieselbe Brandschutzklasse wie Holz aufweist, dürfte diese Abweichung daher keine Auswirkungen auf ihre Brandschutzeigenschaften haben.

Holzständerwand mit Strohballedämmung
AbP-geprüft

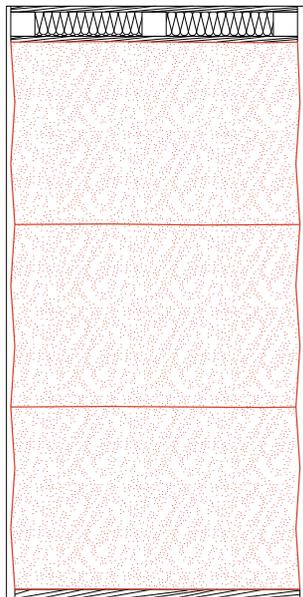


ca. 40 cm

- F 30
- ≥ 8 mm Lehmputz
- ≥ 36 cm Strohballe in Holzständerwerk
- ≥ 8 mm Lehmputz

- F 90
- ≥ 18 mm Kalkputz
- ≥ 36 cm Strohballe in Holzständerwerk
- ≥ 18 mm Kalkputz

Lasttragende Großballenwand
Brandschutz analog begründbar



ca. 124 cm

- F 30
- ≥ 8 mm Lehmputz
- 120 cm Großballen
- ≥ 8 mm Lehmputz

- F 90
- ≥ 18 mm Kalkputz
- 120 cm Großballen
- ≥ 18 mm Kalkputz

- Geprüfter Wandaufbau
- Wert analog begründbar

4

Vertikale Lasten

Horizontale Lasten

Tragwerk

VERTIKALE LASTEN

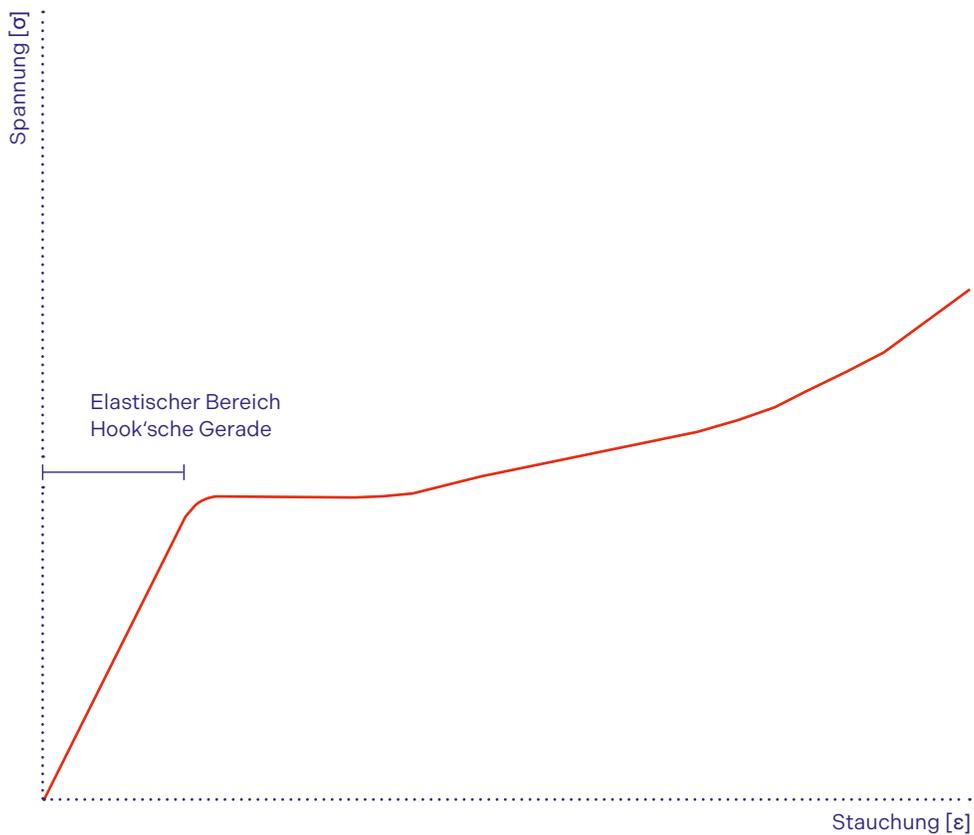
Bei lasttragenden Strohballenwänden erfolgt der Großteil der Belastung in der Regel über vertikale Druckkräfte. Das elastomechanische Verhalten dieser Konstruktionen unter Druckbelastung muss dementsprechend besonders beachtet werden [Krick 2008, 57].

Wirkt eine Last auf ein Bauteil, verformt es sich abhängig von seinen Eigenschaften und der Art und Größe der Last. Mit steigender Belastung kommt es zum Versagen des Bauteils. Je nach Verformungsverhalten wird zwischen duktilen und spröden Werkstoffen unterschieden: Duktile Werkstoffe wie Stahl nehmen ab einer bestimmten Belastung eine plastische, also dauerhafte Verformung an, die auch nach Entfernen der Last bestehen bleibt. Spröde Werkstoffe wie Keramik kennzeichnen sich durch einen abrupten Bruch. [Krick 2008, 58]

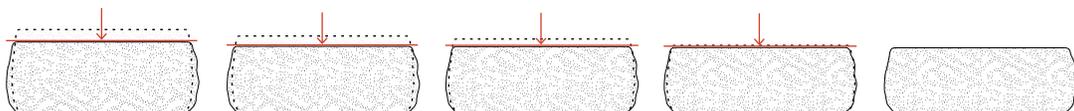
Wird eine Strohballenwand mit vertikalem Druck belastet, tritt eine spontane Verformung in Form von Stauchung ein. Die Höhe des Bauteils verringert sich, gleichzeitig dehnt es sich seitlich nach dem Poisson'schen Gesetz aus. Tests zeigen, dass Strohballen nach dem Entlasten wieder 70-80 % ihrer Ursprungshöhe annehmen, weshalb Minke et al. sie als teilplastischen Werkstoff bezeichnen [2023, 33]. Bei gleichbleibender Last über einen längeren Zeitraum nimmt die Verformung mit sinkender Geschwindigkeit zu, bis sich die neue Form schließlich stabilisiert. Dieser Prozess wird als Kriechen bezeichnet und ist bei Strohballenwänden erfahrungsgemäß nach vier bis sechs Wochen abgeschlossen. Gleichzeitig findet während dieser Zeit ein Spannungsabbau im Baukörper statt, der den Übergang in einen neuen Gleichgewichtszustand er-

möglicht und als Relaxation beschrieben wird. [Krick 2008, 146 f.]

Der Elastizitätsmodul (E-Modul) gibt das Verhältnis zwischen Verformung und Spannung im Baukörper an und beschreibt somit seine Verformbarkeit. Steifere Werkstoffe weisen einen höheren E-Modul auf [Forschungszentrum Jülich GmbH 2023]. Bei Strohballenkonstruktionen hängt der E-Modul stark von der Dichte der Ballen, der Einbauart und der Verkleidung ab. Je dichter die Ballen sind, desto höher ist der E-Modul. Großballen weisen eine höhere Dichte und somit eine höhere Steifigkeit als Kleinballen auf [Minke und Krick 2023, 33]. Das Verhalten von Strohballen unter vertikaler Druckbelastung hängt von der Halmausrichtung ab: bei einer horizontalen Halmausrichtung stauchen sich die Ballen etwas mehr, bei einer stehenden Halmausrichtung ist die Knickgefahr allerdings höher. [Gruber, Santler, Kade und Howlett 2017, 42] Beim Bauen mit Großballen und in der vorliegenden Arbeit wird daher von einem liegenden Ballenformat ausgegangen.



A.29 Elastizitätsmodul von duktilen Werkstoffen
[verändert nach Krick 2008, 58]



A.30 Schematisches Kriechverhalten unter konstanter Belastung im Laufe der Zeit
[eigene Abbildung]

Aufgrund der hohen Verformbarkeit sollte die Verteilung der Lasten möglichst gleichmäßig auf alle Wände erfolgen und Kraftkonzentrationen sollten vermieden werden. Hierfür sollten die Wände oben mit einem Ringanker abgeschlossen werden. Dieser sollte die Wand optimalerweise auch in der Breite überspannen, um die Lasten über die gesamte Fläche des Strohballens zu verteilen. Eine partielle Lasteinleitung hat eine stärkere Verformung und somit einen geringeren E-Modul der Wand zu Folge. Auf Seite 82 wird die Ausführung des Ringankers genauer beschrieben.

Eine seitliche Begrenzung der Ballen wirkt sich ebenfalls positiv auf ihre Steifigkeit aus. Versuche zeigen, dass Strohballenwände einen höheren E-Modul aufweisen als einzelne Ballen, da sie sich durch den Verbund nicht seitlich ausdehnen können.

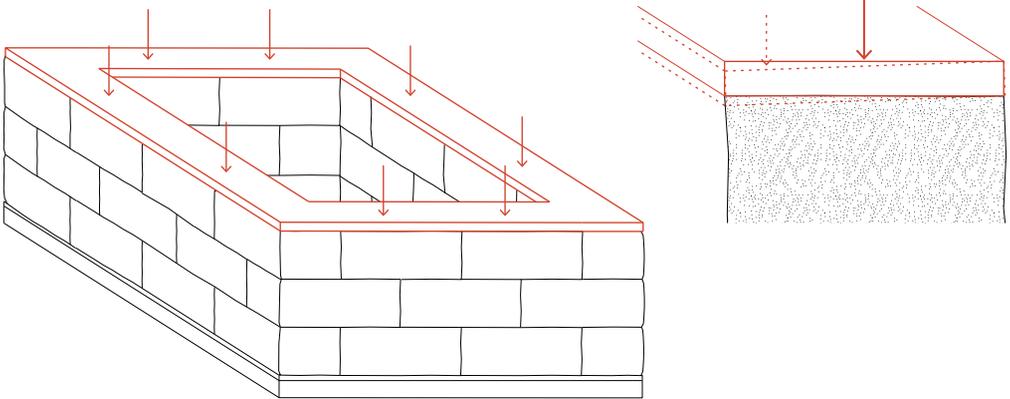
[Taubé 2022, 18]

Vorteilhaft ist hierbei auch, dass durch die Querdehnung automatisch Lücken zwischen den Ballen besser geschlossen werden. Aus demselben Grund sollten Laibungen in den Wänden als stabile seitliche Begrenzungselemente ausgeführt werden, die gleichzeitig Anschlussmöglichkeiten für Türen und Fenster bieten, siehe dazu auch Seite 78.

Auch wenn in Deutschland die statische Funktion von Putz nicht rechnerisch angesetzt werden darf, belegen zahlreiche Untersuchungen, dass Putz und Stroh eine Verbundwirkung, ähnlich wie die eines Sandwichelementes, aufweisen. Verputzte Strohballenwände haben daher ein höheres E-Modul als unverputzte Wände. [Krick 2008, 61]

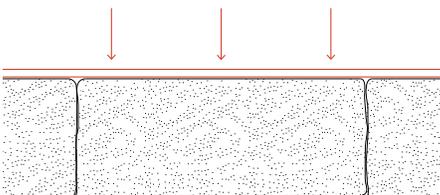
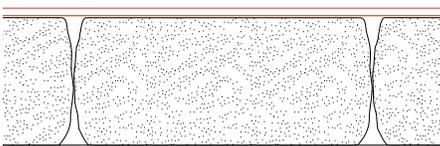
Um Bauschäden zu vermeiden, sollten Bauarbeiten, die im Bezug zur Strohballenwand stehen, erst nach Abschluss der Setzung vorgenommen werden. Durch Vorspannung der Wand können Vertikallasten vorweggenommen und der Setzungsprozess beschleunigt werden. Hierbei sollte die zunächst aufgebrachte Anfangsspannung nach und nach erhöht werden, um eine größere Belastung zu erreichen als während der Nutzungsdauer zu erwarten ist. So können spätere Setzungen vermieden werden. [Krick 2008, 148] Eine Vorspannung kann entweder durch Gewindestangen oder über Spanngurte erfolgen, siehe dazu Seite 74. Diese übernehmen auch den kraftschlüssigen Verbund der Ballenreihen untereinander. Als langfristiges Forschungsziel ist ein statischer Nachweis wünschenswert, der jegliche Formen von Spannankern redundant macht, um zur Vereinfachung der Bauweise beizutragen.

Die Wand sollte außerdem nicht zu schlank sein, um ein Ausbeulen oder Knicken vorzubeugen. Die Schlankheit bezeichnet das Verhältnis von Wandhöhe zu Wanddicke, welches bei lasttragenden Strohballenwänden maximal 6:1 betragen sollte [Gruber, Santler, Kade und Howlett 2017, 38].



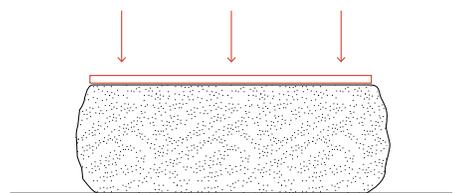
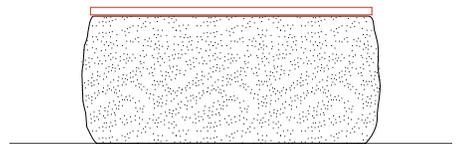
A.31 Gleichmäßige Lasteinleitung
[eigene Abbildung]

Seitlich begrenzt



Geringere Verformung, Ausfüllen der Lücken

Seitlich nicht begrenzt



Höhere Verformung und Instabilität

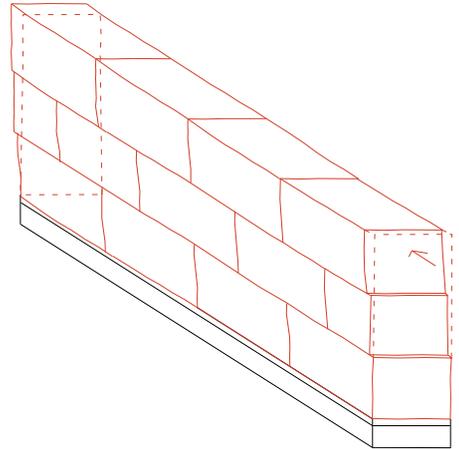
A.32 Verformung der Ballen unter Belastung
[eigene Abbildung; Taube 2022]

HORIZONTALE LASTEN

Durch Windlasten werden Bauteile während der Nutzungsdauer auch horizontal auf Zug und Druck beansprucht. Bei Wänden kann zwischen längs und quer zur Wand auftreffenden Horizontallasten unterschieden werden. Trifft eine horizontale Kraft in Wandrichtung auf eine Wand, treten Scherkräfte auf. Diese können durch die Reibung der Strohballenoberflächen untereinander teilweise aufgenommen werden. Die Vorspannung, die die Ballen aufeinandergedrückt, verstärkt diesen Effekt. Außerdem können die Ballenreihen über die Gewindestangen oder zusätzliche Holznägel untereinander verbunden werden. Bei verputzten Strohballenwänden haben die Putzschichten eine Scheibenwirkung, die den Strohballenverbund zusätzlich aussteifen. Sie können Zug- und Drucklasten aufnehmen, weisen aber bei zu hoher Belastung Risse auf, die Feuchteschäden nach sich ziehen können. Eine Armierung des Putzes ist daher in jedem Fall sinnvoll [Krick 2008, 61 f.]

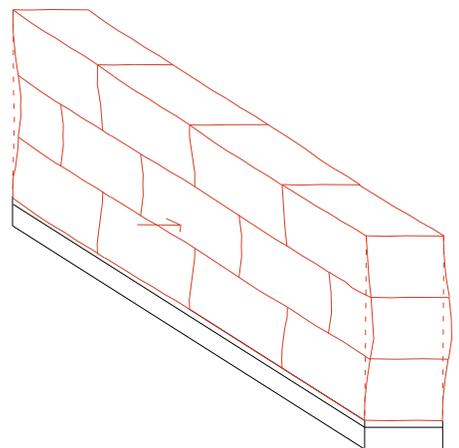
Sowohl verputzte als auch unverputzte Strohballenwände neigen bei Horizontallasten, die quer zur Wand auftreffen, zum Ausbeulen oder Knicken. Durch entsprechende Maßnahmen müssen die Wände je nach statischer Berechnung zusätzlich ausgesteift werden. Krick zeigt eine Möglichkeit in Form von „horizontal in die Wand eingelegte[n] Elemente[n]“ [2008, 149] auf, die als Zugelemente die Knickstabilität erhöhen sollen und gleichzeitig zur Anbringung von Wandmöbeln oder Fassadenelementen dienen können.

Horizontalkräfte parallel zur Wand



Die Grafiken beziehen sich auf Kleinballen. Großballen sind breiter und wesentlich schwerer, weshalb ihr Verhalten unter Horizontallasten nicht mit dem von Kleinballen gleichgesetzt werden kann. Die Grafiken sind für die Planung mit Großballen daher nur als Prinzipskizzen zu verstehen.

Horizontalkräfte quer zur Wand



5

Fundament und Sockel

Wände

Wandverkleidungen

Öffnungen

Innenwände und Stützen

Ringanker

Dach

Gewölbekonstruktionen

Konstruktion

FUNDAMENT UND SOCKEL

Grundsätzlich stellt der Strohballenbau keine besonderen Anforderungen an die Gründungsausführung. Der Sockel und die Bodenplatte sollten gut gedämmt sein, keine Wärmebrücken aufweisen und die darüberliegenden Bauteile vor aufsteigender Feuchtigkeit schützen. Die Ausführung des Fundamentes sollte in jedem Fall auf das örtliche Klima, die Lage des Gebäudes und die Bodenbeschaffung abgestimmt sein. Bei Streifen- oder Ringfundamenten ist zu beachten, dass die hohen Wandstärken sehr breite Auflager und somit voluminöse Fundamente erfordern.

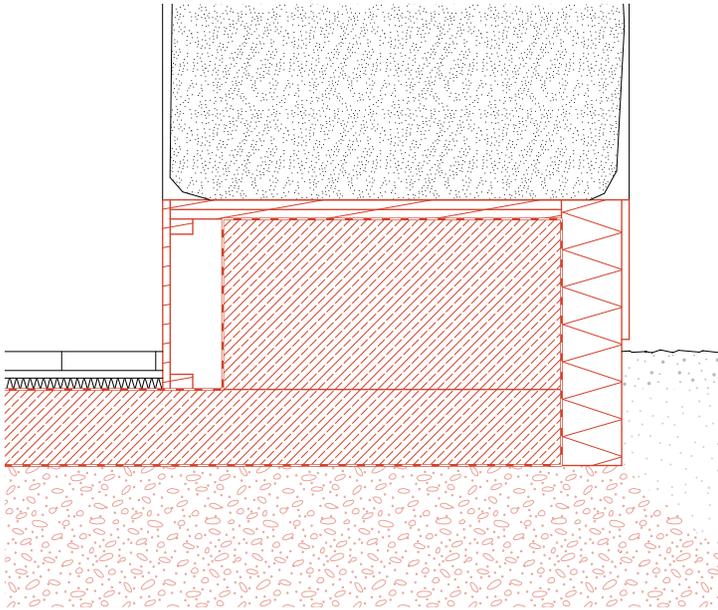
[Minke und Krick 2023, 52]

Stroh muss, ebenso wie Holz, vor aufsteigender Feuchtigkeit und Spritzwasser geschützt werden. Es ist daher ratsam, die in der DIN 68800 Teil 2 festgelegten Parameter für Sockelausbildungen bei Holzkonstruktionen auch auf die Strohbauweise anzuwenden. Demnach beginnt die Strohballenkonstruktion optimalerweise erst 30 cm oberhalb des Geländes ^[DIN eV. 2022]. Auch innenseitig sollte das Stroh vor eventuell auslaufendem Wasser geschützt werden und gegebenenfalls - wenn keine andere Schutzmaßnahme ergriffen wird - einige Zentimeter oberhalb des Fertigfußbodens liegen. Die erste Strohballenlage sollte auf einem Schwellholz liegen, unter dem eine Horizontalsperre vorzusehen ist.

Strohballen können auch für die Dämmung des Fußbodens eingesetzt werden. Sie dienen dabei als Untergrund für einen schwimmend verlegten Fußbodenaufbau. Hierbei muss besonders auf eine sorgfältig verlegte Dampfsperre und, insbesondere in Räumen mit Wasseranschlüssen, einen ausreichend dichten Bodenbelag geachtet werden. Die Ballen dürfen nicht direkt auf dem Erdreich aufliegen und

müssen vor aufsteigender Feuchtigkeit mit einer horizontalen Feuchtigkeitssperre versehen werden. Bei einer Aufständeringung sollte in jedem Fall darauf geachtet werden, dass der Hohlraum zwischen Erdboden und Bodenplatte ausreichend belüftet ist. Andernfalls kann es im Sommer zu Tauwasserausfall kommen, wenn sich dort warme, feuchte Luft ansammelt, anschließend abkühlt und niederschlägt.

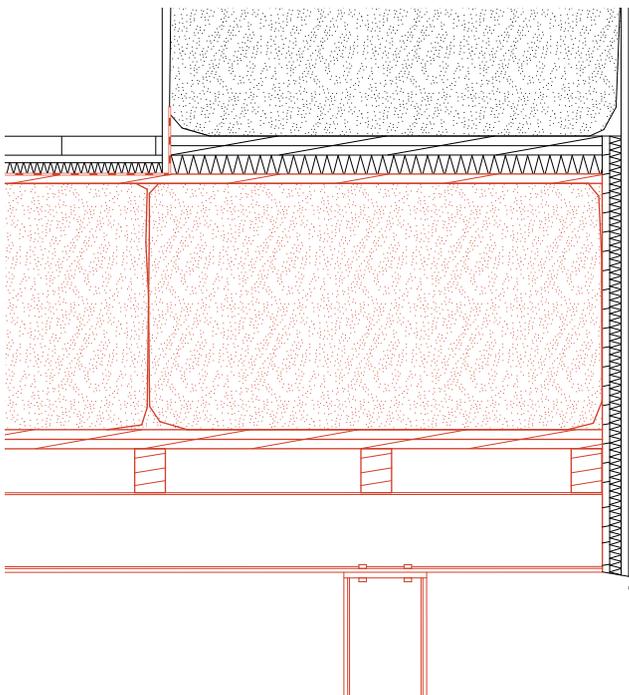
[Minke und Krick 2023, 46,52]

**Sockel**

Holzverschalung
 Unterkonstruktion mit
 Installationsebene
 Aufkantung Stahlbeton
 druckfeste Sockeldämmung
 Sockelputz

Bodenplatte

Fußbodenaufbau
 Bodenplatte Beton
 PE-Folie
 Schaumglasschotter
 Geotextil

**Sockel**

Aufständerung Stahlkonstruktion
 (bspw. am Hang)

Bodenplatte

Fußbodenaufbau
 Abdichtung
 OSB-Platte
 Großballen
 OSB-Platte, doppelt
 Unterkonstruktion
 Stahlträger
 Luftraum

A.34 Beispiele für Sockelausführungen
 [eigene Abbildungen]

WÄNDE

Aus den Erkenntnissen statischer Untersuchungen lassen sich einige Grundprinzipien für das Herstellen von tragenden Strohballenwänden ableiten. Die Außenwände bilden das Kernbauteil dieser Bauweise und sollten dementsprechend besondere Beachtung in allen Leistungsphasen erhalten.

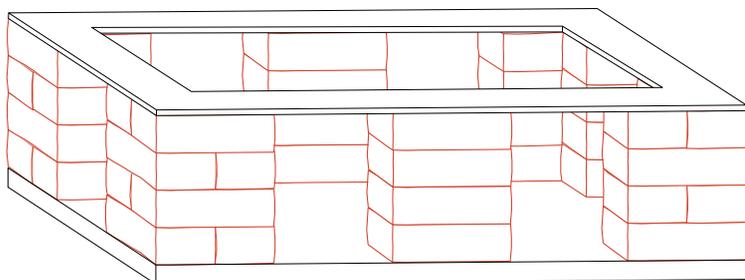
Grundsätzlich gilt, dass es sich bei Strohballen um ein sehr ungenaues Baumaterial handelt, welches Toleranzen von 10-15 cm erfordert. Es empfiehlt sich, den Innenausbau so unabhängig wie möglich von den Großballenwänden zu gestalten, um nicht auf genaue Maße der Außenwände angewiesen zu sein.

Mithilfe eines Krans werden die rund 300 kg schweren Ballen im Verbund aufeinandergestapelt. Die erste Reihe liegt auf einem Schwellenholz auf, das ein gleichmäßiges Auflager bietet und die Strohballen vom Sockelmaterial trennt. Ein Wandverhältnis von 1:6 sollte nicht überschritten werden, sodass bei 1,20 m breiten, flach liegenden Ballen eine maximale Wandhöhe von 7,20 m möglich ist, zuzüglich der Höhe der Aufkantung.

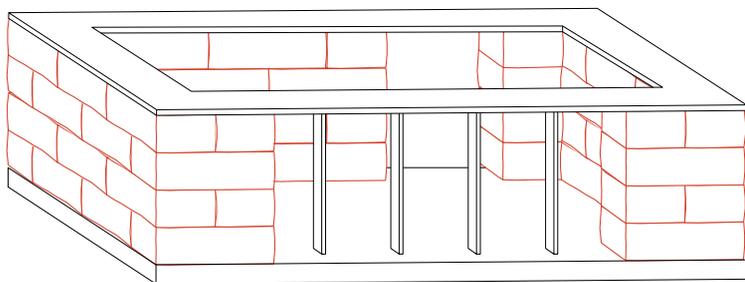
Weil die Ballen sich durch die Setzung in Längsrichtung etwas ausdehnen, sollte bei den Gebäudeaußenecken darauf geachtet werden, die Ballen ca. 10 cm einzurücken. So schließen die Kopfenden der Ballen nach dem Setzungsprozess bündig mit der Ecke ab und es entstehen keine Ausbeulungen. [Kade 2022] Sollten die Ballenköpfe doch herausstehen, können sie nachträglich bearbeitet werden, indem Stroh an den entsprechenden Stellen herausgezogen und die Bindung mithilfe von Holzstiften und Zwirbeln nachträglich gespannt wird.

Von vornherein sollte das Maß der Ballen in Absprache mit den Landwirten festgelegt werden. In der Praxis sind die Strohballen an den Stirnseiten ausgebeult und das Außenmaß daher häufig 5-10 cm länger, als die Einstellung der Großballenpresse anzeigt, was entsprechend bei der Planung oder bei den Presseinstellungen beachtet werden muss. Wenn eine vorherige Absprache aus vergaberechtlichen Gründen nicht möglich ist, sollte von den Standardmaßen ausgegangen werden, die auf Seite 45 aufgeführt sind.

Die Planung sollte zum Großteil auf den Ballenmaßen beruhen und möglichst wenige Sonderlängen aufweisen. Dadurch läuft einerseits die Ballenherstellung reibungsloser ab, andererseits ermöglichen viele gleichlange Ballen auch ein leichteres Austauschen von mangelhaften Exemplaren. In einer Wand mit wenigen Öffnungen können die ungenauen Ballenmaße außerdem durch geschicktes Anordnen ausgeglichen werden.



Rein lasttragende Bauweise



Hybridbauweise

A.35 Öffnungskonzepte

[eigene Abbildung]

Strohballen sind im Verbund stabiler als einzeln [Krick 2008, 147]. Bei der Planung von Öffnungen spricht dies für möglichst durchgehende Wandscheiben und wenige, aber dafür große Wandöffnungen. Je nach Spannweite erfordern sie zusätzliche Stützen innerhalb der Laibung, die den Sturz abfangen. Somit liegt eine Hybridbauweise vor, bei der ein Teil der Lasten über Stützen abgetragen werden, siehe dazu Seite 80. Wenn der Lastabtrag ausschließlich über die Strohballen erfolgen soll, müssen die Öffnungen entsprechend schmal geplant werden.

Durch konstruktive und strategische Maßnahmen sollte ein ausreichender Witterungsschutz der Strohballen gewährleistet werden. Neben der Wahl der Fassadenbekleidung spielt die Ausrichtung des Gebäudes eine wichtige Rolle, um die Wetterseite durch besondere Maßnahmen zu schützen, beispielsweise durch Baumbestand oder Nachbargebäude [Corum 2005, 5].

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Ballen untereinander zu verbinden, die unterschiedliche Anforderungen erfüllen:

Auf Spannanker, die zur Verbindung und Vorspannung der Ballen dienen, kann gemäß der bisher genehmigten Bauten seitens der Bauaufsicht noch nicht verzichtet werden. Spannanker sind Gewindestangen, die innerhalb der Wand liegen und das Fundament mit dem Ringanker verbinden. Mithilfe von Muttern kann der Ringanker in mehreren Durchgängen nach unten gepresst werden, was auch eine genaue Ausrichtung der Horizontalen ermöglicht.

Bei in der Wand liegenden Spannankern müssen die Ballen seitlich geschlitzt werden, um die Spannanker nachträglich einzubringen und in der Aufkantung zu verankern. Die Schlitzte müssen anschließend ausgestopft werden; dennoch besteht die Gefahr von Korrosion durch Tauwasserausfall, da die Stangen Kältebrücken über die Betonaufkantung bilden. Es muss auch bedacht werden, dass das Nachspannen über rund sechs Wochen hin möglich sein muss. Die Zugänglichkeit des Spannankers mit einem Momentenschlüssel sollte bei der Planung des Bauteilanschlusses berücksichtigt werden. Außenseitig angebrachte Spannanker sind leichter zugänglich, stellen jedoch einen zusätzlichen gestalterischen Aspekt dar, der frühzeitig beachtet werden muss.

[Gruber, Gruber und Santler 2012, 58]

Spanngurte hingegen werden außen an der Wand über den Ringanker entlanggeführt und am Fundament befestigt. Sie können mit einer Ratsche nachgespannt werden, wobei die Feinjustierung nicht so exakt verläuft wie bei den Ankerstangen.

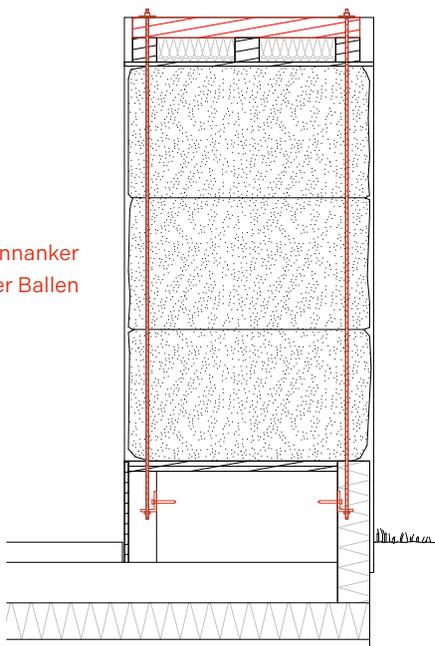
Zudem ist ein Ausbuckeln der Wände beim Nachspannen wahrscheinlicher, da die Spannung nicht innerhalb der Wand liegt. Vorteilhaft ist aber, dass keine Kältebrücken entstehen und die Ballen beim Stapeln nicht aufgespießt werden müssen. Die Gurte verbleiben in der Konstruktion und werden überputzt. Je nach Bauvorhaben kann eine Genehmigung für die Verwendung von Spanngurten als Teil einer lasttragenden Konstruktion problematisch sein, da sie in Deutschland nicht als Bauprodukt anerkannt sind.

Beim Nachspannen stauchen sich die Ballen und dehnen sich der Länge nach etwas aus. Teilweise werden dadurch etwaige Lücken in den Ballenfugen gefüllt, teils müssen Hohlräume händisch ausgestopft werden, um größere Luft einschüsse zu vermeiden. Hierbei sollte das Stroh nicht nur oberflächlich, sondern mit einer Metallgabel tief in den Ballen geschoben werden, da oberflächliche Füllungen beim Verputzen wieder rausgerissen werden

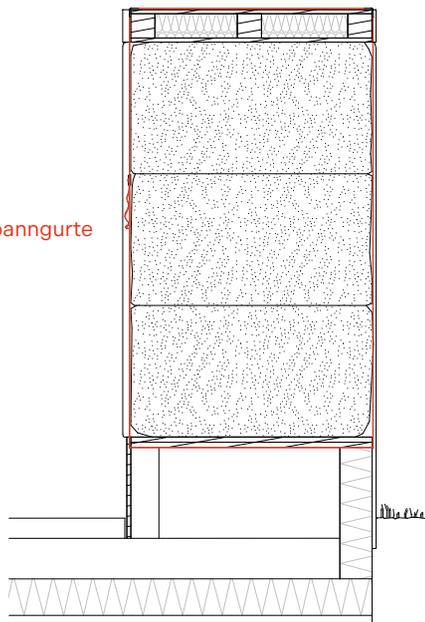
[Minke und Krick 2023, 80].

Die simpelste Variante zur Verbindung der Ballenreihen stellen Holzstangen dar, die nach dem Schichten von oben in die Ballen geschlagen werden [Gruber, Gruber und Santler 2012, 58]. Diese dienen jedoch lediglich zur Verbindung der Ballenreihen und können keine Vorspannung leisten. Bei einer solchen Konstruktion muss statisch nachgewiesen werden, dass die Auflast die Ballen ausreichend zusammendrückt, sodass Horizontalkräfte von der Wand aufgefangen werden können. Weil es dafür noch keine belastbaren Nachweise gibt, ist diese Variante alleine bauaufsichtlich noch nicht zugelassen.

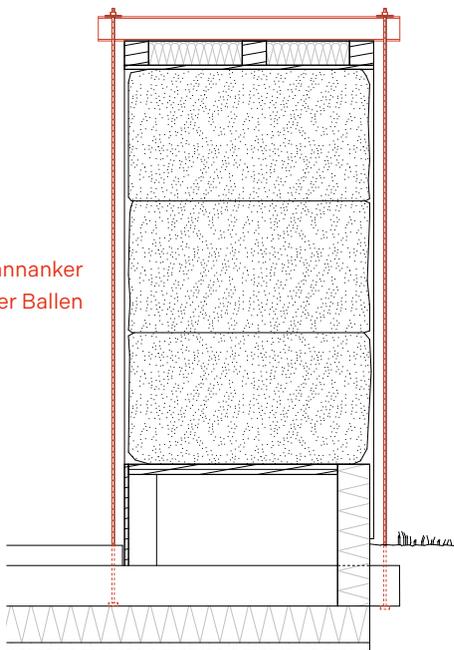
Spannanker
innerhalb der Ballen



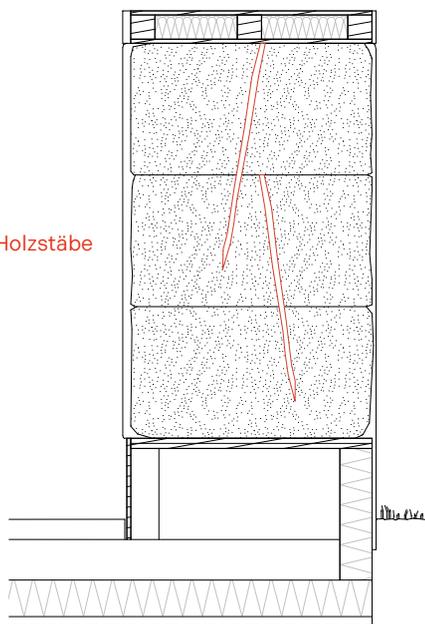
Spanngurte



Spannanker
außerhalb der Ballen



Holzstäbe



WANDVERKLEIDUNGEN

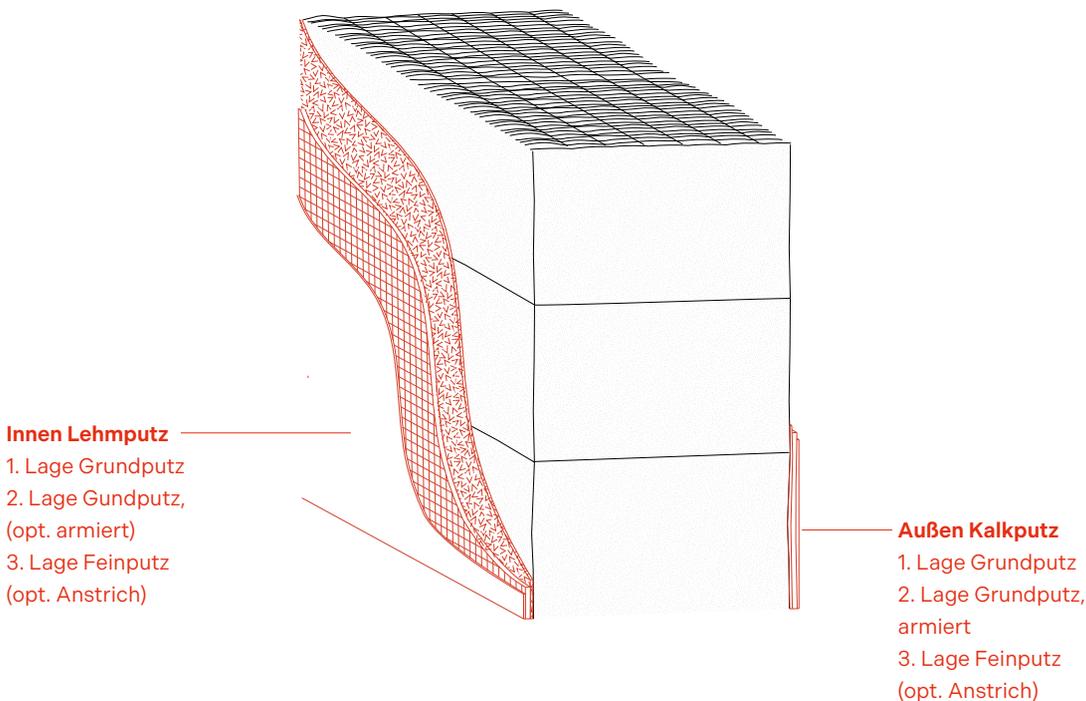
Durch die Vereinigung statischer und dämmender Funktionen in einem homogenen Bauprodukt wird ein diffusions-offener Wandaufbau ermöglicht. Weil die Bauweise noch nicht über eigene Prüfzeugnisse verfügt, müssen die Wandaufbauten von der ETA für Kleinballen abgeleitet werden, um zulassungsfähig zu sein. Diese trifft Aussagen zur Strohqualität, Ballendichte, Konstruktionsweise, Wandbreite und Bekleidung. Aus Brand-schutzgründen muss die Strotoberfläche vollumfänglich mit nichtbrennbarem Putz verkleidet werden. Darüberhinausgehende Fassadenbekleidungen sind in Abhängigkeit vom Witterungsschutz und dem Entwurfskonzept zu bestimmen.

Um das Ausdiffundieren von Feuchtigkeit aus dem Stroh nicht zu behindern, sollten möglichst diffusionsoffene Materialien verwendet werden. Lehmputz hat eine geringe Diffusionswiderstandszahl, darf aber nur im Außenbereich verwendet werden, wenn er vor Witterung geschützt ist, beispielsweise durch eine vorgesetzte Holzfassade. Im Innenraum bietet sich Lehmputz aufgrund seiner klimaregulierenden Eigenschaften an. Kalkputz ist ebenfalls diffusionsoffen und kann durch seine Wetterfestigkeit als Fassadenbekleidung dienen. Es gibt spezielle Lehm- und Kalkputze für Stroh, die eine höhere Elastizität aufweisen und kleinere Bauteilbewegungen tolerieren, ohne Risse zu bilden. Putze, die auf Zement oder Gips basieren, erlauben kaum Bewegungen oder Wasserdampfdiffusion und erhöhen somit die Gefahr von Feuchteschäden. In jedem Fall muss bei der Wahl des Wandaufbaus das Dampfdruckgefälle von innen nach außen beachtet werden. Bevor der Außenputz aufgebracht wird, sollte innen verputzt werden, damit die Feuchtigkeit

des Lehmputzes in den Außenraum diffundieren kann. [Minke und Krick 2023, 62 f.]

Das Verputzen sollte nach Abschluss der Setzungsphase stattfinden. Die Ballenseiten können je nach Wunsch mit einer elektrischen Heckenschere getrimmt werden, sodass eine gleichmäßige Wandoberfläche entsteht. Durch die offenen Halme entsteht eine optimale Putzhaftung, weshalb auf einen Putzuntergrund verzichtet werden kann. Corum et al. [2005, 64 f.] empfehlen außerdem das Anbringen eines Drahtgitters zur Aufnahme von Bauteilbewegungen und dem Schutz vor Rissbildung.

Anschließend wird der Putz in der Regel dreilagig aufgetragen. Mit der ersten Schicht werden herausstehende Strohalme fixiert und die Grundlage für die folgenden Schichten gebildet. Sie sollte dünnflüssig, aber tonhaltig sein, um tief in das Stroh einzudringen und mit viel Druck aufgebracht werden, um lose Halme zu fixieren und einen stabilen Untergrund für die weiteren Schichten zu gewährleisten. Durch die fette Mischung entstehen Risse, die den Haftgrund verbessern.



A.37 Putzschichten
[eigene Abbildung]

Die zweite Schicht sollte magerer sein, keine Trocknungsrisse mehr aufweisen und mit einer Dicke von maximal 2 cm die Wandoberfläche ebenen. Vor allem bei Materialübergängen, Kanten und größeren Flächen ist das Einarbeiten von Putzgewebe ratsam, um Risse zu vermeiden. Besonders die Fuge neben der Laibung muss sorgfältig abgedichtet werden, da sie anfällig für Feuchteschäden ist.

Die dritte Schicht ist der Abschluss der Wand und wird als Feinputz 5-10 mm dick aufgetragen. Je nach gewünschter Ästhetik kann eine Oberflächenbehandlung erfolgen. Durch entsprechende Anstriche kann die Feuchte-, Kratz- oder Stoßanfälligkeit der Putze minimiert werden. [Minke und

Krick 2023, 62 f.]

ÖFFNUNGEN

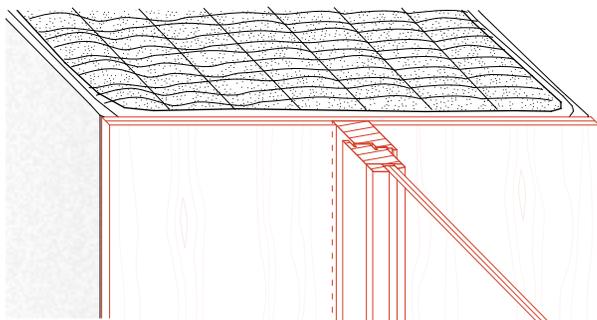
Öffnungen in den Wänden sollten innerhalb des Strohballenrasters platziert werden, sodass keine speziellen Ballenlängen notwendig sind. Aufgrund der hohen Dämmwirkung der Wand ist es sinnvoll, die Wärme der flach einstrahlenden Wintersonne zu nutzen und im Süden große Glasflächen zu platzieren, während die Nordfassade eher geschlossen bleibt. Um sommerlicher Überhitzung vorzubeugen, bedarf es einer Verschattung im Süden und gegebenenfalls auch an den Ost- und Westfassaden, damit die tief stehende Sonne den Innenraum in den warmen Monaten nicht erhitzt.

Öffnungen in der Wand sollten immer über die gesamte Wandhöhe verlaufen. Wandabschnitte, die aus weniger Ballenreihen bestehen, würden aufgrund unterschiedlicher Lasteinträge ein anderes Setzungsverhalten aufweisen. Sie könnten nicht zusammen mit dem restlichen Wandverbund vorgespannt werden, wodurch es zu Spannungen im Bauteil und Rissbildungen kommen kann. Eine saubere Trennung von Öffnungen und Wandscheiben ist daher sinnvoll. Im Bereich der Brüstung kann bei nicht bodentiefen Fenstern der Anschluss über eine gedämmte Hilfskonstruktion oder direkt auf der Aufkantung (falls vorhanden) erfolgen. Die großen Wandstärken bieten aber auch Platz für im Brüstungsbereich integrierte Möbel.

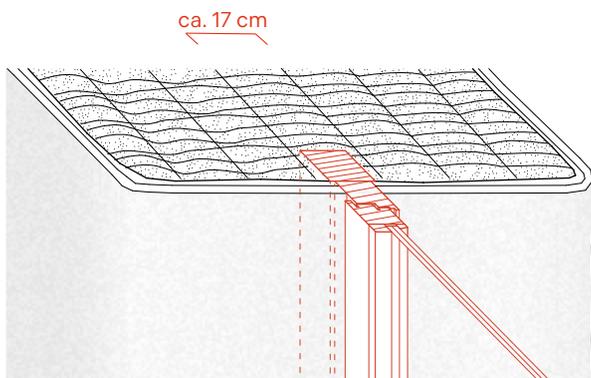
Die Breite der Öffnungen erfordert je nach Konstruktion des Ringankers und der Höhe der Lasten zusätzliche Stützen. Diese können in der Fensterfront integriert werden, wobei sich ihre Stärke und Positionierung nach der statischen Bemessung und ihre Höhe nach dem endgültigen Setzungsmaß richtet.

Eine gängige Ausführung der Laibungen erfolgt durch Holzkästen. Hierbei werden wandbreite Kästen aus Massivholz oder OSB-Platten vorgefertigt und vor dem Aufstellen der Wände in ihrer Position fixiert [Bocco Guarneri 2013]. Dies hat den Vorteil, dass die Laibung gleichzeitig als seitliche Begrenzung der Strohballen dient, was sich positiv auf den E-Modul auswirkt. Bei einer ausreichenden Stärke der Kästen können sie außerdem als Anschluss für die Fenster genutzt werden. Die Fenster sollten optimalerweise mittig in der Wand platziert werden, um Temperaturunterschiede im Anschluss weitestgehend zu vermeiden.

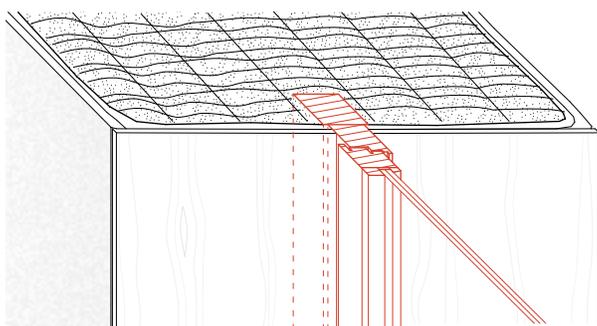
Die Abdichtung des Fenster-Wand-Anschlusses gestaltet sich leichter, wenn die Fensterrahmen nicht an den Holzkästen befestigt werden, sondern an einem versteckten Rahmen aus Kanthölzern innerhalb des Strohs. Diese können nach dem Stellen der Wand in die Strohballen gesetzt werden, sodass ein bündiger Anschluss von Laibung und Fenster ermöglicht wird. Während des Aufstellens können auch provisorische Rahmen als seitliche Begrenzung verwendet werden. Mit einer Motorsäge können die Ballen geschlitzt werden, wobei hier besonders auf die Unversehrtheit der Bindungen geachtet werden muss. Die Abstände zwischen den Bindungen betragen in der Regel rund 17 cm. Dieses Maß ist bei der Positionierung der Fenster in der Wand zu beachten.



Strohballen
Lehmputz als Brandschutz
OSB-Platte als Laibungsanschluss
Holzabdeckung



Strohballen
Kantholz (geschlitzt)
als Laibungsanschluss
Lehmputz als Brandschutz
Feinputz



Strohballen
Kantholz (geschlitzt)
als Laibungsanschluss
Lehmputz als Brandschutz
Holzabdeckung

INNENWÄNDE UND STÜTZEN

Beim lasttragenden Strohballenbau bilden die Strohhaußenwände in der Regel die einzige Tragkonstruktion. Bei größeren Spannweiten kann zusätzliche Last über Innenwände oder Stützen abgetragen werden. Wenn diese aus einem anderen Material bestehen, liegt ein unterschiedliches Setzungsverhalten vor, was zu Rissbildung und Bauschäden führen kann. Wenn das Setzungsmaß vorab nicht eingeschätzt werden kann, sollten Stützen, Fenster und weitere, abhängige Bauteile erst nach der Setzung hergestellt und eingebaut werden. Während des Setzungsprozesses können temporäre, höhenverstellbare Baustützen verwendet werden.

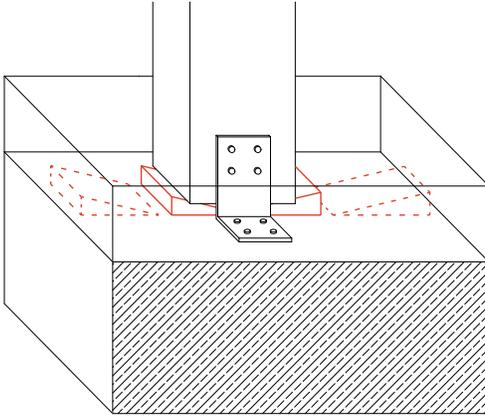
Die Strohhaußenwände weisen eine hohe Dämmleistung, dafür aber eine geringe Masse auf. Dadurch besitzen sie kaum thermische Speicherfähigkeit, weshalb es aus bauphysikalischer Sicht sinnvoll sein kann, die Innenbauteile massiver auszuführen und mit Wand- oder Bodenheizungen auszustatten. Als ökologisches Material für den Innenraum bietet sich beispielsweise Lehm an, der in Masse den Luftschall dämmen, das Raumklima regulieren und Wärme oder Kälte speichern kann [ETHZ Materialarchiv 2014].

Im Entwurfskonzept sollte grundsätzlich beachtet werden, dass die Strohhallenwände keine Installationsebene aufweisen. Das Anbringen von Hängemöbeln kann je nach Gewicht problematisch werden oder sollte zumindest in der Entwurfsplanung schon berücksichtigt werden, damit gegebenenfalls Holzleisten in der Wand mit verankert werden können [Minke und Krick 2023, 61]. Es kann daher sinnvoll sein, alle Installationen und Wandmöbel in den Innenwänden und Zwischendecken zu führen.

Wasser- oder Elektroinstallationen sollten nicht im Stroh geführt werden. An Kaltwasserrohren kann sich Feuchtigkeit niederschlagen und Schimmelbildung fördern. Zudem besteht die Gefahr eines Rohrlecks, der ebenfalls gravierende Bauschäden nach sich ziehen kann. Elektrokabel sollten aus Brandschutzgründen ebenfalls möglichst außerhalb der Strohwand verlegt werden. Es gibt dennoch die Möglichkeit, die Wand nachträglich zu schlitzen und Stromkabel in einem Gipsbett und nicht brennbaren Kabelkanälen oder Leerrohren zu verlegen. [Minke und Krick 2023, 61]

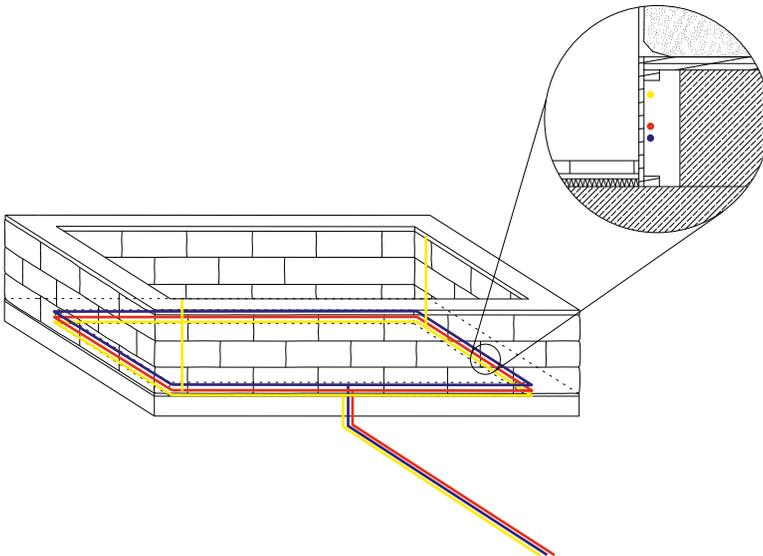
Falls eine Aufkantung vorhanden ist, kann diese zurückspringen und im Erdgeschoss als Installationsebene genutzt werden, in welcher Kabel, Leitungen und Steckdosen verlaufen. Der Ringanker kann ähnlich genutzt werden und der Leitungsführung im Deckenbereich dienen. Je nach Bodenaufbau können hier ebenfalls Leitungen verlegt werden, die in der Decke oder Abhangdecke integriert sind.

Lichtschalter können in Laibungen oder als Aufputzinstallation eingebracht werden. Eine weitere konzeptionelle Möglichkeit ist, die Installationen vorwiegend in den Innenwänden unterzubringen, sodass die Strohhallenwände von Innenausbauarbeiten unangetastet bleiben.

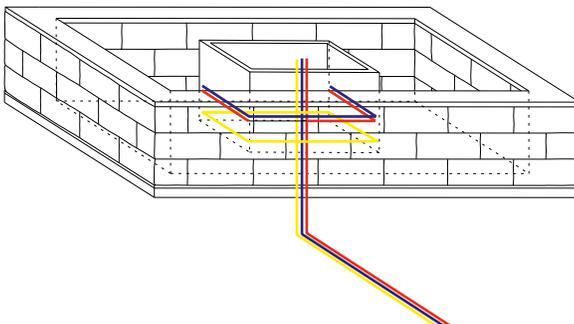


Fußpunkt Stütze
[eigene Abbildung]

Nachträgliches Anbringen
einer tragenden Stütze
nach dem Setzungsprozess
mithilfe von Keilen und Winkeln
auf der Rohdecke



Installationsebene
im Sockelbereich



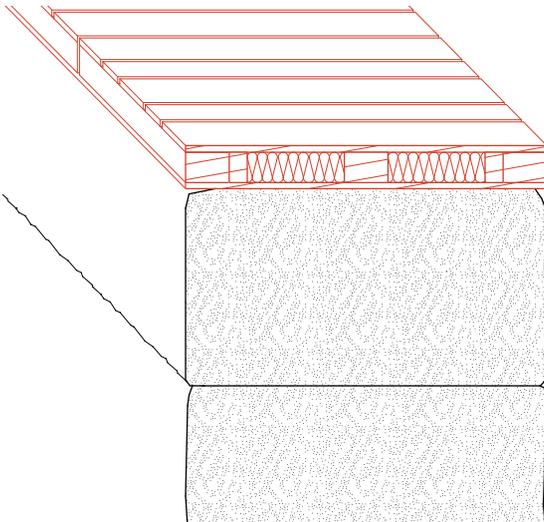
Installationsebene
in den Innenwänden

RINGANKER

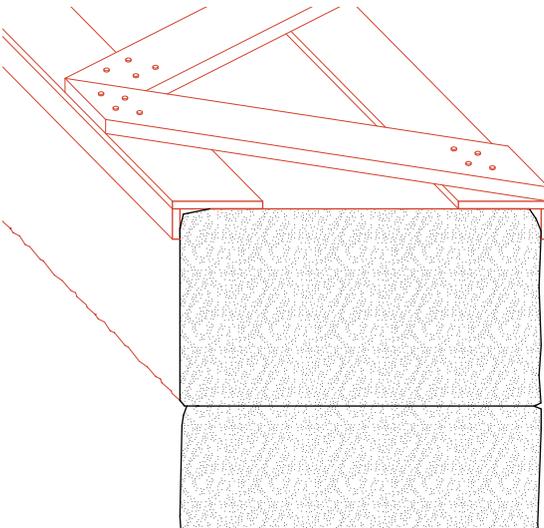
Der obere Abschluss einer jeden Strohballenwand bildet der Ringanker. Dieser fixiert die Wände und ermöglicht eine gleichmäßige Lasteinleitung. Der Ringanker sollte entsprechend stabil ausgeführt werden und aus Holz gefertigt sein, um Wärmebrücken bestmöglich zu vermeiden [Minke und Krick 2023, 57]. Eine partielle Lasteinleitung, also eine Kraftkonzentration auf der Wand, wirkt sich ungünstig auf ihr E-Modul aus: wird die Kraft an einer Seite der Wand konzentriert, droht sie zu kippen oder auszubeulen, bei einer mittigen Kraftkonzentration drücken sich die Ballen in der Mitte zu stark zusammen. Daher ist eine Lastverteilung über die gesamte Breite der Wand ratsam. Um Material zu sparen und Wärmebrücken zu vermeiden, sollte auf massive Ringanker verzichtet werden. Stattdessen gibt es Konstruktionsweisen von Ringankern, die eine Dämmung innerhalb des Bauteils erlauben.

Eine gängige Möglichkeit ist, die Kräfte durch ein Lastverteilungsbrett einzuleiten, auf dem drei Längshölzer oder Europaletten verschraubt sind. Die Verbindung mit der Wand kann entweder über Holznägel oder über die Spannanker erfolgen. Der Ringanker kann auch als flache Fachwerkkonstruktion ausgeführt werden, bei der die Lasteinleitung durch L-Profile an beiden Außenkanten erfolgt und der Ringanker gleichzeitig fixiert wird. Die beiden L-Profile werden mit Schräghölzern verbunden und bilden dadurch eine geringe Konstruktionshöhe. Eine dritte Möglichkeit ist ein Ringbalken als Kastenelement, der aus Stegträgern besteht. Er bietet eine leichte und sehr tragfähige Alternative. [Minke und Krick 2023, 57]

Auf dem Ringanker kann die Zwischendecke angeschlossen werden, die wiederum ein Auflager für die nächste Geschosswand bietet. Als Zwischendecken eignen sich Holzbalken- oder Massivholzdecken. Im Bodenaufbau können, ähnlich wie bei den Innenwänden, massive Materialien eingebracht werden, um die Luftschall- und Speicherfähigkeit des Bauteils zu erhöhen. Zwischendecken können auch als Kappendecken ausgeführt werden, welche aus Segmenttonnengewölben aus Strohballen bestehen. Auf den Widerlagern zwischen den Tonnengewölben kann die Konterlattung für den Fuß- oder kalten Dachboden liegen.



Konstruktion aus Europaletten
 Zwischendämmung aus
 Holzweichfaserplatten
 Längsverbindung mit Kanthölzern



Fachwerkkonstruktion
 flacher Bauteilaufbau
 mit L-Kantenprofilen aus Holz

DACH

Die Dachlasten sollten möglichst gleichmäßig auf die Wände verteilt werden, um unterschiedliche Setzungen zu vermeiden. Viele Dachformen sind nicht gleichseitig und leiten die Lasten unterschiedlich in die Wände ein. Bei Satteldächern beispielsweise werden die Traufwände stärker belastet als die Giebelwände, ein Effekt, der sich mit zunehmender Dachneigung erhöht. Ähnliches gilt für Pult- und Tonnendächer. Andere Dachformen, wie Zelt- und Walmdächer verteilen die Lasten gleichmäßiger, ebenso wie flache Sheddächer und Flachdächer.

Abgesehen von Gewölbekonstruktionen können Strohballen in horizontalen Bauteilen keine tragende Funktion übernehmen. Sie werden im Dach in der Regel als Zwischen- oder Aufsparrendämmung oder in vorgefertigten Dachkästen verbaut und erfordern eine zusätzliche, tragende Holzkonstruktion. Aufgrund der großen Konstruktionshöhen von Großballen kann es sinnvoll sein, im Dach Kleinballen zu verwenden, da sie flacher sind und somit den Holzverbrauch mindern.

Schon früh in der Planung sollte das Strohballenmaß beachtet werden, um Sparrenabstände daran anzupassen. Da die Breite der Strohballen verlässlicher als ihre Länge ist, sollten sie längs eingebaut werden, wodurch sich ein Sparrenabstand von zwei Kleinballen oder einem Großballen anbietet. Minke et al. empfehlen eine lichte Weite von 94-95 cm bei Kleinballen [2023, 44].

Weil die Strohballen bei Schrägdächern dazu neigen, Richtung Traufe zu rutschen, sollte sie während des Einbaus zusammengespannt werden, um möglichst dicht zu liegen. Außerdem sind Querhölzer oder

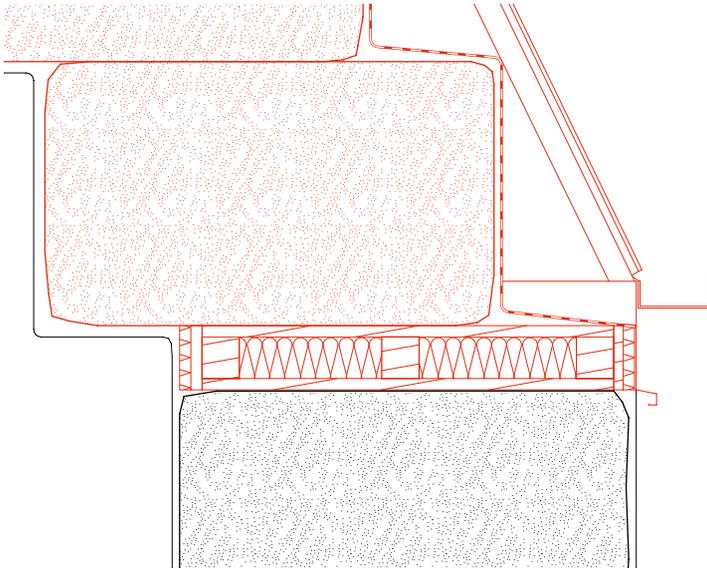
Rundstangen sinnvoll, um die Ballen vor Abrutschen sichern.

Eine Aufsparrendämmung kann problematisch werden, da die Befestigung der Dachhaut durch die 36 cm dicke Strohschicht dringen muss, um Sogkräften standzuhalten. Darüber hinaus gestaltet sich das Fixieren der Strohballen gegen Abrutschen bei Schrägdächern als schwierig. Vorteilhaft bei dieser Konstruktion ist aber der freie Einbau und eine nahezu wärmebrückenfreie Dachdämmung.

[Minke und Krick 2023, 45]

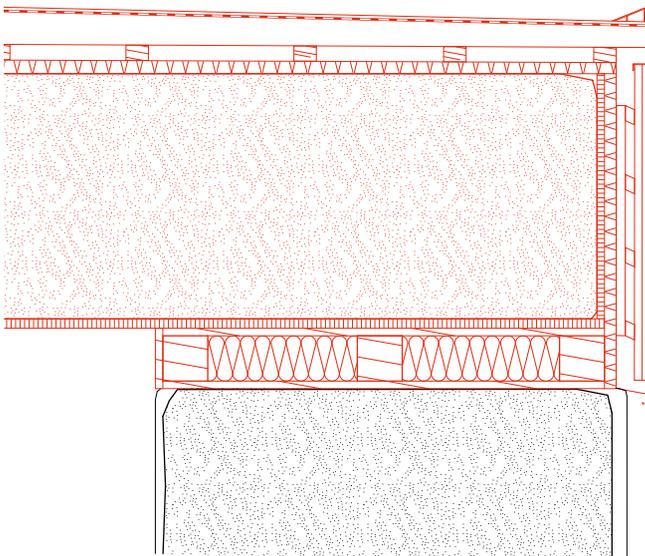
Während Wände aus Stroh diffusionsoffen sind und ohne Folien hergestellt werden können, muss das Dach vor Niederschlag geschützt und die wasserführende Schicht absolut wasserdicht sein. Dies erfordert außenseitig eine Dachbahn, wodurch innenseitig der Dämmung eine Dampfsperre erforderlich ist, um Wasserdampfdiffusion in die Strohballen zu verhindern. Bei der Planung des Daches sollte außerdem der konstruktive Witterungsschutz der Wände mitbedacht werden. Dieser muss aber nicht durch einen Dachüberstand erfolgen, sondern kann auch durch zusätzliche Strukturen oder eine Fassadenverkleidung gewährleistet sein.

Das Dach kann direkt nach dem Fertigstellen der letzten Geschosswände und des Ringankers aufgebracht werden. Es dient als zusätzliche Last, die den Setzungsprozess beschleunigt und die noch offenen Strohände vor Schlagregen schützt. Um weitestgehend unabhängig von der Witterung zu sein, empfiehlt sich eine Vorfertigung des Daches, sodass auf der Baustelle möglichst wenig mit offenliegendem Stroh gearbeitet wird.



Kraggewölbe

Dachhaut Wellblech
 Unterkonstruktion
 Wasserführende Schicht
 Lehmputz
 Großballen versetzt geschichtet
 Lehmputz



Flachdach

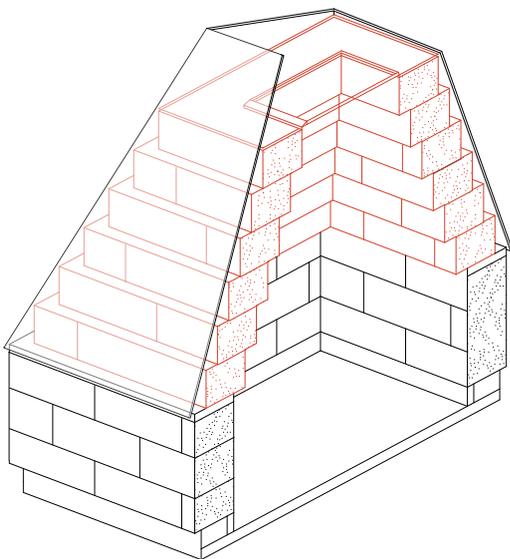
Dachhaut Wellblech
 Unterkonstruktion/Hinterküttung
 Hydrophobierte Holzfaserplatte
 Deckenkästen Dreischichtplatte
 Zwischendämmung Großballen
 Dreischichtplatte

GEWÖLBEBEKONSTRUKTIONEN

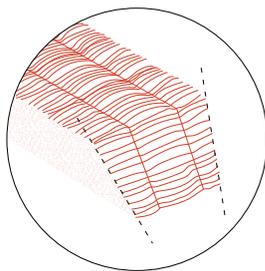
Mit Strohballen lassen sich auch Gewölbekonstruktionen herstellen. Diese können entweder mit Konstruktionen aus Holz erstellt oder lasttragend ausgeführt werden. Lasttragende Konstruktionen lassen sich in echte und unechte Gewölbe unterscheiden, wobei dieselben Prinzipien wie beim Mauerwerksbau gelten.

Bei echten Gewölben entstehen durch die Rundung im Bauteil nur Druckkräfte, anders als bei flachen Tragwerken, die auch Zugkräfte hervorrufen. Strohballen können Druckkräfte aufnehmen, daher sind bei diesen Konstruktionen keine zusätzlichen Tragelemente notwendig. Vertikale Widerlager wie Wände oder Stützen nehmen die Druckkräfte auf und müssen gleichzeitig den Schubkräften standhalten, die nach außen drücken. Die Widerlager müssen entsprechend vor diesen Horizontalkräften gesichert werden, was zum Beispiel durch Zugbänder zwischen den Auflagern oder außen liegende Strebepeiler realisiert werden kann. Die statisch optimale Form für Bogentragwerke ist die umgekehrte Kettenlinie. Um die Ballen bogenförmig stapeln zu können, müssen sie konisch getrimmt werden. Minke et al. haben hierfür eine Säge entwickelt, um mehrere lasttragende Tonnendächer und Kappendecken zu realisieren [Minke und Krick 2023, 43].

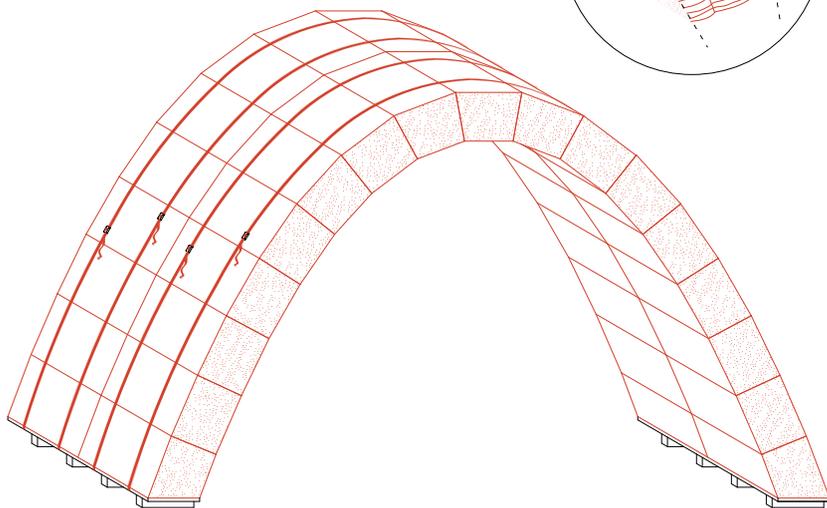
Unechte Gewölbe werden auch als Kraggewölbe bezeichnet und bestehen aus waagrecht liegenden Ballenreihen, die mit jeder Reihe auskragen, wodurch ein sich verjüngender Raumabschluss entsteht. Der Schweizer Architekt Werner Schmidt hat eine solche Konstruktion mit Großballen bei einem Ausstellungs- und Bürogebäude in der Schweiz realisiert [Bocco Guarneri 2013].



Kraggewölbe
Lasttragende Großballen



Tonnengewölbe
Lasttragende Kleinballen



6

Allgemeines

Zustimmung im Einzelfall und vorhabenbezogene Bauartgenehmigung

Genehmigung

ALLGEMEINES

Grundsätzlich müssen alle Bauweisen und Bauprodukte in Deutschland die bauaufsichtlichen Schutzziele (öffentliche Sicherheit und Ordnung; insbesondere Leben, Gesundheit und natürliche Lebensgrundlagen) einhalten. Alle konventionellen Bauprodukte und Bauweise werden in den Technischen Baubestimmungen aufgeführt werden oder es gelten allgemein anerkannte Regeln der Technik für sie [DIBt 2023].

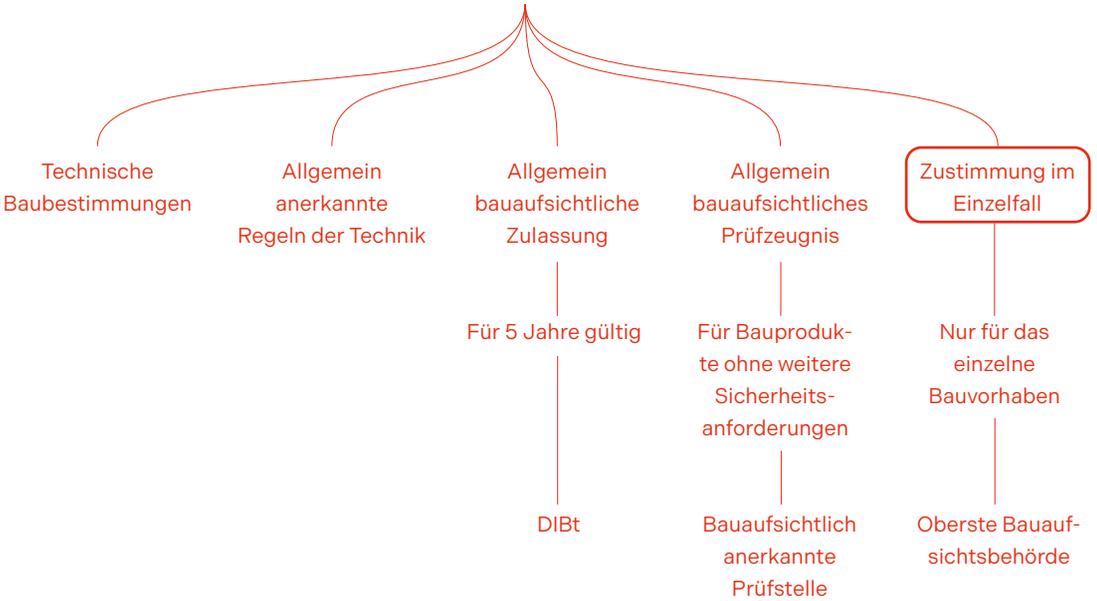
Alle davon abweichenden Bauprodukte und Bauweisen erfordern einen zusätzlichen Ver- oder Anwendbarkeitsnachweis, der versichert, dass sie die oben genannten Schutzziele nicht verletzen. Es gibt drei Arten von Ver- oder Anwendbarkeitsnachweise für Bauprodukte und Bauarten:

Für Bauprodukte können folgende Verwendungsnachweise angeführt werden: die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) kann nur vom DIBt auf Antrag erlassen werden, basiert auf Sicherheitsprüfungen und gilt meist über eine Dauer von fünf Jahren. Das allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnis (abP) kann von einer bauaufsichtlich anerkannten Prüfstelle erstellt werden und gilt für Bauprodukte, an die keine erheblichen Sicherheitsanforderungen gestellt werden. Die Zustimmung im Einzelfall (ZiE) wird von der zuständigen Obersten Bauaufsichtsbehörde erlassen und gilt nur für ein bestimmtes, einzelnes Bauvorhaben, für das die Verwendbarkeit durch Belege nachgewiesen werden muss.

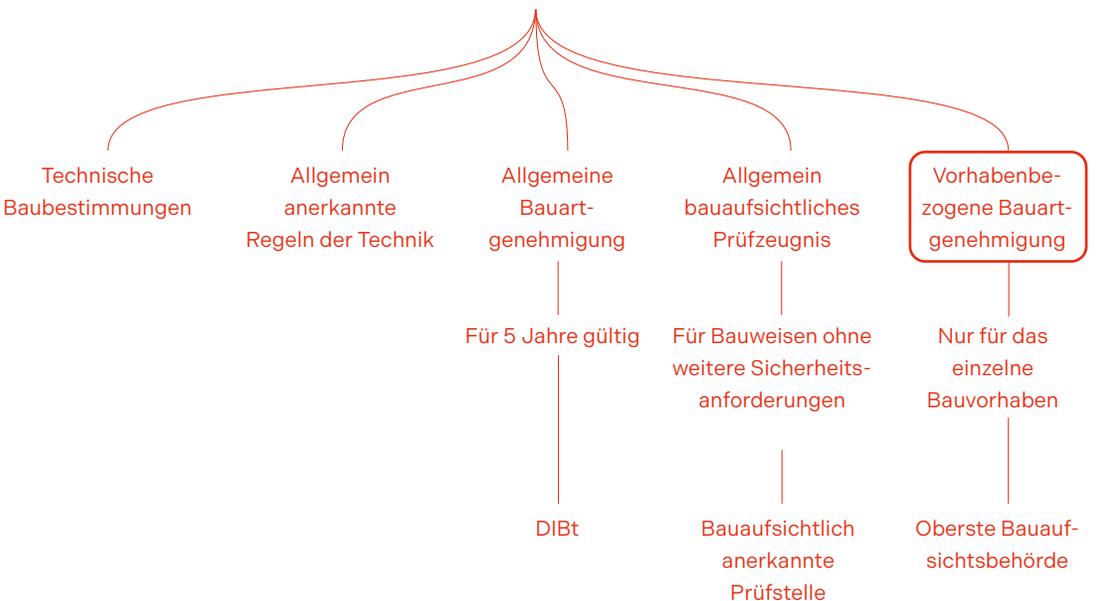
Für Bauarten gelten die Anwendbarkeitsnachweise analog: die allgemeine Bauartgenehmigung (aBG) ist vergleichbar mit der abZ für Bauprodukte. Das allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnis kann sich

sowohl auf Bauprodukte als auch auf Bauarten beziehen. Eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung (vBG) wird erforderlich, wenn die Bauweise nur für ein konkretes Bauvorhaben genehmigt werden soll und wird von der Obersten Bauaufsichtsbehörde vergeben.

Verwendbarkeit von Bauprodukten



Anwendbarkeit von Bauweisen



ZIE UND VBG

Das lasttragende Bauen mit Großballen vereint ein Bauprodukt und eine Bauweise, die aktuell weder geregelt sind noch allgemeine Ver- oder Anwendbarkeitsnachweise haben. Dementsprechend muss für das Bauprodukt „Großballen“ eine ZIE und für die Bauweise „lasttragendes Bauen mit Strohballen“ eine vBG beantragt werden. Diese sind im Landesrecht geregelt (§§ 16a und 20 MBauO) und können als kombinierter Antrag bei der Obersten Bauaufsichtsbehörde des Landes eingereicht werden.

Unter der „Beschreibung der Abweichung von bereits bestehenden Regelungen“ bietet sich an, die ETA für Kleinballen als Ausgangspunkt zu nutzen, welche für eine Holzkonstruktion mit Kleinballen als Dämmung gilt. Sowohl das Bauprodukt als auch die Bauweise weichen von dieser Konstruktion ab, weshalb im Antrag unbedingt die Aspekte Standsicherheit, Brandschutz, Wärme- und Feuchteschutz angesprochen werden müssen.

Für die Standsicherheit ist eine gutachterliche Stellungnahme notwendig, die sich auf den konkreten Entwurf bezieht und für diesen ein Regelwerk aufstellt, das eingehalten werden muss. Hierfür müssen Vorschläge für Übereinstimmungsnachweise eingereicht werden, mit denen (später) belegt werden kann, dass das Regelwerk eingehalten wurde.

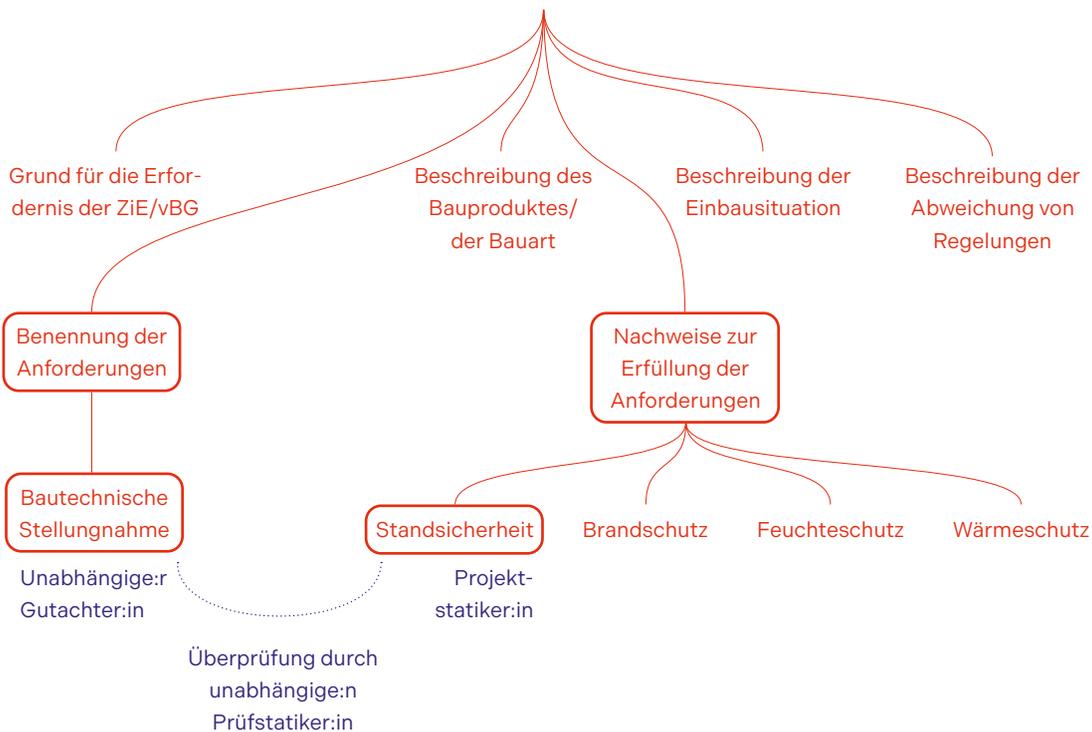
Für das Bauprodukt Großballen müssen dafür mehrmalige, unabhängige Kontrollen durchgeführt werden, welche die Eignung der Ballen als Bauprodukt bestätigen. Für die Bauweise muss ein Monitoring durchgeführt werden, das die Setzung der Wände protokolliert und ihre Standsicherheit nachweist.

Für den Brandschutz existiert ein abP für eine Holzkonstruktion mit Kleinballendämmung, das verlängert wurde [Materialprüfanstalt Braunschweig 2014]. Die Brandschutzfähigkeiten einer lasttragenden Wand kann von diesem abgeleitet werden, siehe dazu Seite 58.

Der Wärme- und Feuchteschutz kann ebenfalls analog zu den Seiten 48 und 52 ausgeführt werden. Für die U-Wert-Berechnung helfen Dokumente und Messungen bereits realisierter Bauten. Als Feuchteschnachweis ist eine Berechnung zum Tauwasserausfall sinnvoll.

Alle öffentlich zugänglichen Dokumente zum Thema finden sich unter fasba.de im Downloadbereich. Bereits in der Vorplanung sollten die Genehmigungsbehörden unbedingt miteingeschaltet werden, da die Verfahren mehrere Monate dauern. Eine Baugenehmigung kann erst erteilt werden, wenn die ZiE und vBG vorliegen. Es kann hilfreich sein, auf bereits erteilte Zulassungen realisierter Projekte hinzuweisen, sodass eine Beurteilung des Antrags schneller abgewickelt werden kann. Je nach Komplexität des Bauvorhabens ist für den kombinierten Sonderantrag mit einer Bearbeitungsgebühr von rund 1000 € zu rechnen zuzüglich der Kosten für die einzureichenden Gutachten und Nachweise. [Minke und Krick 2023, 74]

Kombinierter Sonderantrag



7

Strohhaus

Gartist GmbH

Esserhof

Haus B-D

Strohballenhaus Eins B

Schutzhütte Langeggarten

Referenzen

STROHHAUS



Egg Dornbirn (AT)

Baujahr 2014

Architekturbüro Georg Bechter Architektur + Design

A.43 Innenraum

[Adolf Bereuter, bearbeitet]

A.44 Terrasse

[Adolf Bereuter, bearbeitet]



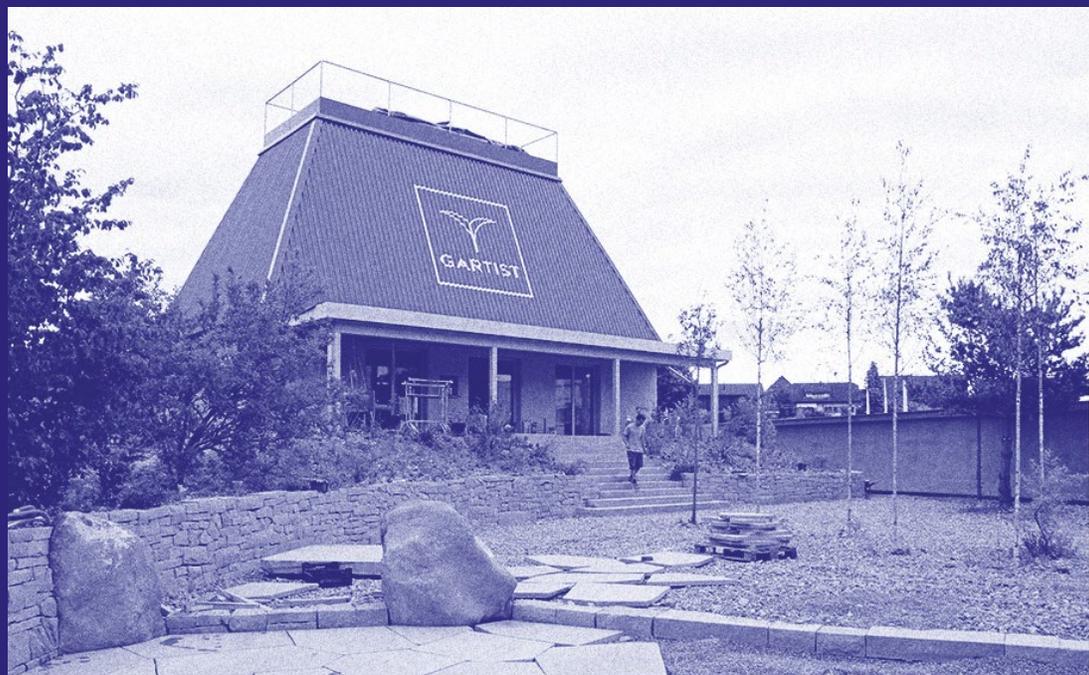
GARTIST GMBH



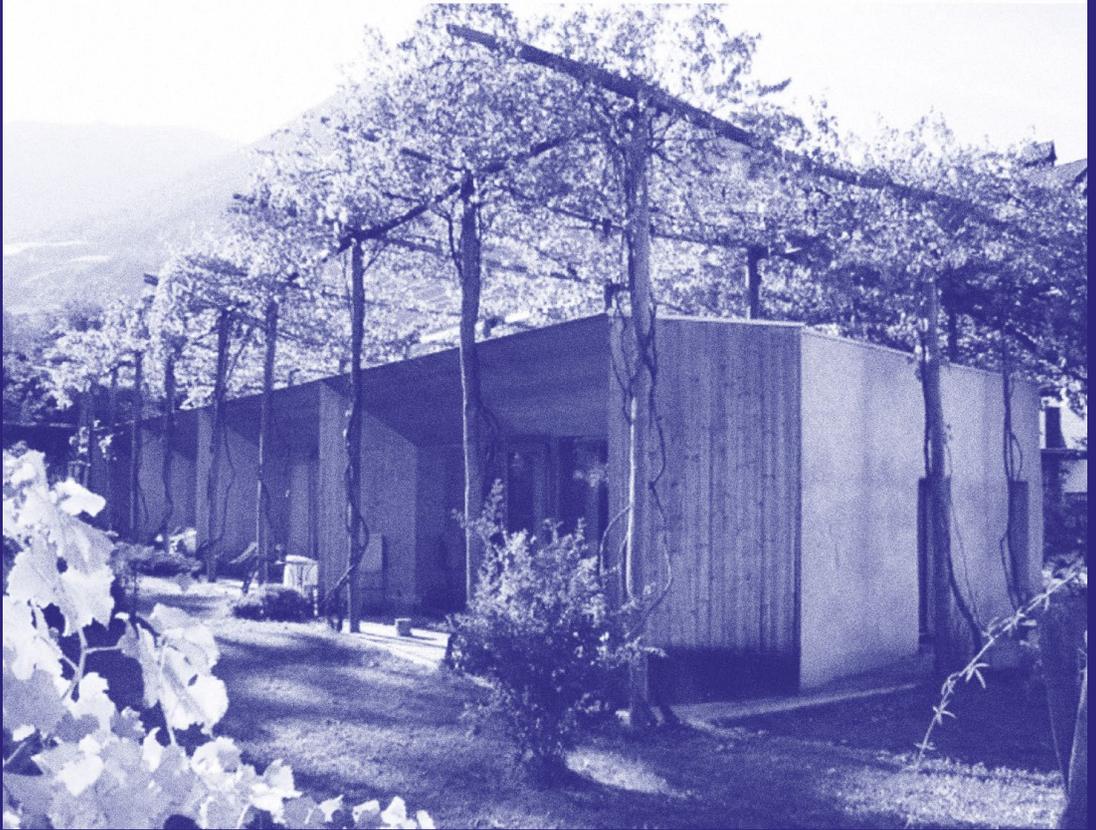
Bubikon (CH)
Planungsjahr 2016
Architekturbüro Atelier SCHMIDT GmbH

A.45 Aufbau Kraggewölbe
[Atelier SCHMIDT, bearbeitet]

A.46 Eingang
[Gartist Bubikon, bearbeitet]



ESSERHOF



Lana (IT)

Baujahr 2006

Architekturbüro Atelier SCHMIDT GmbH

A.47 Esserhof Terrassen
[Atelier SCHMIDT, bearbeitet]

A.48 Anpassen der Ballen
[Atelier SCHMIDT, bearbeitet]



HAUS B-D



Disentis (CH)
Baujahr 2002
Architekturbüro Atelier SCHMIDT GmbH

A.49 Versetzen der Ballen
[Atelier SCHMIDT, bearbeitet]

A.50 Südansicht
[Atelier SCHMIDT, bearbeitet]



STROHBALLENHAUS EINS-B



Weimar (D)

Baujahr 2019

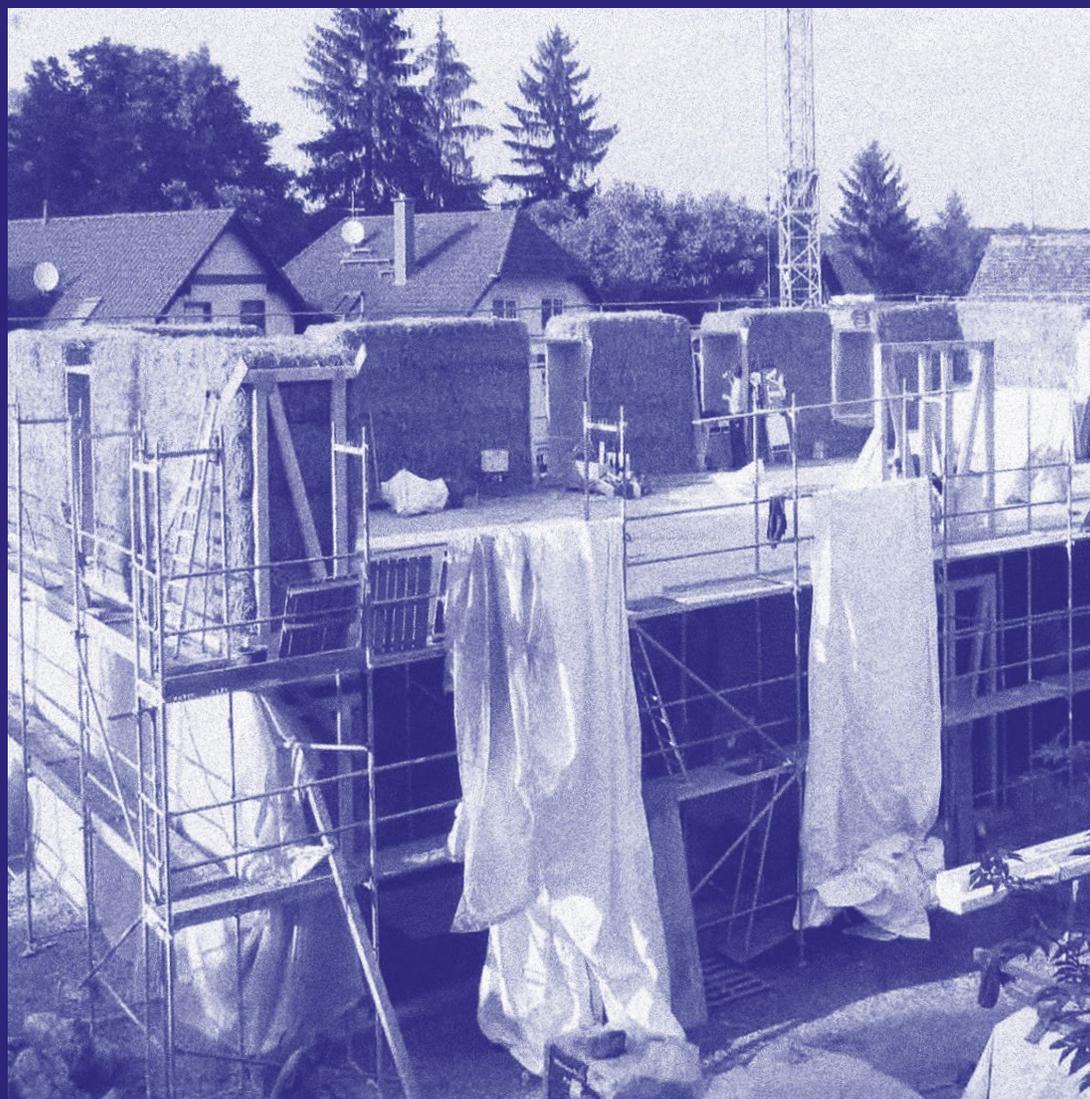
Architekturbüro Ziegelhof-Architektur

A.51 Südfassade

[Z-Architektur, bearbeitet]

A.52 Bauprozess

[Z-Architektur, bearbeitet]



SCHUTZHÜTTE LANGE GARTEN



Lauterhofen (D)

Baujahr 2014

Architekturbüro Berschneider + Berschneider

A.53 Innenraum

[Berschneider + Berschneider, bearbeitet]

A.54 Standort im Golfpark

[Berschneider + Berschneider, bearbeitet]



8

Ausblick

Die lasttragende Strohballenbauweise bringt zahlreiche Vorteile mit sich: das Material ist günstig und steht uns alljährlich und fast überall auf der Welt regional zur Verfügung. Während des Wachstums bindet das Getreide CO_2 , während der Nutzung sorgt der Baustoff für hohe Dämmleistungen und einen geringen Heizenergieverbrauch und nach seinem Lebenszyklus kann er zu 100 % dem natürlichen Kreislauf zurückgeführt werden. Der Wandaufbau ist denkbar einfach und lädt zu unzähligen Gestaltungsmöglichkeiten ein.

Durch diese Vorteile, vor allem in der Herstellung und dem Aufbau, kann Stroh auch als Krisenbaustoff betrachtet werden, mit dem binnen kurzer Zeit an fast jedem Ort hochgedämmte Gebäude entstehen können, die genauso schnell wieder rückgebaut werden können.

Strohballen durchlaufen im Vergleich zu anderen Baumaterialien einen denkbar knappen Verarbeitungsprozess. Was einerseits vorteilhaft für die Ökobilanz ist, kann andererseits Herausforderungen in der Planung und der Genehmigung bedeuten: das Planen und Bauen mit Strohballen erfordert Expertise und belastbare Rechenwerte, die zur Standardisierung der Bauweise beitragen. Vor allem die langfristig angelegten Forschungsvorhaben zur Statik und Bauphysik von Großballen an der Bauhaus Universität in Weimar sind vielversprechende Grundpfeiler, die gelegt werden müssen, um die lasttragende Strohballenbauweise in der zeitgenössischen Architekturpraxis zu etablieren.

Es braucht außerdem mehr gebaute Beispiele, die kreative und zukunftsweisende

Möglichkeiten aufzeigen, wie wir zeitgenössische Architektur mit simplen, aber intelligenten Lösungen verbinden können. Die Bandbreite an Möglichkeiten ist groß und sicherlich noch nicht ausgeschöpft.

Der Strohballenbau kann in Zukunft bestimmt nicht für jedes Bauprojekt die erste Wahl sein. Doch er stellt schon jetzt eine wichtige und nicht zu unterschätzende Alternative zu konventionellen Bauweisen dar.

Nachwort

Danke

Danke an Andrijana und Paul für die engagierte Betreuung dieser Arbeit und die vielen inspirierenden Inputs auch während meiner restlichen Studienzeit, aus denen ich viel mitnehmen werde.

Danke auch an meine Kommiliton:innen für den wertvollen Austausch innerhalb und außerhalb der Uni, der mir immer neue Blickwinkel geschenkt hat, und vor allem danke für die wunderbare Studienzeit.

Danke an meine Familie und Freund:innen fürs Zuhören, Beratschlagen, Zuspochen und fürs gelegentliche Ablenken.

Danke vor allem an meine Eltern für die Ermöglichung meines Studiums und für eure bedingungslose Unterstützung.

Quellenverzeichnis

- Ashour, Taha. 2015. *Beautiful Houses from Rice Straw*. Kairo: Benha University.
- Atelier SCHMIDT GmbH. s.d. *Atelier Werner Schmidt*. Zugriff am 11. August 2023. <https://www.atelierschmidt.ch/>
- Aufhammer, Gustav; Fischbeck, Gerhard. 1973. *Getreide, Produktionstechnik und Verwertung*. DLG Verlags GmbH Frankfurt/Main.
- Baunetz. *Sorption*. Zugriff am 16. August 2023. <https://www.baunetzwissen.de/daemmstoffe/fachwissen/feuchteschutz/sorption-152276>.
- Baunetz. *Wärmeübertragungsarten*. Zugriff am 09. September 2023. <https://www.baunetzwissen.de/nachhaltig-bauen/fachwissen/bauphysik/waermeuebertragungsarten-662964>.
- Bocco Guarneri, Andrea. 2013. *Werner Schmidt Architekt*. Birkhäuser.
- Cascone, Stefano; Rapisarda, Renata und Cascone, Dario. 2019. *Physical Properties of Straw Bales as a Constructoin Material: A Review*. Catania: Department of Civil Engineering and Architecture, University of Catania.
- Center for Civil Engineering Earthquake Research. 2010. *Seismic performance of innovative straw bale wall systems*. Zugriff am 08. August 2023. <https://www.unr.edu/cceer/projects/straw-house>.
- Condra & Manners: *Fotografie*. 1926. Erschienen in: Welsch, Roger, L. 2020. *Sandhills, Nebraska: le berceau de la construction en botte de paille*. Zugriff am 10. August 2023. <https://topophile.net/savoir/sandhills-nebraska-le-berceau-de-la-construction-en-botte-de-paille/>
- Corum, Nathaniel. 2005. *Building a Straw Bale House - The Red Feather Construction Handbook*. New York: Princeton Architectural Press.
- Das Haus. 2021. *Strohballenhaus: Vor- und Nachteile, Anbieter, Kosten*. Zugriff am 07. August 2023. <https://www.haus.de/bauen/strohballenhaus-33325>.
- DBFZ. 2019. *Der Strohmarkt in Deutschland*. Broschüre, Leipzig.
- Dewell, Nathaniel L.: *Fotografie*. um 1942. Erschienen in: Welsch, Roger, L. 2020. *Sandhills, Nebraska: le berceau de la construction en botte de paille*. Zugriff am 10. August 2023. <https://topophile.net/savoir/sandhills-nebraska-le-berceau-de-la-construction-en-botte-de-paille/>
- DIBt. 2017. *Europäische Technische Bewertung (ETA-17/0247) „Baustroh“*. 2023. *Technische Baubestimmungen*. Zugriff am 01. September 2023. <https://www.dibt.de/de/wir-bieten/technische-baubestimmungen>.
- DIN e.V. 2018. *DIN 4109-01. Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderungen*.
- DIN e.V. 2020-11. *DIN 4108-4. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 4: Wärme- und feuchtetechnische Bemessungswerte. Tabellen 1 und 2*.
- DIN e.V. 2022. *DIN 68800-2. Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau*.
- Estler, M. *Aufbau von herkömmlichen Tangential-Dreschwerk und Axial-Dreschwerk*. AgTecCollection: Institut für Landtechnik TUM /Zeichenbüro. TU München. Zugriff am 11. November 2023. <https://mediatum.ub.tum.de/1571364>
- ETHZ Materialarchiv. 2014. *Lehmsteine*. Zugriff am 04. September 2023.
- FASBA. 2019. *Strohbaurichtlinie SBR-2019*. Verden. Forschungszentrum Jülich GmbH. 2023. EnArgus. Zugriff am 24. August 2023. https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d2831-2/**/*Elastizit%c3%a4tsmodul.html?op=Wiki.getwiki.
- GOW Media GmbH. *Getreide - vom Gras zur Kulturpflanze*. Zugriff am 19.08.2023. <https://www.getreide.org/>
- Gruber, Astrid; Gruber, Herbert und Santler, Helmuth. 2012. *Neues Bauen mit Stroh in Europa*. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag.
- Gruber, Herbert. ASBN - Austrian Strawbale Network. *Strohbau-Techniken*. Zugriff am 20. August 2023. <https://baubiologie.at/strohballenbau/strohbau-techniken/>
- Gruber, Herbert; Santler, Helmuth; Kade, Virko; Howlett, Michael. 2017. *Unit 3. Lasttragender Strohbal-*

lenbau. Straw Bale Training for European Professionals. Handbuch zum STEP-Lehrgang.

Hansen, Hinrich; Warmuth, Eva und Warmuth, Albert. 2014. *Bau-Strohballen aus der Landwirtschaft*. FASBA.

Hartmann, Hans. 2016. *Ernte*. In: Kaltschmitt, Martin; Hartmann, Hans; Hofbauer, Hermann. *Energie aus Biomasse*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.

Helbig, Stefan. 2022. *Bauphysikalische Untersuchungen für die lasttragende Strohballenbauweise*. Weimar: Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus Universität Weimar.

Hertwich, Edgar; Lifset, Reid; Pauliuk, Stefan und Heeren, Niko. 2020. *Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future*. Nairobi: United Nations Environment Programme.

IEA. 2022. *Tracking Buildings 2022*. Zugriff am 06. August 2023. <https://www.iea.org/reports/tracking-buildings-2021>.

Kade, Virko. *Strohballen als Baustoff*. Vortrag. Strohballenbautage Weimar. 13.09.2022.

Krick, Benjamin. 2008. *Untersuchung von Strohballen und Strohballenkonstruktionen hinsichtlich ihrer Anwendung für ein energiesparendes Bauen unter besonderer Berücksichtigung der lasttragenden Bauweise*. Kassel: Universität Kassel.

Materialprüfanstalt Braunschweig. 2014. *Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis*. Braunschweig.

Minke, Gernot und Krick, Benjamin. 2023. *Handbuch Strohballenbau*. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag.

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz. 2023. *Merckblatt*. Hannover, 01. September 2023.

OECD. 2019. *Global Material Resources. Outlook to 2060 Economic Drivers and Environmental Consequences*. Zugriff am 06. August 2023. https://read.oecd-ilibrary.org/environment/global-material-resources-outlook-to-2060_9789264307452-en#page1.

OECD. 2022. *2022 Global Status Report for Built*

ings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi.

Proplanta. s.d. *Proplanta - Vorsprung durch Wissen*. Zugriff am 07. August 2023. https://www.proplanta.de/Karten/proplanta_karten.php.

Rhodes, John Wallace. *Fotografie*. um 1910. Erschienen in: Welsch, Roger, L. 2020 *Sandhills, Nebraska: le berceau de la construction en botte de paille*. Zugriff am 10. August 2023. <https://topophile.net/savoir/sandhills-nebraska-le-berceau-de-la-construction-en-botte-de-paille/>

Schmidt, Werner. *Lasttragender Strohballenbau*. Vortrag. Strohballenbautage Weimar. 13.09.2022.

Schneider, Patricia; Pfoh, Sandro und Grimm, Franziska. 2023. *Leitfaden 01 - Ökologische Kenndaten - Baustoffe und Bauteile*. München: Projektplattform Energie TU München.

Souza, Eduardo. 2022. *Thatched Roofs: History, Performance and Possibilities in Architecture*. Zugriff am 09. August 2023. <https://www.archdaily.com/978061/thatched-roofs-history-performance-and-possibilities-in-architecture>.

Taube, Christopher. *Mechanische Untersuchungen im Forschungsprojekt LaStrohBau*. Vortrag. Strohballenbautage Weimar. 14.09.2022.

Taube, Christopher; Hoppe, Florian und Morgenthal, Guido. 2021. *Strohballen als lasttragender Baustoff - Aktueller Stand in Forschung und Baupraxis*.

Wieland, Hansjörg. 2004. *Mikrobielle Empfindlichkeit von Bau-Strohballen*. Verden: FASBA e.V.

Wimmerer, Robert; Hohensinner, Hannes; Drack, Manfred; Beitel, Anna-Maria und GrAT. 2004. *Das S-House - Planen und Bauen für die Zukunft*. Wien: Gruppe Angepasste Technologie an der Technischen Universität Wien.

Z-Architektur. *Haus Eins-B*. Zugriff am 15. September 2023. <https://hoahoppe.wordpress.com/projekte/haus-einsb/>

Hilfreiche Links, Adressen und Netzwerke

Strohballenbautage - jährlich stattfindendes Seminar- und Vernetzungstreffen
www.fasba.de/veranstaltungen

Z-Architektur Gbr - Strohballenprojekte in Deutschland
www.z-architektur.eu

FASBA - Fachverband für Strohballenbau Deutschland e.V.
www.fasba.de

ASBN - Österreichisches Netzwerk für Strohballenbau
www.baubiologie.at/asbn

MFPA Bauhaus Universität Weimar
www.mfpa.de

Norddeutsches Zentrum für nachhaltiges Bauen
www.nzn.de

BauStroh - Zertifizierter Baustrohballenhersteller
www.baustroh.de

Atelier SCHMIDT GmbH - Strohballenprojekte in der Schweiz
www.atelierschmidt.ch

Georg Bechter Licht - Strohhäuser in Egg Dornbirn
www.bechter.eu

One Straw Revolution - Strohballenprojekte in Österreich
www.strohballenbau.info

Lehrvideos zum lasttragenden Strohballenbau von Werner Schmidt (Teile 1-3)
https://www.youtube.com/watch?v=9wzqp7zXSkE&t=446s&ab_channel=Schoenwasser
https://www.youtube.com/watch?v=-H3Lo5HnhVY&t=2s&ab_channel=Schoenwasser
https://www.youtube.com/watch?v=rWszSwF2kgM&t=8s&ab_channel=Schoenwasser

Impressum

Auf Stroh bauen. Ein Einblick in die lasttragende Strohballenbauweise

für den Inhalt verantwortlich
Anna Dienberg

Schriftart
Indivisible

Papier
120 g/m² Extrarough Recycling white
320 x 240 mm

Druck
AusDruck Berlin

Bindung
Buchbinderei Klünder Berlin

© 2024 Anna Dienberg



CC BY-NC-ND 4.0 International
Namensnennung - Nicht-kommerziell - Keine Bearbeitung 4.0 International